РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА



ШКОЛА
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

ТЕЗИСЫ
трудов конференции

Школа молодых ученых

Федеральная территория «Сириус»
Университет «Сириус»
21–29 сентября 2026 г.

Содержание

ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ 29

ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ 29

Перспективные применения методов печати для формирования активных элементов микроэлектроники
Иванов В. В. 29

Физически неклонируемые функции в интегральных схемах
Соловьёв А. А., Певцов Е. Ф., Рогачёв В. А. 32

Микроэлектромеханические системы в управлении транспортных средств
Лысенко И. Е. 36

Двумерный MoS2 для посткремниевой микроэлектроники: перспективы и вызовы
Черникова А. Г. 38

СЕКЦИЯ № 1 «МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУР, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ» 40

Математическое моделирование межсоединений интегральных схем посредством аналитических моделей
Черникова Е. Б. 40

Верифицированная модель плазмохимического травления поликремния в индуктивно-связанной плазме HBr/Cl2/Ar
Оксаниченко Ф. В., Ефремов А. М. 42

Исследование физико-химических свойств плазмы C2F6 методами экспериментальной диагностики и численного моделирования
Корякова Е. Е., Ефремов А. М., Исляйкин А. М. 44

Пространственно-разрешенная модель плазмы O2/Ar/N2 в реакторе удаления фоторезиста
Захаров Ю. А., Ефремов А. М. 46

Моделирование атомно-слоевого травления кремния в плазме газовой смеси Ar/Cl2
Баранов О. И., Резванов А. А. 48

Моделирование последовательно-шунтирующего МЭМС-переключателя с расширенным диапазоном частот
Морозов М. О., Уваров И. В. 50

Моделирование контактного МЭМС-акселерометра порогового типа
Шалаев В. А., Лысенко И. Е., Михеева А. С. 53

Влияние параметров автокорреляционной функции теплового потока на коэффициент теплопроводности кобальта
Виноградов Ф. А., Федотов А. Ю. 55

Моделирование влияния температуры на характеристики микрополосковой линии с двумя боковыми заземленными проводниками при разных влагозащитных покрытиях
Сагиева И. Е. 58

Исследование частотной стабильности спиральной катушки индуктивности с переменной шириной проводника
Власов С. В., Жечев Е. С. 61

Численное моделирование процесса лазерного отжига для формирования омических контактов к карбиду кремния
Джавадов Р. Р., Маринов Д. Л., Ковалёв А. С. 64

Зависимость электронных свойств монослоев TMD и JTMD от линейной деформации и адсорбции аммиака
Свинкин Н. А., Кондратьев В. М., Круглов И. А., Большаков А. Д. 66

Температурная зависимость параметров уравнения Фаулера — Нордгейма в диоксиде кремния
Сорокин Д. В. 68

Исследование влияния изменения конструкции субмикронного транзистора на уровень шума с использованием метода импедансного поля
Краснокутский Д. С., Шелепин Н. А. 70

Приборно-технологическое моделирование FG MOSFET с учетом температуры
Бабурин А. И., Силкин Д. С., Попов Д. А. 72

Сравнительный анализ физико-химических свойств плазмы HBr + Ar и HBr + He: влияние соотношения компонентов, давления и вкладываемой мощности
Цепкин М. В., Ефремов А. М. 74

Сравнительный анализ процедур Python для определения параметров мощных МОП-транзисторов и тепловых параметров схем с ними для цифровых двойников электронных компонентов
Зубкова А. И., Харитонов И. А. 76

Комплексная методика проектирования ММИС K/Ka-диапазона с учетом воздействия электромагнитных помех
Новиков П. Э., Корсак К. В., Ловшенко И. Ю. 79

Численное моделирование и оптимизация перовскитного солнечного элемента с инвертированной архитектурой с использованием TCAD-подходов
Козлов С. В., Муратова Е. Н., Гаджей А. О. 81

Моделирование влияния формы верхнего электрода на чувствительность датчика деформации на основе легированных азотом углеродных нанотрубок
Соболева О. И., Полывянова М. Р., Чебручан Е. В., Ильина М. В. 84

Моделирование поверхностного потенциала вертикально ориентированных углеродных нанотрубок в зависимости от геометрических параметров для разработки высокочувствительных сенсоров
Полывянова М. Р., Яковенко М. С., Ильина М. В. 87

Моделирование резонансной частоты чувствительного элемента сенсора деформации на основе легированных азотом углеродных нанотрубок
Хомленко Д. Н., Горбунов Н. Г., Шиков А. З., Ильин О. И., Ильина М. В. 90

Моделирование методом Монте-Карло процесса зарастания пленки TiN, формируемой в процессе АСО на поверхности кремниевой пластины
Раводина А. М., Зюзин С. С., Резванов А. А. 93

Конструктивно-технологические методы улучшения параметров активного пикселя матричного КМОП-сенсора
Свинцов Р. О., Панышев К. А. 96

Применение молекулярно-динамического моделирования для исследования эволюции кластеров ксенона при облучении кремния низкоэнергетичными ионами
Подорожний О. В., Румянцев А. В., Боргардт Н. И. 99

Исследование процесса резистивного переключения элемента хранения ReRAM на основе оксида гафния с помощью сеточных методов и КМС
Козлов А. К., Ганыкина Е. А., Резванов А. А. 102

Методика прогнозирования надежности электронных средств с применением методов машинного обучения
Кацнельсон А. И., Костиков Д. В., Полесский С. Н. 105

Особенности SPICE-моделирования мощных GaN- и SiC-приборов с учетом влияния широкого диапазона температур
Исмаил-Заде М. Р., Петросянц К. О., Самбурский Л. М. 109

Схемотехническое моделирование мемристора с учетом эффектов деградации, вариации и залипания его электрических параметров в SPICE-подобных симуляторах
Неустроев А. А., Бусыгин А. Н., Удовиченко С. Ю., Бобылев А. Н., Шулаев Н. А. 112

Модификация температурной зависимости и автоматизация определения параметров SPICE-модели стабилитрона в рабочем диапазоне токов
Хлынов П. А., Самбурский Л. М. 115

Атомистическое моделирование работы элементов энергонезависимой памяти на основе сегнетоэлектрика $SrTiO_3$
Павлишин К. Ю., Абгарян К. К., Бажанов Д. И. 119

Гибридная модель мемристора с использованием корректирующего аппроксиматора
Хлопук В. С., Абгарян К. К. 122

Влияние материала резонатора на чувствительность резонансно-частотного датчика давления
Таловская А. А., Барбин Е. С., Кулинич И. В., Гуляева А. А. 125

Модель MIM-селектора ReRAM на основе кинетического метода Монте-Карло для САПР
Курьянов А. О., Федотов М. И., Теплов Г. С. 130

Оптимизация структур с квантовыми ямами в модуляторах электропоглощения
Мустафин А. Д., Гришаков К. С., Васильевский И. С. 132

Разработка и верификация инструмента для моделирования пассивных СВЧ-компонентов
Коптев А. С., Нуштаев А. В., Потупчик А. Г. 135

Сравнение предобуславливателей для итерационного решателя на основе метода Галёркина для интегрального уравнения электрического поля в экранированных многослойных печатных платах
Макаренко А. О., Жеглова П. В., Щербаков А. А. 137

Моделирование и оптимизация характеристик ультрафиолетовых фотодетекторов на основе алмазных диодов Шоттки
Абдуллоев А. Д., Карданов Л. А., Гришаков К. С. 139

Разработка компактной модели деградации для КМОП-технологии 180 нм
Унтилова П. Д., Потупчик А. Г., Кривенцев А. М. 142

СЕКЦИЯ № 2 «ЛИТОГРАФИЯ, В ТОМ ЧИСЛЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ» 144

Перспективы развития современных литографических процессов
Рощупкин Д. В. 144

Разработка инструмента коррекции эффектов оптической близости на основе моделирования с учетом геометрических ограничений топологии
Московцев А. Ф., Иванов В. В. 147

Разработка и калибровка процессной модели фотолитографии для резистов с химическим усилением
Степанова М. Г., Шарапов А. А., Литаврин М. В., Шишлянников А. В., Фортунова Е. А., Горнев Е. С. 149

Исследование и разработка компактных моделей резиста для задач литографического моделирования и OPC
Сергеев Е. Д., Московцев А. Ф., Иванов В. В. 151

Анализ чувствительности топологии паттернов к вариациям параметров литографии с помощью динамических нейронных операторов Фурье
Вологжанин Н. А. 154

Алгоритм многоуровневой ILT-SRAF-оптимизации с регуляризацией и блочной аппроксимацией
Павлов И. С., Федоров И. Ю., Белоусов С. А. 156

Агентно-ориентированный подход к диагностике оптической системы литографического оборудования: архитектура и результаты анализа аберраций волнового фронта
Первунецких А. А., Фёдоров И. Ю. 160

Аппроксимация электромагнитного отклика PSM в составе цифрового двойника литографа
Баянов И. В., Фёдоров И. Ю. 163

Сравнительный анализ методов классификации литографических паттернов
Соловьёва В. Д., Метельников А. А., Кошлаков А. В. 166

Теоретическая оценка разрешения оптической системы на основе составных киноформных линз для задач рентгеновской литографии
Глаголев П. Ю., Корнеев В. И., Дюжев Н. А. 168

СЕКЦИЯ № 3 «ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ» 169

Динамика отрицательных ионов в импульсном емкостном разряде в O_2 с разным материалом электродов
Глотов А. В., Лопаев Д. В., Богданова М. А., Шибанов Д. Р., Зиганшин И. И., Рахимов А. Т. 169

Оптимизация цикла атомно-слоевого травления SiO2 на основе анализа состояния поверхности
Ковалёв А. Н., Шибанов Д. Р., Лопаев Д. В., Раводина А. М., Резванов А. А. 173

Селективное травление SiOx к SiNx для МОЭМС-применений
Дятлов В. Д., Жуков И. А., Соловьев А. А., Иванова О. К., Платонов Д. Д. 176

Однородность по пластине плазменных процессов в ИСП-установке
Кузьменко В. О., Халилуллин Р. Р., Мяконьких А. В. 178

Изучение технологии формирования электропроводящих пленок TiN для кремниевых кантилеверов ЭСМ
Сорвачев В. А., Новак А. В. 180

Формирование трапециевидных микроструктур на поверхности монокристаллического кремния методом лазерной микрообработки для применения в микроразъемных соединениях
Соловьёв И. А., Гаврилова А. А., Миронов Г. В., Кочергин М. Д., Вертянов Д. В. 183

Влияние диэлектрического слоя SiO2 на точность формирования структуры кроссбара мемристоров при электронно-лучевой литографии
Фетисенкова К. А., Татаринцев А. А., Рогожин А. Е., Иешкин А. Е., Буруто М. Д. 185

Особенности формирования тонкопленочного $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ на двумерном MoS_2 для FeFET-транзисторов нового поколения
Коробкин Е. Н., Колинько К. С., Маркеев А. М., Черникова А. Г. 188

Метод получения тонких пленок Al:Ta2O5 и исследование их свойств для применения в мемристорах
Шулаев Н. А., Бобылёв А. Н., Кассеинов Р., Волкова С. С., Удовиченко С. Ю. 190

Синтез углеродных пленок методом импульсного лазерного осаждения
Шкапина А. С., Крюков Р. Н., Лесников В. П., Вихрова О. В., Здоровейщев А. В., Данилов Ю. А., Балуева А. А. 193

Оптимизация процесса получения пленочных структур на основе ККТ HgTe для фотосенсоров ИК-диапазона
Хакимов К. Т., Королева Т. В., Сапцова О. А., Яковлев В. О., Асначёв Д. Д., Чемакина Я. А., Медведев А. Г., Попов В. С. 196

Улучшенный метод нанесения латексных микросфер на кремниевые пластины для калибровки анализаторов частиц
Корякова Е. Е., Козлов А. К., Строкачук А. Н. 198

Синтез тонкопленочного люминофорного покрытия методом реактивного магнетронного сораспыления
Рунц А. А., Блейхер Г. А. 201

Исследование влияния кремнийсодержащих слоев на механические свойства диэлектрической мембраны, применяемой в технологии матричного МЭМС-преобразователя состава газа
Николаева А. В., Поломошнов С. А., Амеличев В. В., Кривецкий В. В. 203

Покрытия Ni(P), полученные методом химического осаждения, как альтернативный способ формирования барьерных/затравочных слоев в TSV-технологии
Соколова Д. Д., Буйлов Н. С., Ильина Е. А., Голощапов Д. Л., Середин П. В. 206

Получение и управление морфологией наночастиц титана для формирования геттеров сухой аэрозольной печатью
Долгов В. А., Свирелкин Г. М., Корнюшин Д. В., Борисов В. И., Иванов М. С., Алешина М. Ю., Ворошилова В. А., Вершинина О. В., Иванов В. В. 209

Формирование полупроводникового канала на основе оксида InGaZn методом аэрозольной печати
Торгунаков В. Г., Масленников Д. В., Егельский И. В., Лабутов Д. А. 213

Оптоэлектронные приборы мостиковой конструкции на основе соединений A^3B^5: особенности технологии создания
Пивоварова А. А., Куницына Е. В., Андреев И. А., Ильинская Н. Д., Яковлев Ю. П. 219

Разработка режима осаждения пленок ITO методом электронно-лучевого испарения для снижения нагрева иона в высокочастотных ионных ловушках
Кузнецова А. Д., Шишкин А. В., Аббасов Т. С., Габидуллин А. Р., Денисов А. А. 221

Электронно-микроскопический анализ конструкции кристаллов силовых транзисторов SiC MOSFET
Киреев Г. С., Волков Р. Л., Боргардт Н. И. 224

Исследование процесса карбонизации монокристаллического кремния с использованием этилена (C2H4) и монооксида углерода (CO)
Фролов Н. А., Артюшенко М. Н., Федотов С. Д., Гращенко А. С., Редьков А. В., Кукушкин С. А., Царик К. А. 227

Формирование и исследование функциональных характеристик низкотемпературных NEG-геттеров TiZrV для МЭМС-вакуумирования
Краюшкин В. П., Шайхулов Т. А., Спиридонов М. В., Коробкин Е. Н., Стариков П. А., Калмыков А. С., Коростылёв Е. В. 230

Особенности формирования атомарно-гладких гетерограниц сверхрешеток InGaAs/InAlAs в гетероструктурах квантово-каскадных лазеров, изготовленных с применением комбинированного МОГФЭ/МПЭ-метода
Папылев Д. С., Новиков И. И., Андрюшкин В. В., Гладышев А. Г., Дюделев В. В., Карачинский Л. Я., Бабичев А. В., Няпшаев И. А., Юнин П. А., Егоров А. Ю., Соколовский Г. С. 233

Оптимизация процесса плазмохимического осаждения пленок нитрида кремния для применения в качестве конденсаторного и пассивационного диэлектрика в силовой и СВЧ-электронике на основе GaN
Гребенников В. А., Желаннов А. В., Казанцева З. С., Кудрявцев А. А. 236

Исследование тонких пленок $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$-Bi/Si, полученных методом импульсного лазерного напыления
Никулин Д. А. 240

Исследование процесса окисления тонких пленок нитрида кремния, нанесенных методом низкотемпературного плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения
Прищепчук Г. А. 242

Исследование влияния лигандной замены на фотофизические характеристики фоторезисторов на основе коллоидных квантовых точек HgTe
Асначёв Д. Д., Хакимов К. Т., Королёва Т. В., Яковлев В. О., Сапцова О. А., Медведев А. Г., Попов В. С. 245

Метод локализации ориентационного выреза полупроводниковой пластины на основе контурного анализа и аппроксимации границы
Данилин К. Д., Семенищев Е. А. 248

МГТУ «СТАНКИН» 248

Исследование зависимости сопротивления проводящих дорожек из наночастиц золота от количества слоев и температурной обработки
Санатулина А. Ф., Шляпин В. М., Лизунова А. А. 250

Изготовление алмазных мембран методом селективного травления с улучшенной однородностью процесса
Погорелов В. А., Голованов А. В., Лупарев Н. В. 253

Исследование особенностей роста $Cd_xHg_{1-x}Te$ на подложках GaAs(001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии с помощью ***in situ*** эллипсометрии
Грекова А. А., Климов Е. А., Виниченко А. Н. 256

Жидкостное травление ITO для прозрачных контактов HD SiPM
Шувалова А. С., Шишкин А. В., Тюлькова А. А., Габидуллин А. Р., Денисов А. А. 258

Разработка многозазорного газоразрядного генератора наночастиц с использованием обводящих ключей для последовательного пробоя межэлектродных промежутков
Шестаков Н. Р., Васильев С. Я., Борисов В. И., Иванов В. В. 261

Создание высококачественных тонких органо-неорганических пленок перовскита для применения в оптоэлектронике
Барнёва С. В., Гец Д. С. 264

Влияние шероховатости поверхности боросиликатного стекла на качество бондирования методом прямого сращивания
Жуков И. А., Фролова А. О., Бикаев Р. И., Кузнецов Е. В. 266

Исследование физико-механических и функциональных характеристик тонких пленок титана, полученных методом магнетронного распыления
Темирова Т. И., Жуков И. А., Юркин Н. О. 268

Оптимизация энергетического спектра ионов в низкоэнергетическом плазменном травлении для микроэлектронных применений
Халилуллин Р. Р., Кузьменко В. О., Мяконьких А. В. 270

СЕКЦИЯ №4 «ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОТОНИКА» 272

Генерация терагерцевого излучения в ван-дер-ваальсовом слоистом сплаве дихалькогенидов переходных металлов
Чиглинцев Э. О., Шевякова К. В., Шуклин Ф. А., Чернов А. И. 272

Радиофотонный генератор перестраиваемого СВЧ-сигнала на основе оптического гетеродинирования DFB-лазеров
Сафина Н. А., Булатов К. М., Зайцев Д. Л., Андреев С. Н., Янченко С. Г. 274

Численное моделирование элементов CWDM-демультиплексора на основе кольцевых резонаторов
Кузнецов И. В., Перин А. С. 276

Электростатический контроль экситонного отклика гетероструктур на основе двумерных полупроводников
Абрамов А. Н., Чиглинцев Э. О., Осколкова Т. О., Бандурин Денис А., Иорш И. В., Чернов А. И., Кравцов В. А. 279

Достижение низкого порога усиленной спонтанной люминесценции в тонких пленках квазидвумерного перовскита
Дыкова А. В., Гец Д. С. 281

Изучение экситонных комплексов в ненапряженных квантовых точках GaAs/AlGaAs
Башегурова Е. А., Капитонов Ю. В. 284

Синтез и фотофизические характеристики ККТ HgSe@CdSe со структурой ядро-оболочка для детектирования в ИК-диапазоне
Чемакина Я. А., Королева Т. В., Хакимов К. Т., Сапцова О. А., Яковлев В. О., Медведев А. Г. Попов В. С. 287

Исследование фотоотклика тонких пленок ККТ HgTe в видимом и инфракрасном диапазонах
Яковлев В. О., Сапцова О. А., Короннов А. А., Королева Т. В., Хакимов К. Т., Медведев А. Г., Попов В. С. 290

Активные устройства ТГц плоской оптики на основе на основе VO_2, $LiNbO_3$ и плазмонных наносистем, способы ***in-situ*** мониторинга их состояния
Кайдашев В. Е., Рогов Ю., Мутаев И., Парочкин А., Кутепов М. Е., Жуков С. С., Очкуров М. В., Карапетьян Г. Я. 293

Моделирование элемента устройства метаповерхности в терагерцевом диапазоне на основе VO2 и LiNbO3
Очкуров М. В., Карапетьян Г. Я., Кайдашев В. Е. 295

Численное моделирование пористой фотонно-кристаллической структуры на основе кремния и оксида алюминия для детектирования газа
Новосёлов А. А., Кузнецов И. В., Перин А. С. 297

Сороковых Д. Е., Габидуллин А. Р. Архипов С. В., Шишкин А. В., Аббасов Т., Желтиков В. А. Москалев Д. Н. Салгаева У. О., Савчук А. А. Орликовский Н. А. Денисов А. А. 301

Автоматизация тестирования фотонных интегральных схем при помощи машинного зрения
Лазарев А. С., Сороковых Д. Е., Орликовский Н. А., Архипов С. В., Савчук А. А., Габидуллин А. Р., Денисов А. А., Рыкованов С. Г. 304

Влияние MMI на спектр AWG демультиплексора с адиабатическим тапером
Соломин А. М., Сапегин А. А., 306

Активный дифференциальный термостабилизатор с кремниевым фотодетектором на глубоких уровнях для фотонных интегральных схем
Князев А. А., Сапегин А. А., Панышев П. А. 310

Оценка влияния технологических особенностей формирования волноводов электронной литографией на параметры интегрально-оптического газового сенсора на основе микрокольцевого резонатора
Митрофанова А. Е., Ромашкин А. В., Светиков В. В., Стахнёв Д. Д. 315

Использование формализма КТП для расчета коэффициентов рассеяния на случайных неоднородностях кремниевых волноводов
Бабичек И. В., Барабаненков М. Ю. 317

Направленный ответвитель на платформе LNOI для поляризационно селективного и поляризационно независимого деления
Пошевкина А. А., Шарапова П. Р. 319

СИПМ-зонд с ГКР-активным слоем на основе системы Mo-Ag для исследования клеток in situ
Кондратьева С. А., Новиков Д. В., Колмогоров В. С., Тарасов А. М., Пархоменко Ю. Н. 322

Анализ характеристик и оптимизация волноводных UTC-фотодетекторов на технологической платформе фосфида индия
Садов Ф. А., Гришаков К. С., Васильевский И. С. 325

СЕКЦИЯ № 5 «НЕЙРОМОРФНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ» 328

Экспериментальное исследование предиктивного анализа сервисного обслуживания промышленных объектов
Голубева И. А., Гагарина Л. Г., Вологжанин Н. А. 328

Адаптивная система управления запасами предприятия на основе цифровых двойников и предиктивной аналитики
Кузнецова Е. С. 330

Моделирование температурного профиля в процессе поверхностного монтажа с использованием гибридной нейронной сети
Кондрашов В. В., Барсукова А. А. 332

Модели машинного обучения для оценки задержек цепей на этапе размещения элементов на ПЛИС
Шокарев Д. Б., Чочаев Р. Ж. 337

Прогнозирование деградации мемристоров в условиях сдвига домена с использованием transfer learning и моделей временных рядов
Алямовская А. А., Мещанинов Ф. П., Жевненко Д. А., Горнев Е. С. 339

Вероятностные вычисления на магнитных туннельных переходах
Киселева К. В., Юрлов В. В., Скирдков П. Н., Кичин Г. А., Антонов В. Н., Звездин К. А. 341

Исследование устойчивости мемристивных структур для нейроморфных вычислений к воздействию протонного и нейтронного излучения с использованием ионов средних энергий
Окулич Е. В., Тетельбаум Д. И., Белов А. И., Гусейнов Д. В., Михайлов А. Н. 344

Формирование дефектов в пленках оксида гафния для мемристорных кроссбар-массивов высокой плотности
Исаев А. Г., Мяконьких А. В., Рогожин А. Е. 347

Электрофизические характеристики мемристорных ячеек памяти на основе ZrO2(Y) в кроссбар-матрицах с цифровой адресацией, сформированных на базе технологии КМОП КНИ 0,35 мкм
Жарков Г. Д., Белов А. И., Королев Л. Я., Тютина Е. Р., Гусев Н. С., Пашенькин И. Ю., Лукоянов В. И., Грязнов Е. Г., Сафонов А. В., Антонов И. Н., Щаников С. А., Михайлов А. Н. 350

Мемристивные нейроны и синапсы на основе структуры $Ag/H_{0,5}Zr_{0,5}O_2$
Жидков Н. С., Зенкевич А. В., Ханас А. Р. 353

От интеркаляции ионов лития к миграции вакансий кислорода в пленках $LiNbO_y$ ($1,5 < y < 3$) в составе нанокомпозитных мемристоров для реализации надежных нейроморфных синапсов в матричном исполнении
Ильясов А. И., Емельянов А. В., Форш П. А., Рыльков В. В., Демин В. А. 356

Мемристоры на основе нанокомпозитов парилен-ZnTe и парилен-CdTe для нейроморфных вычислительных систем
Рябова М. А., Мацукатова А. Н., Емельянов А. В. 359

Влияние деформации изгиба на эффект резистивного переключения в мемристивных структурах на основе парилена с инкапсуляционным слоем
Юкляевских Г. А., Швецов Б. С., Несмелов А. А., Емельянов А. В. 362

Перспективные материалы и особенности электрофизических характеристик мемристорных структур: современные проблемы и пути решения.
Мизгинов Д. С., Тельминов О. А., Горнев Е. С. 365

Нейросетевая мультимодальная система для оценки ориентации и веса объекта в роботизированном захвате
Саира, Капустин В. В. 367

Оптимизация нейросетевого модуля визуального позиционирования для развертывания на бортовых компьютерах мобильных объектов
Кобелев В. А. Тельминов О. А. 371

SpikeRuGPT: русский язык глазами LIF-нейрона и анализ нейроморфной активности
Хакимов А. Т., Батуев Б. Б. 373

Параллельный набор предложений на русском языке с аннотированными грамматическими исправлениями для обучения и тестирования LLM
Плесовских А. Е., Голуб В. В., Щагин Д. Ю., Мустафина Э. Р., Романов А. Ю. 375

Разработка архитектуры для on-chip обучения спайковой нейронной сети на основе мемристоров
Трунов К. Б., Зенкевич А. В., Ханас А. Р. 380

Анализ влияния точности реализации матричных умножений при моделировании вычислительной системы на инференс и обучение нейросетей
Глаз Р., Крюков П. И. 382

Фоточувствительные мемристоры на основе композитного материала из поли-***n***-ксилилена и полупроводниковых частиц
Трофимов А. Д., Емельянов А. В., Мацукатова А. Н., Несмелов А. А. 385

Детектирование аномалий в работе производственного оборудования
Шмаков В. Е., Мещанинов Ф. П., Жевненко Д. А., Горнев Е. С. 388

Анализ карты признаков YOLOv8 при детекции мелких деталей в системе визуального контроля
Мурин Я. С. 391

Разработка архитектуры синхронной бинарной двунаправленной ассоциативной памяти для распознавания образов в мультиагентных нейроморфных системах
Макаров И. И., Тельминов О. А. 393

Повышение производительности разработки датасетов обучения и валидации моделей детекции объектов на видео для создания безопасной городской среды
Убушаева Я. А. 395

Разработка функциональных блоков мемристорных массивов для САПР биоморфного нейропроцессора
Николаева Е. А., Писарев А. Д. 397

Термическая стабильность мемристивных структур М/НК/Д1/Д2/М
Шакуров А. Р.,Ситников А. В., Бабкина И. В., Никонов А. Е. 400

Сегментация и классификация дефектов на кремниевых пластинах с использованием глубокого обучения
Титов А. Е., Жевненко Д. А., Мещанинов Ф. П. 402

Применение semi-supervised learning на базе Tiny Vision Transformer для классификации дефектов на полупроводниковых пластинах
Помазков М. А., Мещанинов Ф. П., Жевненко Д. А., Горнев Е. С. 405

СЕКЦИЯ № 6 «ПРОЦЕССОРНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ, ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И СИСТЕМНОЕ ПО» 407

Ускорение моделирования производительности вычислительных систем с сохранением точности
Шибина П. С., Королев К. А. 407

Портирование RISC-V микроконтроллеров в операционную систему RIOT
Дубленский Д. С., Сатина А. П., Подшивалов А. А., Попов Д. А., Семион А. А. 411

Высокотоковый электронный регулятор на базе RISC-V микроконтроллера МИК32 Амур
Шилов Л. Б., Торопов П. М., Логинов Г. Р., Тютин В. А. 414

Добавление поддержки атомарных инструкций в RISC-V GPGPU Vortex
Шаехмитов Ш. Р. 416

Исследование влияния блока предсказания переходов на производительность современных процессоров
Панченко Д. В. 419

Реализация и сравнение различных видов BPU для микроконтроллера на архитектуре RISC-V
Матвиенко М. К., Уткин С. Ф. 421

Исследование оптимальной архитектуры систолического массива с возможностью восстановления его работоспособности в онлайн-режиме
Острый А. В., Парсегова В. С. 423

Автоматическая генерация универсальных декодеров RISC-V ISA на основе Unified Database
Челомов С. Н., Крюков П. И. 425

Инструмент Amphimixis для оценки готовности проектов к миграции на RISC-V с использованием LLM-агентов
Ададина Ю. В., Бзычкин Е. М., Бордуков Д. А., Мишин М. О., Новик М. А., Чурикова В. С., Смирнов К. К. 427

Построение проверяемой bootstrap-цепочки для архитектуры RISC-V
Пивкин Ю. В., Смолин Д. Л., Токарев М. Р., Тумилевич В. А. 429

Масштабируемый учебно-исследовательский стенд удаленного доступа для исследования защищенного шлюза CAN FD-Ethernet на базе архитектуры RISC-V и потоковой передачи телеметрии
Везелев М. В., Романова И. И. 431

Особенности разработки и функционирования связующего программного обеспечения для программно-аппаратной платформы «Эльбрус»
Суминов К. А. 434

Развитие реконфигурируемого программно-аппаратного комплекса для работы с отладочными платами
Фролов К. Д., Мирошниченко Л. И., Американов А. А. 437

Оптимальные подходы к имплементации алгоритма шумоподавления изображений Non-Local Means на ПЛИС
Вологин В. В., Зарипов Р. А. 439

Исследование путей развития предвыборщика BERTI
Диденко И. А. 443

Современные подходы к обеспечению надежности архитектуры комплексных систем
Дьяков Л. И. 445

Реализация алгоритма Борувки поиска минимального остовного дерева, с использованием библиотеки Spla
Угарова П. П., Кутуев В. А. 447

Оптимизация произведения Кронекера для библиотеки SuiteSparse:GraphBLAS
Арзамасцева Е. А., Кутуев В. А. 449

Веб-интегрированная среда разработки LABCDE для автоматизированной проверки лабораторных работ по программированию
Остроушко М. В., Романова И. И. Американов А. А. 452

Разработка легковесных арбитров на основе характеристик пакетов сетей на кристалле
Маликов М. А., Романов А. Ю. 454

СЕКЦИЯ № 7 «СВЧ И СИЛОВЫЕ ПРИБОРЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ» 457

Композитные теплораспределяющие элементы и искусственные подложки на основе алмаза. Обзор
Козлов В. А. 457

Исследование тепловых и электрических характеристик СВЧ-усилителя мощности в корпусе QFN
Шеденко В. В., Увайсов С. У. 460

Модель порогового напряжения силового МДП-транзистора щелевого типа на основе GaN
Беляев А. О., Баранов Г. В., Дорофеев А. А., Леоненков Е. И., Емельяненко Ю. А. 462

Исследование и сравнительный анализ с применением TCAD-моделей конструктивно-технологических решений для формирования активной области IGBT
Абрашин П. С. 466

Исследование влияния технологических операций имплантации на характеристики СВЧ КНИ МОП транзистора с использованием приборно-технологического моделирования
Щербинин Ф. С. 468

Оптимизация конструкции элементов интегральной схемы двухтранзисторного прямоходового преобразователя на основе нитрида галлия с использованием компьютерного моделирования
Курбанбаева Д. М. 470

Профилированный Si(100) для инженерии AlN/Si-гетероструктур в нитридной микроэлектронике: ориентационный отбор и локальная релаксация напряжений
Керсновский Е. С., Голощапов Д. Л., Буйлов Н. С., Шарофидинов Ш. Ш., Мизеров А. М., Середин П. В. 472

Гибридный MOCVD/PA MBE маршрут AlGaN/GaN HEMT-гетероструктур: выбор темплейта для СВЧ-микроэлектроники и кремниевой интеграции
Буйлов Н. С., Голощапов Д. Л., Мизеров А. М., Керсновский Е. С., Никитина Е. В., Тимошнев С. Н., Середин П. В. 474

Исследование влияния топологической конфигурации на характеристики GaN HEMT-транзисторов на подложках SiC
Гуртовая А. Р., Гусев А. С., Кузнецов А. Л., Цунваза Д. М., Захарченко Р. В. 476

Исследование характеристик межсоединений и разработка тестового модуля для диагностики и устранения дефектов технологического маршрута GaN/SiC МИС СВЧ
Дейнеко С. С., Сигловая Н. В., Кузнецов А. Л., Цунваза Д. М., Захарченко Р. В. 481

Исследование интегрированных элементов защиты от электростатических разрядов в кремниевом интерпозере
Емельяненко Ю. А., Россов А. С., Баранов Г. В., Лукянчиков М. В., Панасенко П. В. 487

Внутрикристальная компенсация паразитных эффектов Flip-Chip монтажа для кремниевых СВЧ ИС
Вязенцев Я. А., Баранов Г. В., Гусев С. С. 489

Проектирование интегральной 3D катушки индуктивности в TGV интерпозере
Березин В. Ю., Россов А. С., Баранов Г. В. 492

Синтез и анализ щелевых линий передачи в многослойных планарных структурах
Бурлаков К., Шабунин С. Н., Гафуривайган М., Сидибе Ф. М. 494

Проектирование полосовых фильтров на прямоугольных волноводных резонаторах
Крашенинникова Е. А. 497

Результаты экспериментального исследования интегральных 6-разрядных аттенюатора и фазовращателя X-диапазона частот
Кулиш А. М., Лосев В. В. 499

Перестраиваемый балансный усилитель мощности с модуляцией нагрузки для стандартов 4G LTE/5G
Вдовичева И. А., Туральчук П. А. 501

Исследование способов построения СВЧ-устройства с преобразованием частоты на одном кристалле для применения в программно-определяемом радио
Сердюков В. В., Голан А. В. Коротков К. С. 504

Метод определения комплексных коэффициентов передачи СВЧ-устройств с преобразованием частоты
Голан А. В., Сердюков В. В. Коротков К. С. 506

Антенная система для определения местоположения источника излучения
Степанова Т. А., Голан А. В., Сердюков В. В. 508

Применение эффекта замедленной волны для одновременного подавления взаимной связи и увеличения добротности в терагерцевой биосенсорике
Гафуривайган М., Шабунин С. Н., Бурлаков К., Сидибе Ф. М. 510

Методика исследования физических свойств магнитных материалов на СВЧ частотах
Гимазов И. И., Хамидуллин И. Н., Грабой И. Э., Маркелова М. Н., Кауль А. Р. 513

СЕКЦИЯ № 8 «КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» 515

Сравнительный анализ методов квантовой томографии процессов и томографии набора гейтов для реконструкции двухкубитных гейтов в условиях шумов
Дмитриев И. А., Бантыш Б. И., Богданов Ю. И., Лукичев В. Ф. 515

Селективная калибровка параметров квантового фотонного чипа с использованием производящих функций
Кокшаров К. Б., Дмитриев И. А., Богданова Н. А., Богданов Ю. И., Лукичев В. Ф. 517

Исследование алгоритма квантовой телепортации с учетом влияния шумов
Голышев И. К., Богданов Ю. И. 519

Golyshev I. K., Bogdanov Yu. I., Sc.D 519

Повышение вероятности линейно-оптических операций слияния типа I с помощью одиночных фотонов
Мелкозеров А. А., Страупе С. С., Сайгин М. Ю. 521

Криогенная поверхностная ловушка для масштабируемых квантовых вычислений на ионах кальция
Подлесный А. С., Кадыков А. О., Чуев А. П., Прозоровская А. А., Батуро В. В., Лахманский К. Е., Ph.D 524

Оценка точности многокубитных вентилей методом ХЕВ с однокубитными референсными последовательностями
Зотова А. В., Симаков И. А., Мажорин Г. С. 528

Программирование универсального интегрально-оптического шестиканального интерферометра для классических и квантовых приложений
Урусова К. Н., Кондратьев И. В., Аргенчиев А. С., Бирюков Ю. А., Скрябин Н. Н., Дьяконов И. В., Страупе С. С., Кулик С. П. 530

Оценка управления ядерным спином в системах NV-13C с помощью СВЧ-поля
Косогорова Т. А., Гусев А. С., Салказанов А. Т., Калошин М. М. 533

Влияние квантовых флуктуаций на передачу информации с помощью спиновых волн
Борисов П. С. 537

Исследование ресурсоемкости криптографии на эллиптических кривых
Кузнецов Ю. А., Богданов Ю. И. 539

СЕКЦИЯ № 9 «ФИЗИКА МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ ПРИБОРОВ» 541

Лавинные фотодиоды на основе InGaAs/InP для однофотонных детекторов спектрального диапазона 1550 нм
Копытов П. Е., Блохин С. А., Папылев Д. С., Левин Р. В., Андрюшкин В. В., Ковач Я. Н., Малеев Н. А., Баранов А. И., Никитина Е. В., Андреев А. Ю., Ярощкая И. В., Мармалюк А. А., Ладугин М. А., Воропаев К. О., Цацульников А. Ф., Новиков И. И., Карачинский Л. Я. 541

Управление сверхпроводящим током в тонкопленочных гетероструктурах на базе сверхпроводник/ферромагнетик
Камашев А. А., Гарифьянов Н. Н., Валидов А. А., Арбузов Д. А., Катаев В. Е., Осин А. С., Фоминов Я. В., Гарифуллин И. А. 544

СВЧ акустоэлектронные сенсоры на алмазной подложке для исследования тонких пленок, жидкостей и суспензий
Яшин Д. В., Сорокин Б. П. 546

Исследование процессов дрейфа и диффузии в RRAM на основе оксидов металлов
Федотов М. И., Ванькаев А. С., Ковешников С. В. 549

Исследование температурной чувствительности обратных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах
Дацук Е. Р., Смирнов А. В., Кузнецова И. Е. 553

Усиление комбинационного рассеяния тонкими пленками Ag, Al, Fe, Ni, Ti
Шестопалова М. С., Иванов А. В., Сарычев А. К., Быков И. В., Афанасьев К. Н., Олейников В. А., Мочалов К. Е. 556

Джозефсоновский магнитный туннельный контакт, как квантовый сенсор магнитного поля
Юрлов В. В., Лобкова М. Д., Скирдков П. Н., Звездин К. А. 558

Тонкие ферромагнитные пленки вида CoPd/Al2O3/CoPd для применения в магнитной памяти
Здоровейщев Д. А., Здоровейщев А. В., Дорохин М. В. 560

Исследование угла спинового эффекта Холла топологических материалов методом ST-FMR
Силина С. К., Базров М. А., Шестопалов Р. А., Кузнецова М. А., Козлов А. Г. 563

Изменение свойств материалов на основе твердых растворов **β**-(InxGa1−x)2O3 и **β**-(AlxGa1−x)2O3 при вариации концентрации легирующей примеси: расчет из первых принципов
Тютина Е. Р., Рожков А. В., Королев Д. С. 566

Фотомемристивный эффект резистивного переключения в пленках фталоцианина кобальта и его фторированных производных
Клюкина Е. В., Федотов М. И., Клямер Д. Д., Басова Т. В., Ковешников С. В. 568

Перенос заряда и электрический пробой в пленках нитрида кремния структур Al/Si3N4/***n***-Si
Ермакова Е. А., Горбачук Н. И., Поклонский Н. А., Шпаковский С. В., Кисель А. Д. 570

Оптические микрорезонаторы на основе гетероструктур GaP на кремнии
Дворецкая Л. Н., Волосатова В. В., Можаров А. М., Вячеславова Е. А., Минив Д. В., Скороходов А. А., Кавеев А. К., Фёдоров В. В., Макаров С. В., Мухин И. С. 573

Генерация спиновой накачки в металлических системах Co/FeMn/Pt
Богданова Т. В., Федоров А. С., Сафонов С. С., Федорова А. А., Шайхулов Т. А., Калябин Д. В., Никитов С. А. 576

Магнитоэлектрические эффекты в туннельных магнитных контактах CoFeB/MgO/CoFeB
Пашенькин И. Ю., Сапожников М. В., Карашитин Е. А., Фраерман А. А., Скороходов Е. В., Гусев Н. С., Федотов И. А. 579

Анализ методов формирования низкоомных слоев кремния p-типа для pin-диодов СВЧ-диапазона
Халимова К. А. 583

Пахомов А. С., Бахметьев М. В., Чернов А. И. 585

Двунаправленный калориметрический датчик скорости потока газа на основе технологии МЭМС
Стекольщиков Е. В., Лях М. А., Уваров И. В. 587

Исследование факторов влияющих на подвижность зарядов полупроводниковых материалов в печатной электронике
Ульянова М. И., Резник А. Ю., Тельминов О. А., Воронова Н. В., Жабин С. Н. Винник Д. А. 590

Квазистационарные C–V измерения MOS-структур: выбор режима и параметров
Логвинов С. В., Аксенов А. В., Чуканов И. С., Метревели А. А. 594

Исследование физических механизмов гистерезиса в тонкопленочных транзисторах на основе IGZO
Нечаева Д. А., Резник А. Ю., Жабин С. Н. Тельминов О. А., Воронова Н. В. Винник Д. А. 596

Непрерывный спектр углеродных наночастиц как индикатор газовой температуры в плазмохимическом синтезе алмазных пленок
Кириллов Е. А., Минаков П. В., Лопаев Д. В., Рахимов А. Т. 600

Влияние локальных дефектов на темновые токи и шумы кремниевых фотодиодов
Попов К. А., Демидов С. С., Климанов Е. А., Конорев Д. С., Макарова Э. А., Молчанов Д. С., Полунеев В. В. 603

Разработка комбинированного метода на основе акустических и электрохимических подходов для исследования параметров электролита в свинцово-кислотных батарея, изменяющихся в процессе заряда/разряда
Шамсутдинова Е. С., Иванова Е. С. 606

Выделение вкладов сверхбыстрого размагничивания и спин-зарядовой конверсии в генерацию ТГц-излучения в структурах Co/CoxOx
Кузнецов К. Г., Горбатова А. В., Буряков А. М., Гусев Н. С., Сапожников М. В. 609

Кремниевый детектор с тонким входным окном для регистрации альфа-частиц
Григорьева Т. В., Петушков В. Л., Голубков С. А. 611

Определение кислотности вина на основе полевых транзисторов с каналом из 2D материалов
Телелюхин К. С. 613

Исследование путей релаксации электронов в графене под воздействием субтерагерцевого излучения методом шумовой термометрии
Измайлов Р. И., Шеин К. В., Титченко А. Н., Гайдученко И. А., Гольцман Г. Н. 616

Исследование процессов накопления и релаксации радиационно-индуцированного заряда в слоях диоксида кремния при воздействии импульсного ионизирующего излучения
Земцов А. Э., Петров А. С., Таперо К. И. 618

Аналитические исследования процесса электроформовки элемента хранения ReRAM на основе HfO_2
Паймурзин Д. М., Гришин Т. С., Горячев А. В., Теплов Г. С., Рудаков Г. А., Дудин А. А., Скоморохов Д. В., Матвеева А. С., Матвеев Н. Н. 622

Коллективные моды в структурах тяжелый металл — массив наноточек ферромагнетика и потенциальные устройства
Киктева В. Р., Пахомов А. С., Кичин Г. А. Скирдков П. Н., Звездин К. А. 627

Разработка автоэмиссионного источника электронов для приборов СВЧ диапазона
Ковалец А. И., Евсиков И. Д., Демин Г. Д., Путря М. Г. 630

СЕКЦИЯ № 10 «БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА» 632

Формирование трехмерных архитектур на основе углеродных наноматериалов для гибких датчиков давления
Демирская Е. А., Морозова А. С., Герасименко А. Ю. 632

Исследование ***in situ*** формирования электропроводящих конструкций на основе слоев углеродных нанотрубок для восстановления нейронной проводимости
Иванова А. С., Сучкова В. В., Герасименко А. Ю. 635

Лазер-индуцированная карбонизация нейроинтерфейсов из титана
Кузнецова Е. А., Ефремова К. Д., Герасименко А. Ю. 639

Биомиметические электропроводящие композиты для имплантируемых нейроэлектродов
Оцупко Е. П., Савельев М. С., Герасименко А. Ю. 641

Применение порождающих моделей для восстановления высокоплотного сигнала электромиограммы по малоканальным данным
Пустовит Г. М., Гончарова А. В. 643

Разработка адаптивного алгоритма классификации жестов по ЭМГ-сигналам с управляемым компромиссом между задержкой и точностью
Павлова Т. Д., Гончарова А. В. 646

Математическое моделирование контринсулярных механизмов для разработки алгоритмов управления мультигормональными биомедицинскими системами терапии сахарного диабета 1-го типа
Струкова Э. И., Пожар К. В. 649

Адаптация нейросетевой архитектуры для выявления стенозов коронарных артерий на статических ангиографических данных
Костышина А. О., Гончарова А. В. 651

Повышение точности непрерывного мониторинга глюкозы методом взаимокоррекции данных сенсора и цифрового двойника на основе фильтра Калмана
Чупраков Д. А., Пожар К. В. 654

Разработка гибридного тактильного модуля для очувствления бионических протезов верхних конечностей
Бумагин П. В., Гончарова А. В. 656

Неинвазивные сенсорные структуры на основе графеновых материалов для устройств «лаборатория на коже»
Иванов А. И., Бузмакова А. А., Пулик А. Д., Антонова И. В. 659

Сравнение и улучшение нейросетевых моделей для анализа пульсовой волны человека на основе видеоплетизмографии и применение их в режиме реального времени
Алябушев П. А., Гончарова А. В. 661

Сравнительный анализ функционализации углеродных нанотрубок n-бутил- и аминофенилбороновой кислотой в контексте создания рецепторного слоя для HbA1c-сенсора.
Едельбекова П. А. Шаман Ю. П. Герасименко А. Ю., Павлов А. А. 664

Подход к проектированию сверхчувствительных спинтронных биосенсоров для миомагнитографии, работающих в неэкранированной среде
Лобкова М. Д., Скирдков П. Н., Звездин К. А. 666

Разработка чувствительных биосенсоров на основе плазмонных наноструктур для регистрации оптических сигналов биомолекул
Шайхтдинова А. Р., Лизунова А. А., Жуков С. С., Жукова Е. С., Горшунов Б. П., Охрименко И. С., Долгов В. А., Мусаев А. Г., Костина Д. Е., Санатулина А. Ф., Иванов В. В. 668

Формирование функциональных слоев нейроинтерфейсов на основе углеродных наноматериалов для создания имплантируемых электродов, стимулирующих нервные ткани
Мурашко Д. Т., Ефремова К. Д., Путря Б. М., Еганова Е. М., Герасименко А. Ю. 671

Лазерная абляция и биополимерные покрытия как способы улучшения электрических свойств и биосовместимости имплантируемых металлических электродов
Круковский Н. С., Савельев М. С., Мурашко Д. Т., Герасименко А. Ю. 674

Разработка многоканальной системы регистрации электромиограммы для адаптивного протезирования верхних конечностей
Брилева С. С. 676

Brileva S. S. 676

Разработка сфигморитмографа для количественного определения аритмии
Кузнецова А. В., Проскурин С. Г. 679

Повышение эффективности человеко-машинного интерфейса для управления высокофункциональным протезом верхней конечности для сокращения времени на обучение пользованию
Елисеичев Е. А., Юдин А. В., Воробьев П. С., Панкратов М. В. 681

Модульный прототип усилителя напряжения для экспериментального анализа качества и стабильности регистрации биопотенциалов
Козырев Г. В., Ефремова К. Д. 684

Лазерно-индуцированная модификация функциональных характеристик композитных материалов для электродных интерфейсов
Морозова А. С., Куксин А. В., Герасименко А. Ю. 686

СЕКЦИЯ № 11 «ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ, ВСТРАИВАЕМЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ И КОНЕЧНЫХ УСТРОЙСТВ» 689

Исследование влияния аппаратной временной рандомизации на информативность канала энергопотребления различных микроархитектур криптографического алгоритма AES
Алексеев В. Д., Тишин А. С., Михайлов В. Ю. 689

Разработка микросхемы датчика углового положения рулевого вала автомобиля
Лоос В. В. 692

Схемотехнические и алгоритмические методы снижения энергопотребления и площади 12-битного АЦП последовательного приближения
Цепилова А. 694

Исследование и разработка автоматизированного маршрута проектирования IBIS-моделей интерфейсных модулей СБИС для отечественных полупроводниковых технологий с проектными нормами 250–180 нм
Ильин С. А., Кобышев А. Е., Ласточкин О. В. 697

Разработка программы для характеризации интегральных цифровых ячеек для кремниевой компиляции
Румянцев М. С., Зверев А. В. 700

Общие принципы построения триггеров на основе методологии SRPG для уменьшения потребляемой мощности СБИС на примере отечественной полупроводниковой технологии КМОП 90 нм
Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., Харламова М. В. 705

Методика комплексной валидации PDK в маршруте автоматизированного проектирования цифровых СБИС
Насибуллин К. М., Загидуллина О. Р., Надин А. С. 707

Разработка и внедрение алгоритма контроля неподключенных затворов транзисторов на этапе физической верификации топологии СБИС
Сотсков А. С., Милютин С. В., Надин А. С. 709

Разработка физически неклонируемой функции с контролируемым преобразованием пространства запросов
Коротаев Ю. А., Певцов Е. Ф. 711

Разработка сложнофункционального блока асинхронного АЦП последовательного приближения
Матвеев А. В. 714

Анализ эффективности Cell-Aware Test для детектирования дефектов в СнК в сравнении с традиционными методами (Scan, LBIST)
Лобачева К. С., Парсегова В. С. 717

Разработка высоковольтной библиотеки стандартных цифровых элементов для проектирования микроконтроллеров со сверхнизким энергопотреблением
Ермаков И. В., Исаченко Д. А., Алферов В. А., Михеев А. Д., Макеев Г. А., Демин К. П. 720

Сложнофункциональный блок источника опорных напряжения и тока типа bandgap в технологии 65 нм
Головин И. О., Громов И. С., Ямалиев С. И., Лобанков Д. С. 722

Система формирования опорных токов и напряжений на базе 10-битных ЦАП для многоканальных микросхем считывания
Двинских П. Д., Норманов Д. Д., Аткин Э. В. 724

Разработка и оптимизация дискриминатора для многопороговых гибридных пиксельных детекторов в 65 нм КМОП
Лобанков Д. С., Ямалиев С. И., Аткин Э. В., Головин И. О., Громов И. С. 729

Разработка тестового кристалла ReRAM
Ермаков И. В., Демин К. П., Исаченко Д. А. 731

Разработка интегральной микросхемы системы управления фрезерным ЧПУ станком по КМОП-технологии
Алаторцев С. К., Сердюков В. В. 734

Разработка линтера Verihogg для языка SystemVerilog
Парфенов А. В., Самодуров Н. С., Меделян А. В., Лемехов Д. Ю. 737

Метод целенаправленного проектирования преобразователя напряжения
Коробок М. А., Прищепа Н. И., Львов Б. Г. 739

Разработка повышающего DC-DC преобразователя на основе массива зарядового насоса по отечественной КМОП-технологии 130 нм
Калёнов А. Д., Мусихина Е. М. 742

Проектирование интерфейсной части 8-канального нейростимулятора на базе отечественной КМОП-технологии
Янова П. А., Калёнов А. Д. 744

Реализация алгоритма пассивного автофокуса на ПЛИС с использованием диагонального лапласиана LAPD и аппроксимационных кривых
Василевский В. А., Зарипов Р. А. 746

Программно-аппаратный комплекс для тестирования алгоритмов систем контроля и управления аккумуляторными батареями в реальных условиях
Мацкевич А. А., Лисновецкий Д., Гречко Е. А., Гребцов Д. К., Дружинин А. А. 749

Принципы построения пиксельной считывающей электроники для детекторов прямого преобразования в технологии КМОП GP 65 нм
Ямалиев С. И., Лобанков Д. С., Аткин Э. В. 752

Калибровочная система для интегральных схем матричных приемников высокого разрешения
Громов И. С., Лобанков Д. С., Ямалиев С. И., Головин И. О., Аткин Э. В. 754

Разработка полностью цифрового блока POR
Коваленко Н. О. 758

СЕКЦИЯ № 12 «РАДИОТЕХНИКА И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» 761

Сравнительный анализ эффективности методов верификации периферийных интерфейсов микроконтроллера на основе унифицированного блока верификации и прямых тестовых воздействий
Сапрыкина В. С., Нефедов Д. А. 761

Способ сжатия сигналов с аналого-информационным преобразователем
Карпов В. Н. 763

Многозонные активно-импульсные телевизионные измерительные системы для построения 3D рельефов наблюдаемых объектов
Капустин В. В., Захлебин А. С. 765

Двухдиапазонный антенный элемент S-диапазона для систем связи прямого спутникового доступа
Костелецкий В. П. 770

Компенсация нелинейных искажений в одноразрядной управляемой проходной фазированной антенной решетке С-диапазона
Григорьев И. В., Туральчук П. А. 772

Оптимизация вычисления ковариационной матрицы для адаптивных цифровых антенных решеток на ПЛИС
Калеев Д. В., Туринцев К. А. 774

Исследование возможности использования компараторов в MIMO РЛС
Съедин Е. М. 776

Система грубого наведения прототипа наземного оптического терминала для лазерной связи в канале «Земля — высотная платформа»
Тюрников А. Ю., Гарифханов И. Т., Пономарев К. С., Кожанов И. А., Стрижак Д. В. Булатов К. М., Сафина Н. А., Алиев А., Зайцев Д. Л. 778

Применение адаптивной оптики для коррекции атмосферных искажений в лазерном канале связи прототипа наземного терминала лазерной связи «Земля — высотная платформа»
Гарифханов И. Т., Пономарев К. С., Тюрников А. Ю., Кожанов И., Стрижак Д. В. Булатов К. М., Сафина Н. А., Алиев А. Зайцев Д. Л. 781

Реализация высокоскоростного модема наземного терминала оптической связи на ПЛИС с исследованием эффективности кодов коррекции ошибок в атмосферном канале.
Кожанов И. А., Гарифханов И. Т., Пономарев К. С., Тюрников А. Ю., Стрижак Д. В. Булатов К. М., Сафина Н. А., Алиев А. Э. Зайцев Д. Л. 784

Разработка программно-аппаратного комплекса для генерации сигналов глобальной спутниковой системы навигации
Авдеев Е. А., Сердюков В. В. 786

Разработка системы для идентификации подвижных объектов по технологии КМОП System on Chip
Михалева З. В., Сердюков В. В. 789

Изучение и модульное создание программно-определяемого радио на базе ПЛИС и АЦП с использованием цифрового смесителя
Литвиненко Т. И., Сердюков В. В., Голан А. В. 793

Разработка интегральной микросхемы аналого-цифрового преобразователя программно-определяемого радио
Касьянова К. Д., Сердюков В. В. Коротков К. С. 795

Автономное навигационное устройство на основе кластера MEMS-датчиков и гетерогенного нейроморфного наблюдателя системы
Кузнецов М. А. 799

Адаптивный скалярный алгоритм оценивания для коррекции инерциальных навигационных систем на микромеханических датчиках
Суркова А. Д. 802

Разработка и исследование газового сенсора на основе волн в пластинах с полимерным чувствительным покрытием
Иванова Е. С., Смирнов А. В. 805

Исследование ресурсоемкости и быстродействия вариантов согласованного фильтра для систем связи с расширением спектра методом прямой последовательности
Аришин И. В. 808

СЕКЦИЯ № 13 «МАТЕРИАЛЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ» 810

Фоторезисты на основе металлоорганических и координационных соединений металлов для EB- и EUV-литографии
Кискин М. А. 810

Формирование и применение композиционных метаструктур на основе пористого анодного оксида алюминия
Муратова Е. Н. 812

Новые результаты в области исследования боратов переходных металлов с настраиваемыми свойствами для применений в прецизионной оптике и спинтронике
Бирюков Я. П., Шаблинский А. П., Авдонцева М. С., Кржижановская М. Г. Бубнова Р. С., Филатов С. К. 815

Оптические спектры коллективных возбужденных состояний в поверхностно-легированных коллоидных нанокристаллах CdS
Реакторный синтез перспективных норборненсодержащих ФГК для DUV-литографии в микроэлектронике
Заморецков Д. С., Малков Г. В., Баймуратова Р. К., Аккуратов А. В. 820

Оптимизация синтеза и методов очистки норборнансодержащего мономера для фотолитографических полимеров
Смирнов А. С., Заправдина Д. М., Сидельцев М. Е., Кузнецов И. Е., Аккуратов А. В. 822

Влияние природы растворителя на спектральные свойства тонких пленок квантовых точек HgSe
Королева Т. В., Медведев А. Г., Попов В. С. 824

Молекулярно-динамическое моделирование внедрения ионов Ar при распылении плавленого кварца
Назаров А. А., Юнин П. А., Михайленко М. С., Пестов А. Е. 826

Моделирование динамики свойств гибридных органосиликатных low-κ диэлектриков с бензольными мостиковыми группами
Кадыров А. Д., Резник А. А., Резванов А. А. 829

Получение двумерных материалов на основе фталоцианинов с различной проводимостью
Рыжкова Г. Г., Курочкин И. Ю., Руднева Т. Н., Корепанов В. И. 831

Разработка и исследование керамического композита на основе SiOC армированного гексагональным нитридом бора
Русинов П. О., Тюрина С. А., Дальская Г. Ю., Гуминская Ж. А., Гусевская Д. Ю. 833

Разработка и исследование новых полупроводниковых термоэлектрических материалов HfZrCoSb легированных Nb полученных плазменным искровым спеканием
Русинов П. О., Тюрина С. А., Дальская Г. Ю., Гуминская Ж. А., Гусевская Д. Ю. 836

Разработка новых толстослойных негативных резистов
Букреева К. С., Курбатов В. Г. 838

Функционализация трисульфида титана благородными металлами для разработки высокоэффективных гибких фотодетекторов
Рымжина А. Р., Ибрахим А. М. К. Ф. А., Ph.D Шарма Прачи Козлова И. Н. Платонов В. И., Павельев В. С., Ph.D Трипати Нишант 840

III-N наноструктуры на h-BN: особенности роста и физические свойства
Даутов А. М.⁻, Алексеев П. А., Попов М. Е. Котляр К. П.⁻, Лендяшова В. В., Мельниченко И. А., Шугабаев Т., Дубровский В. Г., Цырлин Г. Э.⁻ Гридчин В. О.⁻ 842

Микротоннажный синтез 1-этилциклопентил метакрилата для полимерной основы фоторезиста
Муминов Р. Ш., Заморецков Д. С., Аккуратов А. В. 845

Контролируемые фото- и термоиндуцированные сдвиги края поглощения в гибких нанокомпозитных пленках As2S3-Au
Зедоми Т. Э., Котова Л. В., Бурункова Ю. Э., Тарасов В. Е., Кочерешко В. П. 846

Концепция молекулярного дизайна люминофоров с инвертированной синглет-триплетной щелью для высокоэффективных OLED
Хитров М. Д. Лупоносов Ю. Н. 849

Получение суспензий на основе диоксида кремния для химико-механической планаризации барьерного слоя
Давыдова Е. С., Берестенко В. И., Лысков Н. В., Курбатов В. Е. 851

Определение пористости поликристаллических наноразмерных слоев фотошаблонной заготовки на основе цифровой обработки электронно-микроскопических изображений
Решетняк А. Р., Волков Р. Л., Подорожний О. В., Боргардт Н. И. 853

Разработка материалов с якорной группой для пассивации дефектов межфазных слоев перовскитных солнечных элементов.
Сухорукова П. К., Лучников Л. О., Ильичева Е. А., Саранин Д. С., Лупоносов Ю. Н. 856

Синтез и исследование поверхностно-активного вещества для безметального проявителя
Огаркова И. В., Тарасов А. Е., Курбатов В. Г., Пугачева Т. А., Варламов Д. А., Сенченко Н. С., Бадамшина Э. Р. 859

Угловая зависимость как инструмент дизайна наноструктурированной поверхности Si при облучении C60
Карасев К. П., Стрижкин Д. А. Карасев П. А. 862

Коллоидные нанокристаллы для устройств оптоэлектроники и фотоники
Ушакова Е. В., Черевков С. А., Литвин А. П., Тимкина Ю. А., Ведерникова А. А., Клименко Д. И., Митрошин А. М. 864

Влияние типа электролита на структуру и шероховатость золотых покрытий на подложках GaAs/TiAu
Вайсбеккер М. С., Логинов Б. А., Терехова А. С., Шупенев А. А. 866

Разработка измерительной оснастки для контроля электропроводности суспензий углеродных нанотрубок в фотополимерной смоле
Крюков М. Д., Буренков Н. С., Демин В. Л., Тюрина С. А. 869

Перспективы использования алмазов с NV-дефектами в качестве матриц самосветящихся материалов
Гусев Г. А., Бураков Б. Е. Кравец В. А. Орехова К. Н., Токарев М. В., Дементьева Е. В., Дементьев П. А., Заморянская М. В. 873

Исследование продуктов горения многослойных термитных структур Al/CuO с внедренным слоем Ag для применения в спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света
Новосельцев А. И., Кружалина М. Д., Новиков Д. В., Дубков С. В., Лебедев Е. А. 875

Новые материалы для финишной очистки технологических газов в микроэлектронике
Черепанов Д. С., Сажнев С. В., Попенко В. Ф., Дубков С. В., Воловликова О. В., Василевская Ю. О. 878

Исследование влияния обработки электромагнитным излучением ГКР-подложек на основе системы Mo-Ag
Тарасов А. М., Гаврилов С. А., Дубков С. В., Кондратьева С. А., Байгузина А. Г., Громов Д. Г. 880

Производные триазатруксена для устройств гибридной электроники: дырочно-транспортные слои в перовскитных фотопреобразователях
Пушкарева Е. А., Аккуратов А. В. 883

Формирование пленок восстановленного оксида графена на ПЭТ подложках для устройств гибкой электроники
Раянова К. А., Бабенко С. И., Брылева А. С., Канаев К. В., Рыкунова А. О., Сталева С. Д., Хлопотова А. С., Чугайнова В. А., Комаров И. А. 885

Свойства ультратонкого подзатворного диэлектрика, сформированного методом двухстадийного радикального окисления
Филалова Э. М., Черняев М. В., Горохов С. А., Патюков С. И., Резванов А. А. 890

СЕКЦИЯ № 14 «МОЛОДЕЖНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ В ОБЛАСТИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ» 894

Технологии микротоннажного производства компонентов DUV-фоторезистов на базе ФИЦ ПХФ и МХ РАН
Муминов Р. Ш., Смирнов А. С., Заправдина Д. М., Заморецков Д. С., Сидельцев М. Е., Иваненко Д. А., Скорлуханова А. В., Терещенко М. Д., Кузнецов И. Е., Аккуратов А. В. 894

Учет неоднородности электрического поля в приборно-технологическом моделировании структур с заглубленными шинами питания для КМОП-технологии
Лосев В. В., Крупкина Т. Ю., Рыжова Д. И., Родионов Д. В. 896

Роль тонких GaN, SiN покрытий гетероструктуры AlN/GaN в формировании двумерного электронного газа
Ляпустин И. Н., Майдэбура Я. Е., Малин Т. В., Мансуров В. Г., Голяшов В. А., Милахин Д. С. 898

Разработка технологических основ формирования и модификации сегнетоэлектрических полимерных пленок на основе ПВДФ для микроэлектронных применений
Макеев М. О., Осипков А. С., Бурьянская Е. Л., Кондрашов С. В., Киркин В. С., Рыженко Д. С. 901

Синтез, характеризация и свойства муаровых гетероструктур на основе графена
Борисенко Д. П., Катин К. П. 904

СЕКЦИЯ «НАДЁЖНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ» 907

Надежность и устойчивость образовательной платформы: интеграция оффлайн-архитектуры, защиты данных и масштабируемость
Савченко В. А., Серяков С. С. 907

Обеспечение устойчивости информационных систем к угрозам деанонимизации посредством верифицируемого синтеза персональных данных
Серяков С. С., Савченко В. А. 912

Сравнительный анализ средств наблюдаемости DNS в Kubernetes и экспериментальная оценка надежности eBPF-модуля обнаружения DNS-туннелирования
Нассер А. А. 917

УДК 621.384.6 + 681.6-32

Перспективные применения методов печати для формирования активных элементов микроэлектроники

Иванов В. В., д. ф.-м. н.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
ivanov.vv@mipt.ru

Обсуждаются перспективные методы печати элементов электроники, основанные на доставке материала сфокусированной аэрозольной струей и обеспечивающие получение программируемого рисунка с размерами до 10 мкм. Демонстрируется применение методов печати для формирования транзисторов.
Ключевые слова: аэрозольная печать; сухая и чернильная; элементы микроэлектроники; тонкопленочный транзистор; IGZO.

Promising applications of printing methods for the formation of active microelectronic components

Ivanov V. V., Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
ivanov.vv@mipt.ru

Promising methods for printing electronic components based on material delivery by a focused aerosol jet are discussed, enabling programmable patterns with dimensions up to 10 microns. The application of these printing methods to the formation of transistors is demonstrated.
Keywords: aerosol printing; dry and ink; microelectronic components; thin-film transistor; IGZO.

Методы печатной электроники, основанные на использовании функциональных чернил, представляют собой активно развивающуюся область, обеспечивающую непосредственную интеграцию электронных компонент в сенсорные системы, прозрачные и гибкие дисплеи, гибкие накопители энергии и энергонезависимые носимые датчики. В ряду бесконтактных методов прямой печати микроструктур, используемых в индустрии для контролируемого нанесения различных элементов на несущие поверхности по программируемому рисунку без применения литографии, аэрозольная печать чернилами, разработанная в 2006 г. в США, является наиболее перспективной благодаря возможности формирования трехмерных функциональных элементов с минимальным латеральным размером до 10 мкм как на плоских, так и на рельефных подложках. Метод основан на управляемом осаждении на подложку аэродинамически сфокусированных пучков микрокапель чернил, характеризующихся вязкостью в широком диапазоне от 0,5 до 2500 сП. Возможность работы с чернилами на основе наноматериалов различных химических составов, размеров и форм (наночастицы сложных составов, нанопроволоки,

углеродные нанотрубки и др.), а также высокая гибкость в создании структур с заданными свойствами позволяют рассматривать аэрозольную печать как перспективное направление для создания новых элементов и устройств. Аэрозольными принтерами формируют 3D-межсоединения электронных компонентов, прозрачные электроды, транзисторы на любых подложках, фотосенсоры и другие элементы. Дальнейшее улучшение экономической эффективности метода аэрозольной печати чернилами принципиально ограничивается наличием нескольких необходимых дополнительных процессов, реализуемых до процесса печати (синтез наночастиц и приготовление из них чернил) и после процесса печати микроструктур (сушка, термическая постобработка).

В 2017 г. в МФТИ был предложен новый подход сухой аэрозольной печати без применения чернил, основанный на использовании аэрозольного потока наночастиц, синтезируемых в импульсно-периодическом газовом разряде в несущем газе между электродами из необходимого расходного проводящего материала [1]. С использованием аэродинамической фокусирующей системы поток таких наночастиц обжимается до диаметра в десятки микрон, что позволяет печатать на подложках линии соответствующей ширины. Исследования по спеканию лазерным излучением предварительно напечатанных наночастицами линий показали возможность формирования таким методом проводящих элементов на различных подложках, в том числе на пластиковых подложках в случае спекания импульсным лазерным излучением наносекундной длительности.

Для улучшения фокусировки потока наночастиц было предложено решение по преобразованию агломератов наночастиц в потоке газа в уединенные наночастицы околосферической формы с размерами от 30 до 120 нм под действием наносекундного импульсного лазерного излучения [2]. Встраивание соответствующего оптимизирующего устройства в аэрозольный принтер перед аэродинамической фокусирующей системой одновременно должно решить обе проблемы: значительно улучшить фокусировку потока наночастиц и повысить плотность их укладки в формируемых массивах. Созданный с использованием предшествующих разработок принтер сухой аэрозольной печати реализует в едином устройстве четыре одновременно протекающих процесса, через которые поток наночастиц проходит последовательно: получение наночастиц в импульсно-периодическом газовом разряде, преобразование агломератов наночастиц в потоке газа в уединенные наночастицы околосферической формы под воздействием лазерного излучения, печать аэродинамически сфокусированным потоком наночастиц и лазерное спекание осаждаемых на подложке наночастиц.

С применением аэрозольной печати сухими наночастицами металлов квазисферической формы реализуется формирование массивов в виде линий шириной до 30 мкм и с достаточно плотной укладкой наночастиц. Одновременное лазерное спекание таких массивов наночастиц обеспечивает формирование монолитных высокопроводящих микроструктур с достаточно низким удельным сопротивлением, превышающим всего в два раза удельное сопротивление объемного металла [3]. Принтер позволяет формировать на различных подложках изделий микроэлектроники из металлических материалов с микронными проектными нормами: межсоединений, электродных структур, индуктивных и резистивных элементов. Состав материала изделия задается материалами, из которых изготовлены электроды генератора аэрозолей.

Авторами реализовано совместное применение методов чернильной и сухой аэрозольной печати для формирования тонкопленочных транзисторов (TFT) на основе оксида индия, галлия, цинка (IGZO). Применение таких полупроводниковых материалов для создания TFT-транзисторов получило бурное развитие после изобретения Номуры и соавторов в 2003 году. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с кристаллическим кремнием, включая тонкость, гибкость и низкую стоимость производства. TFT могут быть изготовлены на гибких подложках с гораздо более низкой стоимостью обработки, чем полевые транзисторы металл –оксид –полупроводник (MOSFET), изготовленные на кристаллических кремниевых пластинах. Цель развития технологии TFT не заключается в замене кремния. По мере развития обеих технологий кремний, вероятно, сохранит свои преимущества в плане производительности, плотности размещения компонентов и энергоэффективности. Однако TFT позволяют создавать электронные изделия с новыми форм-факторами и по цене, недостижимой для кремния, тем самым значительно расширяя спектр потенциальных применений.

Применение методов печатной электроники для формирования транзисторов с полупроводниковым каналом IGZO приводит к созданию транзисторов и микросхем на их основе качественно нового поколения. Настоящая работа опирается на применение новых методов бесконтактной печати для формирования TFT-транзистора: полупроводниковый канал изготавливается печатью чернилами из растворов смеси нитратов индия, галлия, цинка с последующим отжигом, а электроды –сухой аэрозольной печатью наночастицами металлов [3]. Характеристики получаемых транзисторов –подвижность носителей заряда и величины отношения токов в открытом и закрытом состоянии –составляют порядка 1 $м^2/В{\cdot}с$ и 10^4 соответственно.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-560.

Литература

1. Efimov A. A., Potapov G. N., Nisan A. V., Ivanov V. V. Controlled focusing of silver nanoparticles beam to form the microstructures on substrates // Results Physics, 2017. 7. P. 440–443.
2. Khabarov K., Nouraldeen M., Tikhonov S., Lizunova A., Efimov A., Ivanov V. Modification of Aerosol Gold Nanoparticles by Nanosecond Pulsed-Periodic Laser Radiation // Nanomaterials, 2021. 11, 2701. P. 1–20.
3. Иванов В. В., Ефимов А. А., Борисов В. И., Уразов М. Н., Корнюшин Д. В., Мусаев А. Г., Ворошилова В. А., Долгов В. А., Симоненко Н. П., Иванов М. С. Формирование микроструктур методами бесконтактной аэрозольной печати наночастицами // Журнал технической физики, 2025. — Т. 95. — Вып. 9. — С. 1725–1732.

УДК 621.3.049.7

Физически неклонируемые функции в интегральных схемах

Соловьёв А. А., к. т. н., Певцов Е. Ф., к. т. н., Рогачёв В. А.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78
solovev_aa@mirea.ru, pevtsov@mirea.ru, rogachev_v@mirea.ru

Рассмотрены физически неклонируемые функции в интегральных схемах. Показано, что индивидуальный отклик ФНФ задается разбросом параметров кристалла и считывается в виде пар «запрос –ответ». Отмечены реализации на основе задержек, ячеек памяти и аналоговых эффектов. Отдельно рассмотрено ограничение, связанное с моделирующими атаками.
Ключевые слова: физически неклонируемые функции; интегральные схемы; ML-атаки; аппаратная безопасность; доверенное проектирование; аутентификация устройств.

Physically unclonable functions in integrated circuits

Solovev A. A., Ph.D, Pevtsov E. F., Ph.D, Rogachev V. A.
MIREA — Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia
solovev_aa@mirea.ru, pevtsov@mirea.ru, assistant, rogachev_v@mirea.ru

The paper considers physically unclonable functions in integrated circuits. The PUF signature is formed by process variations of a chip and is used in challenge-response pairs. Timing-based, memory-based and analog implementations are described. The main limitations are related to response stability, environmental variations, error correction and machine-learning modeling attacks.
Keywords: physically unclonable functions; integrated circuits; machine-learning attacks; hardware security; trusted design; device authentication.

Для защиты электронной аппаратуры применяются не только программные методы, но и схемы, физически встроенные в кристалл или устройство. Такие схемы используют индивидуальные особенности экземпляра: разбросы размеров, задержек, пороговых напряжений, начальных состояний ячеек памяти. В результате устройство получает собственную аппаратную сигнатуру. Она не должна храниться как обычный цифровой пароль. Она возникает при обращении к схеме и поэтому связана с конкретным кристаллом. Для задач аутентификации, генерации ключа и защиты от подделки такой подход является одним из вариантов построения доверенной аппаратной платформы [1].

Физически неклонируемая функция (ФНФ) работает как измерительная процедура, выполняемая физической системой. На вход подается набор данных. После этого схема формирует отклик, который можно зарегистрировать и использовать в протоколе проверки. В терминологии ФНФ входной набор называют запросом, а измеренный результат — ответом. Совместно они образуют пару «запрос –ответ» (challenge-response pair –CRP). Для конкретной реализации ФНФ важно не только наличие такой пары, но и то, насколько стабильно она воспроизводится при изменении температуры, напряжения питания и времени эксплуатации [1].

Отдельный класс составляют ФНФ, в которых отклик формируется по временным параметрам сигналов. Здесь используется не значение напряжения в одной точке схемы, а различие в частоте, фазе, задержке или переходном процессе. Арбитражные ФНФ относятся к этому направлению: запрос перестраивает прохождение сигнала по тракту, а результат определяется сравнением задержек в двух ветвях [2]. Для таких схем существенны симметрия топологии, разброс паразитных емкостей, согласование линий и схема считывания. Большое число возможных CRP удобно для аутентификации. Это же свойство создает ограничение: при накоплении большого массива запросов и ответов возрастает риск построения модели поведения ФНФ.

В интервальных и арбитражных схемах запрос фактически задает конфигурацию измерения. Сигнал проходит через набор переключаемых участков, после чего фиксируется временное различие или результат сравнения. При малом числе известных CRP такая схема ведет себя как аппаратный идентификатор. При большом числе известных CRP появляется другой режим задачи: атакующий может использовать ответы как обучающую выборку. Поэтому в современных реализациях применяются усложнение внутреннего преобразования, обратная связь, изменение состояния между запросами и дополнительные блоки, затрудняющие прямое восстановление модели [3, 4].

ФНФ на основе памяти используют другой физический механизм. Отклик получают из начального состояния SRAM, DRAM, NVM или из нестабильности отдельных ячеек массива. Такой вариант удобен для интегральных схем, где память уже присутствует в составе кристалла. Не требуется вводить длинные линии задержки или отдельный аналоговый измерительный тракт. При этом число независимых ответов обычно меньше, чем у сильных ФНФ на задержках. Поэтому память-ориентированные ФНФ чаще применяют для идентификации экземпляра и формирования ключевой информации. Для SRAM-PUF важны устойчивые биты, маскирование нестабильных разрядов и работа при изменении питания. В работе по S2RAM-PUF приведен вариант субпороговой SRAM-реализации с энергией 3,12 фДж/бит [5].

Аналоговые ФНФ используют разброс параметров элементов, который проявляется в токах, пороговых напряжениях, временных постоянных, шумовых и смешанных аналого-цифровых характеристиках. Такой отклик чувствителен к режиму считывания. Измерительная цепь, температурный уход, старение и разброс питания могут менять результат не меньше, чем сама физическая сигнатура. Поэтому для аналоговых ФНФ нужны повторное считывание, выбор устойчивых признаков, коррекция ошибок и простая постобработка на кристалле. Без этих операций хорошая уникальность между разными экземплярами не всегда означает надежную воспроизводимость одного и того же экземпляра.

Для маломощных узлов Интернета вещей ФНФ интересны не как отдельный криптографический алгоритм, а как часть кристалла, которая дает собственный отклик устройства. В датчике, контроллере или радиомодуле постоянный секрет обычно приходится записывать в память. Это создает отдельную точку атаки. В схеме с ФНФ секретная информация не хранится в виде готового слова: при подаче запроса считывается состояние физической структуры. Для такой реализации важны площадь ячейки, ток потребления, число доступных CRP и возможность повторного чтения без сложной внешней настройки. В пассивных структурах

дополнительно используется сам факт нарушения объекта. После вскрытия, перегрева, механического воздействия или изменения проводящего участка следующий отклик уже не совпадает с исходным.

Для выбора конкретной ФНФ сначала задается не тип схемы, а режим угроз. Один случай –регистрация устройства при выпуске и последующая проверка по малому числу запросов. Другой случай –открытый протокол, где нарушитель может накопить большой массив CRP. Для арбитражных и других сильных ФНФ это принципиально разные условия работы. Если число открытых пар велико, то задержки в трактах, порядок переключения и результат арбитра могут быть использованы как обучающие данные. Для памяти основным ограничением становится не число запросов, а нестабильные биты. При изменении температуры или напряжения питания часть ячеек SRAM может менять стартовое состояние. Для аналоговых ФНФ отдельно проверяют цепь оцифровки, дрейф параметров и старение элементов. Поэтому при проектировании требуется заранее определить допустимый объем выдаваемых CRP, способ отбора устойчивых признаков, схему коррекции ошибок и режим повторного считывания.

Выводы

Физически неклонируемые функции позволяют использовать технологический разброс кристалла для идентификации интегральной схемы и формирования ключевой информации. Постоянный секрет при этом не обязательно хранится в памяти как готовый код. Для ФНФ на задержках критичны топология сигнальных трактов и число доступных пар «запрос –ответ». Для ФНФ на основе памяти –устойчивость стартовых состояний ячеек. Для аналоговых структур –режим считывания, температура, питание и старение. Получение уникального отклика само по себе не решает задачу защиты. Необходимо обеспечить его повторяемость, ограничить выдачу CRP и предусмотреть коррекцию ошибок на уровне кристалла.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, государственное задание для университетов № FSFZ-2026–0003.

Литература

1. Al-Meer A., Al-Kuwari S. Physical Unclonable Functions (PUF) for IoT Devices // ACM Computing Surveys, 2023. Vol. 55. № 14s. Article 314. P. 1–31. DOI: 10.1145/3591464.
2. Hemavathy S., Bhaaskaran V. S. K. Arbiter PUF — A Review of Design, Composition, and Security Aspects // IEEE. Access, 2023. Vol. 11. P. 33979–34004. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3264016.
3. Wu L., Hu Y., Zhang K., Li W., Xu X., Chang W. FLAM-PUF: A Response–Feedback-Based Lightweight Anti-Machine-Learning-Attack PUF // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2022. Vol. 41. № 11. P. 4433–4444. DOI: 10.1109/TCAD.2022.3197696.
4. Zhu B., Ding L., Li H., Lv X., Zhu L. A Response-Feedback-Based Strong PUF with Improved Machine Learning Attack Resistance // Sensors, 2024. Vol. 24. № 1. Article 93. DOI: 10.3390/s24010093.

5. Ni L., Zhang J., Xu Z., Yu S., Wang Y., Hu J., Huang H. S2RAM PUF: An Ultra-low Power Subthreshold SRAM PUF with Zero Bit Error Rate // Proceedings of the 61st ACM/IEEE Design Automation Conference, 2024. Article 206. DOI: 10.1145/3649329.3658246.

УДК 621.3.049.77

Микроэлектромеханические системы в управлении транспортных средств

Лысенко И. Е., д. т. н.
АО «Дизайн Центр «Союз»
124482, г. Москва, г. Зеленоград, корп. 100, ком. 205
ilysenko@dcsoyuz.ru

Развитие средств подавления сигналов спутниковой навигации и все чаще применяемые защитные меры по отключению мобильной связи задают новую тенденцию развития микроэлектромеханических систем (МЭМС), которые должны обеспечить бесперебойное и точное перемещение беспилотного транспорта.
Ключевые слова: СНС; ИНС; МЭМС; гироскопы.

Microelectromechanical Systems in Vehicle Control

Lysenko I. E., Doctor of Technical Sciences
JSC "DESIGN CENTER "SOYUZ"
Room 205, Bld. 100, Zelenograd, Moscow, 124482
ilysenko@dcsoyuz.ru

The development of satellite navigation signal jamming tools and the increasingly frequent protective measures involving mobile communication shutdowns set a new trend in the development of microelectromechanical systems (MEMS), which must ensure the uninterrupted and precise movement of unmanned vehicles.
Keywords: GPS; IMU; MEMS.

В последнее время участились случаи трансляции фальшивых сигналов спутниковых навигационных систем (СНС), называемой «спуфинг», что вносит существенные погрешности в определение реального местоположения абонентов. В отличие от глушения (джамминга), которое просто блокирует спутниковый сигнал, спуфинг незаметно подменяет координаты. Это несет достаточно серьезные риски для экономики стран: от угона транспортных средств при перевозке грузов на просторах Мирового океана до дезориентации в работе служб доставки и такси в пределах одного города.

Самым известным примером спуфинга является произошедший в 2019 году «шанхайский феномен». Капитаны торговых судов, стоящих на якоре в порту Шанхая, фиксировали перемещения своих судов на суше со скоростью более 50 км/ч по идеальному кругу диаметром порядка 200 метров. Это позволило предположить, что были проведены испытания системы радиоэлектронной защиты на основе спуфинга [1].

Одним из способов нивелирования воздействия таких систем является сверка данных спутниковых систем навигации с инерциальными навигационными системами (ИНС). Данное решение уже широко применяется в навигации при кратковременном затенении сигналов СНС, например, в условиях плотной городской застройки. Основными требованиями к таким ИНС являются малые массогабаритные характеристики, низкие энергопотребление и стоимость. Этим

требованиям удовлетворяют ИНС на основе технологии «микроэлектромеханические системы» (МЭМС). МЭМС-гироскопы уступают в точности другим видам, таким как волоконно-оптические и лазерные гироскопы, но существенно превосходят их по массогабаритным характеристикам, стоимости серийного производства и устойчивости к ударным нагрузкам. Это делает их применимыми в ИНС малоразмерных объектов, где другие не помещаются по габаритам, превышают ограничения по стоимости и энергопотреблению или же не выдерживают действия механических перегрузок.

Таким образом, основным предъявляемым требованием к ИНС на основе МЭМС-технологий является обеспечение низкого дрейфа гироскопов для увеличения длительности автономного управления малоразмерными объектами в условиях отсутствия или подмены сигналов СНС.

Литература

1. Ривкин Б. С. Навигация без GPS за рубежом // Гироскопия и навигация, 202432. — № 1 (124). — С. 115–142. –EDN: YZLGJP.

УДК 621.382

Двумерный MoS2 для посткремниевой микроэлектроники: перспективы и вызовы

Черникова А. Г., к. ф.-м. н.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
anna.chernikova@phystech.edu, chernikova.ag@mipt.ru

В докладе рассматриваются перспективы применения двумерного полупроводника MoS_2 в посткремниевой микроэлектронике. Особое внимание уделено ключевым материалам и технологическим вызовам, включая рост MoS_2, формирование низкоомных контактов и интеграцию с подзатворными high-*k*-диэлектриками. Будут обсуждены подходы к функционализации поверхности MoS_2, необходимые для создания top-gate-транзисторов, FeFET-структур и элементов энергонезависимой памяти нового поколения.
Ключевые слова: MoS_2; двумерные полупроводники; посткремниевая микроэлектроника; top-gate-транзисторы; high-*k*-диэлектрики; функционализация поверхности; сегнетоэлектрические оксиды; FeFET.

Two-dimensional MoS_2 for post-silicon microelectronics: opportunities and challenges

Chernikova A. G., Ph.D
Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
anna.chernikova@phystech.edu, chernikova.ag@mipt.ru

This talk discusses the prospects of using the two-dimensional semiconductor MoS_2 in post-silicon microelectronics. Particular attention is paid to key materials and technological challenges, including MoS_2 growth, formation of low-resistance contacts, and integration with high-*k* dielectrics. Surface functionalization approaches required for the realization of top-gate transistors, FeFET structures, and next-generation nonvolatile memory elements will be discussed.
Keywords: MoS_2; two-dimensional semiconductors; post-silicon microelectronics; top-gate transistors; high-*k* dielectrics; surface functionalization; ferroelectric oxides; FeFET.

Дальнейшее масштабирование микроэлектроники требует поиска новых материалов, способных обеспечить эффективное управление каналом при уменьшении размеров приборов и снижении энергопотребления. Одним из наиболее перспективных кандидатов является двумерный полупроводник MoS_2, сочетающий экстремально малую толщину, наличие запрещенной зоны и возможность эффективного электростатического управления каналом. Эти свойства открывают возможности для создания транзисторов предельных размеров, энергоэффективных логических схем, сенсорных устройств, а также элементов энергонезависимой

памяти и вычислений в памяти. Особый интерес в этом контексте представляет интеграция MoS_2 с high-*k* и сегнетоэлектрическими оксидными слоями, открывающая путь к реализации top-gate-транзисторов, FeFET-структур и функциональных элементов памяти нового поколения.

Однако дальнейшее развитие этой области требует решения ряда материаловедческих и технологических задач. Во-первых, необходим контролируемый рост MoS_2 на пластинах большого диаметра с воспроизводимыми структурными, электрическими и морфологическими характеристиками. Несмотря на существенный прогресс, прежде всего в области MOCVD-роста, остаются актуальными вопросы сращивания зерен, дефектности, однородности пленок и масштабируемости процессов. Во-вторых, критически важной задачей является формирование низкоомных и стабильных металлических контактов к MoS_2, поскольку контактное сопротивление часто определяет реальные характеристики транзисторов не меньше, чем собственные свойства двумерного канала.

Отдельный вызов связан с интеграцией MoS_2 с подзатворными диэлектриками и функциональными оксидными слоями. Химически инертная поверхность двумерных материалов, с одной стороны, способствует формированию интерфейсов с низкой плотностью поверхностных состояний. С другой стороны, она затрудняет равномерное зарождение диэлектрика при атомно-слоевом осаждении — основном технологическом методе формирования современных подзатворных high-*k*-слоев. Это приводит к необходимости разработки специальных подходов к функционализации поверхности MoS_2, обеспечивающих нуклеацию качественного диэлектрика без деградации двумерного полупроводника.

Доклад будет посвящен анализу текущего состояния данного направления, ключевых физических и технологических ограничений, а также возможных путей их преодоления. Будут обсуждены как общие перспективы двумерного MoS_2 для посткремниевой микроэлектроники, так и конкретные технологические подходы к интеграции MoS_2 с high-*k* и сегнетоэлектрическими оксидными слоями, направленные на создание функциональных top-gate-приборов нового поколения.

Часть результатов, представленных в докладе, получена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-19-00227-П.

УДК 621.372.22

Математическое моделирование межсоединений интегральных схем посредством аналитических моделей

Черникова Е. Б.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40
chiernikova96@mail.ru

Разработаны аналитические математические модели в замкнутой форме, позволяющие выполнять анализ целостности сигналов и уровней перекрестных наводок в межсоединениях высокоскоростных интегральных схем с уменьшенными вычислительными затратами.
Ключевые слова: интегральные схемы; аналитические модели; перекрестные помехи; линии передачи.

Mathematical modeling of interconnections of integrated circuits using analytical models

Chernikova E. B.
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia
chiernikova96@mail.ru

Analytical mathematical models in closed form have been developed, enabling the analysis of signal integrity and crosstalk levels in interconnects of high-speed integrated circuits with reduced computational costs.
Keywords: integrated circuits; analytical models; crosstalk; transmission lines.

Рост быстродействия и плотности интеграции современных ИС делает межсоединения критическим фактором, влияющим на производительность системы и электромагнитную совместимость [1]. Так, перекрестные помехи вызывают искажения сигналов, задержки и снижение надежности устройств, что делает актуальной разработку аналитических моделей для моделирования межсоединений, позволяющих сократить временные затраты на ранних этапах проектирования.

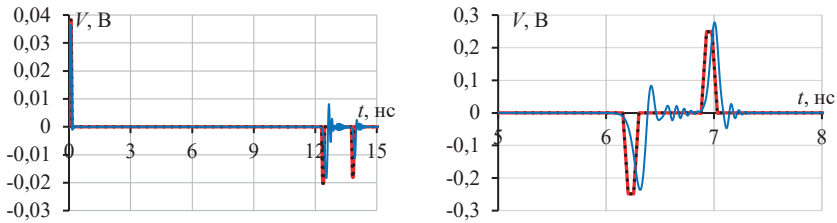
Разработка аналитических моделей основана на методе разложения мод во временной области, который заключается в представлении системы связанных линий передачи в виде набора *n* одиночных линий передачи [2]. Данный подход позволяет преобразовать связанные телеграфные уравнения в систему несвязных уравнений для модальных напряжений и токов с использованием матриц преобразований.

В работе предложен алгоритм вычисления временных откликов, основанный на их представлении в произвольной точке вдоль линии через векторы начальных падающих мод и матрицы коэффициентов отражения. В отличие от традиционных подходов, использующих преобразование Фурье или численные методы во временной области (например FDTD), предложенный метод обеспечивает получение аналитических решений в замкнутой форме. Это позволяет декомпозировать

результирующий сигнал на отдельные составляющие и количественно оценить вклад каждой из них в формирование суммарной амплитуды перекрестной помехи.

На основе предложенного алгоритма разработаны аналитические модели для межсоединений, состоящих из 2-, 3-, 4-проводных линий передачи. Модели учитывают асимметрию оконечных нагрузок, которая может возникнуть в результате технологического разброса параметров, неоднородности элементов схемы, различий импедансов подключаемых устройств, а также особенностей топологии.

Для верификации предложенных моделей выполнено сопоставление результатов аналитических расчетов с данными, полученными с использованием численных методов, в частности метода моментов (МоМ) и метода конечного интегрирования (МКИ). Проведенный анализ временных откликов при воздействии входного импульса с длительностью фронта 50 пс показал высокую степень сходимости результатов (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Формы напряжения ближней (*а*) и дальней (*б*) перекрестных наводок в 2-проводной линии передачи, полученные с помощью аналитики (––), МоМ (- -) и МКИ (––)

Разработанные аналитические модели позволяют проводить анализ целостности сигналов и уровней перекрестных наводок в межсоединениях ИС быстрее по сравнению с численным моделированием, что позволяет сократить временные и вычислительные затраты на предварительных этапах проектирования. Это создает предпосылки для интеграции данных моделей в современные САПР СВЧ МИС и ГИС, обеспечивая возможность итерационной оптимизации топологии с учетом требований электромагнитной совместимости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00419) в ТУСУРе.

Литература

1. Ramdani M. The electromagnetic compatibility of integrated circuits — Past, present, and future // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009. Vol. 51. № 1. P. 78–100.
2. Park S. W., Xiao F., Kami Y. Analytical approach for crosstalk characterization of multiconductor transmission lines using mode decomposition technique in the time domain // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, 2010. Vol. 52. P. 436–446.

УДК 533.922, 533.924, 533.932

Верифицированная модель плазмохимического травления поликремния в индуктивно-связанной плазме HBr/Cl2/Ar

Оксаниченко Ф. В.[1,2], Ефремов А. М.[1,2], д. х. н.
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Предложена гибридная модель плазмохимического травления поликристаллического кремния в смеси $HBr/Cl_2/Ar$, обеспечивающая совместное описание физико-химических свойств плазмы как источника активных частиц и кинетики процессов на обрабатываемой поверхности. Для расчета параметров плазмы использовалась 0-мерная самосогласованная кинетическая модель с суперпозицией максвелловского и драйвестеновского распределений для функции распределения электронов по энергиям. Скорость и форма профиля травления определялись с использованием двумерной модели клеточного автомата с комбинированной техникой трассировки лучей. Верификацию модели проводили по результатам зондовой и оптико-спектральной диагностики плазмы, а также на основе профилей травления, полученных на сколах модифицированных структур.
Ключевые слова: индуктивно-связанная плазма; плазмохимическое травление; моделирование ПХТ.

Verified Model of plasma etching of polysilicon in inductively coupled plasma of $HBr/Cl_2/Ar$

Oksaanichenko F. V.[1,2], Efremov A. M.[1,2], Sc.D
[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

A hybrid model for plasma etching of polycrystalline silicon in an $HBr/Cl_2/Ar$ gas mixture is proposed, which provides a combined description of the plasma physicochemical properties as a source of active species and the kinetics of processes on the treated surface. To calculate plasma parameters, a 0-dimensional self-consistent kinetic model was used, employing a superposition of Maxwellian and Druyvesteyn distributions for the electron energy distribution function. The etching rate and profile shape were determined using a two-dimensional cellular automaton model combined with ray-tracing techniques. The model was verified against the results of probe diagnostics and optical emission spectroscopy of the plasma, as well as from etching profiles obtained on cross-sections of modified structures.
Keywords: inductively coupled plasma; plasma etching; plasma-chemical etching modeling.

Плазмохимическое травление (ПХТ) входит в число критичных технологических процессов микроэлектронной технологии как обеспечивающее очистку и структурирование (размерное травление) поверхности различных функциональных слоев [1]. Поскольку выходные характеристики ПХТ (скорость, селективность к материалу маски, анизотропия профиля) многофакторно и нелинейно зависят от условий возбуждения плазмы, выявление соответствующих взаимосвязей не может быть достигнуто только эмпирическим путем. В связи с этим значительное внимание уделяется развитию методов математического моделирования ПХТ.

Одним из базовых элементов большинства современных СБИС является МДП-транзистор, ключевой операцией изготовления которого выступает формирование поликремниевого затвора методом ПХТ в смеси $HBr/Cl_2/Ar$ [1]. Существующие работы по моделированию данного процесса отличаются односторонним подходом (сфокусированы только на описании плазмы как источника активных частиц), используют несбалансированные кинетические схемы и не обеспечивают удовлетворительного согласия с экспериментальными данными. В нашей работе [2] была предпринята успешная попытка создания гибридной (сочетающей описание плазмы и кинетики гетерогенного взаимодействия активных частиц) модели ПХТ поликремния в смеси Cl_2/Ar. Целью настоящей работы являлось применение данного подхода для более востребованной в технологии смеси $HBr/Cl_2/Ar$, а также верификация полученной модели при сравнении результатов расчета с экспериментом.

По результатам работы была представлена гибридная модель ПХТ, состоящая из двух взаимосвязанных модулей:

а) модуля «плазма» в виде 0-мерной самосогласованной кинетической модели с наиболее полной кинетической схемой и суперпозицией максвелловского и драйвестеновского распределений для функции распределения электронов по энергиям;

б) модуля «поверхность» в виде двумерной модели клеточного автомата с комбинированной техникой трассировки лучей, совмещающей методы ограниченных иерархий и интегральных уравнений [3].

Последнее позволило существенно увеличить быстродействие модели. Верификацию модели проводили по интегральным (температура и концентрация электронов, измеренные методом зондов Ленгмюра) и индивидуализированным (концентрация атомов водорода, измеренная методом оптической актинометрии) характеристикам плазмы, а также на основе профилей травления, полученных на сколах модифицированных структур. По всем перечисленным критериям было получено хорошее согласие расчета с экспериментом.

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — С. 177.
2. Oksanichenko F. V., Efremov A. M. Influence of Process Conditions of the Plasmochemical Etching of Polysilicon in a Cl_2/Ar Mixture on Plasma Characteristics and Profile Evolution // High Energy Chem., 2025. Vol. 59 (Suppl 3). P. S268–S272.
3. Hauguth M. et al. New method for the precise flux calculation of neutrals for arbitrary surfaces in profile etch simulations // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2002. Vol. 20. № 3. P. 1064.

УДК 537.525

Исследование физико-химических свойств плазмы C2F6 методами экспериментальной диагностики и численного моделирования

Корякова Е. Е.[1,2], Ефремов А. М.[2], д. х. н., Исляйкин А. М.[2], к. х. н.
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
ekoryakova@niime.ru, aefremov@niime.ru, aislyaykin@niime.ru

Проведены исследования параметров и состава плазмы C_2F_6 при комбинировании методов диагностики (зондовые измерения, оптическая эмиссионная спектроскопия) и моделирование процессов. Сформирована кинетическая схема с детализированным описанием кинетики гетерогенной рекомбинации атомов и радикалов. Экспериментальным путем показано хорошее согласие расчетных параметров плазмы с величинами.
Ключевые слова: плазмохимическое травление; C_2F_6; диагностика; моделирование; кинетика; диссоциация; рекомбинация.

Investigation of physico-chemical properties of C_2F_6 plasma by methods of experimental diagnostics and numerical modeling

Koryakova E. E.[1,2], Efremov A. M.[2], Sc.D, Islaykin A. M.[2], Ph.D
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
ekoryakova@niime.ru, aefremov@niime.ru, aislyaykin@niime.ru

The parameters and composition of the C_2F_6 plasma have been studied using a combination of diagnostic methods (probe measurements, optical emission spectroscopy) and process modeling. A kinetic scheme has been formed with a detailed description of the kinetics of heterogeneous recombination of atoms and radicals. A good agreement of the calculated plasma parameters with the values determined experimentally is shown.
Keywords: plasma chemical etching; C_2F6; diagnostics; modeling; kinetics; dissociation; recombination.

Плазмохимическое травление (ПХТ) является ключевым процессом современной микроэлектронной технологии, обеспечивающим переход к более совершенным проектным нормам [1]. Заметную роль в ПХТ играют фторуглеродные газы, особенностью которых является высокоселективное травление в системе SiO_2/Si. Механизм обусловлен эффектом полимеризации, приводящим к образованию неодинаковой по толщине пленки на бескислородной и кислородсодержащей поверхности. Полимеризационная способность плазмы определяется соотношением концентраций ионов, фторуглеродных радикалов CF_x и атомарного фтора. Сложность

физико-химических процессов, формирующих стационарный состав плазмы, делает актуальным применение методов моделирования для прогнозирования взаимосвязей условий и результата ПХТ.

Анализ данных показал, что наименее изученным из фторуглеродных газов является гексафторэтан (C_2F_6). Целью работы являлось исследование свойств плазмы C_2F_6, определяющих изменение концентраций активных частиц при варьировании условий возбуждения. Использовалась совокупность методов диагностики и моделирования [2].

По результатам выполнения работы реализована нульмерная (0D) самосогласованная модель плазмы C_2F_6, основанная на совместном решении уравнений химической кинетики, баланса энергии электронов и теплового баланса реактора. За основу была взята кинетическая схема из работы [3], дополненная изначально отсутствующим блоком реакций рекомбинации атомов и радикалов на стенке реактора. Последние имеют принципиальное значение для корректного описания кинетики нейтральных частиц в типичном диапазоне давлений ПХТ (1–20 мтор). В расчетах принимались во внимание основные продукты диссоциации и ионизации гексафторэтана: нейтральные частицы (C_2F_6, CF_3, CF_2, CF, F, F_2, C_2F_5, C_2F_4), положительные ионы (CF_3^+, CF_2^+, CF^+, F^+), отрицательные ионы (F^-) и электроны.

Для подтверждения адекватности модели была проведена ее верификация с использованием данных зондовой (температура электронов, суммарная концентрация положительных ионов) и оптико-спектральной (концентрация атомов фтора) диагностики плазмы. Эксперименты проводились в индукционном реакторе планарного типа при варьировании давления газа и вкладываемой мощности. Сравнение результатов расчета с экспериментом показало удовлетворительное согласие по всем критериям. Это свидетельствует об адекватности модели и ее применимости для предиктивного (без проведения натурных экспериментов) анализа плазмы как источника активных частиц и обоснованного прогнозирования результата ПХТ при изменении управляющих параметров.

Литература

1. Красников Г. Я., Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 13–19.
2. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. Wiley, 2005.
3. Ho P. et al. Modeling the plasma chemistry of C_2F_6 and CHF_3 etching of silicon dioxide, with comparisons to etch rate and diagnostic data // J. Vac. Sci. Technol. A, 2001. Vol. 19 (5). P. 2344–2357.

УДК 537.525

Пространственно-разрешенная модель плазмы O2/Ar/N2 в реакторе удаления фоторезиста

Захаров Ю. А.[1,2], Ефремов А. М.[2]
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Представлена пространственно-разрешенная 2D-модель реактора с удаленным источником плазмы в смеси $O_2/Ar/N_2$ (97 % O_2), предназначенного для изотропного травления фоторезиста. Проведена верификация модели по данным зондовой диагностики плазмы и измерений скорости травления. Выявлены закономерности и установлены механизмы влияния управляющих параметров (мощность, давление) и конфигурации сепарирующей сетки на радиальное распределение потока атомов кислорода в плоскости пластины.
Ключевые слова: плазменные процессы; индуктивно-связанная плазма.

Spatially resolved model of $O_2/Ar/N_2$ plasma in a photoresist removal reactor

Zakharov Yu. A.[1,2], Efremov A. M.[2]
[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

The spatially resolved 2D model of remote $O_2/Ar/N_2$ plasma reactor considered for the isotropic photoresist etching was proposed. The model was verified using experimental data on plasma diagnostics by Langmuir probes and etching rate measurements. Regularities and mechanisms related to the influence of control parameters (power, pressure) and separation grid configuration on the radial distribution of oxygen atom flux across the wafer plate were determined.
Keywords: plasma processes; inductively coupled plasma.

Плазмохимическое удаление (ПХУ) фоторезиста в кислородсодержащей плазме проводится в реакторах удаленного типа с сепарирующей сеткой, обеспечивающей подавление потоков ионов и УФ-излучения и транспорт к поверхности преимущественно атомарного кислорода. Скорость и равномерность травления определяются условиями возбуждения плазмы, транспортом активных частиц и их рекомбинацией на поверхностях реактора. Оптимизация процесса экспериментальными методами затруднена из-за сложных взаимосвязей параметров и необходимости длительного кондиционирования реактора при изменении конструкции сетки. В связи с этим перспективным подходом является создание цифрового двойника процесса.

Целью работы являлись разработка и верификация пространственно-разрешенной модели ПХУ фоторезиста в реакторе удаленного типа с индукционным ВЧ-разрядом (13,56 МГц) в смеси $Ar/O_2/N_2$ при содержании O_2 97 %. Верификация модели проведена по литературным данным зондов Ленгмюра, валидация –по результатам эллипсометрических измерений скорости травления.

Расчеты подтвердили рост скорости травления на краю пластины вследствие усиления потока атомарного кислорода в области периферийного ламинарного течения газа. Установлено, что увеличение мощности приводит к росту концентрации электронов и генерации атомов кислорода, а рост давления локализует область генерации плазмы у стенок реактора. Оптимальными характеристиками обладает решетка с наклонными отверстиями, обеспечивающими полную оптическую непрозрачность.

Литература

1. Hsu C. C., Nierode M. A. et al. B. Comparison of model and experiment for Ar, Ar/O_2 and $Ar/O_2/Cl_2$ inductively coupled plasmas // J. Phys. D: Appl. Phys., 2006. Vol. 39. № 15. P. 3272–3284. DOI: 10.1088/0022-3727/39/15/009.
2. Efremov A. M., Rybkin V. et al. On mechanisms of oxygen influence on gas-phase parameters and silicon reactive-ion etching kinetics in $HBr + Cl_2 + O_2$ plasma // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol., 2019. Vol. 62. № 10. P. 76–83. DOI: 10.6060/ivkkt.20196210.5952.
3. Красников Г. Я., Горнев Е. С. и др. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3. — С. 63–93.

УДК 533.924

Моделирование атомно-слоевого травления кремния в плазме газовой смеси Ar/Cl2

Баранов О. И.[1,2], Резванов А. А.[2,3]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[3] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
obaranov@niime.ru

Предложена двумерная модель атомно-слоевого травления кремния в плазме газовой смеси Ar/Cl_2, реализованная методом Монте-Карло, позволяющая по заданным управляющим параметрам получать профиль поверхности кремния. Проведена оптимизация параметров модели с использованием вероятностей поверхностных реакций, рассчитанных методом молекулярной динамики. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными демонстрирует адекватность предложенного подхода.
Ключевые слова: атомно-слоевое травление; кремний; Монте-Карло; молекулярная динамика.

Modeling of atomic layer etching of silicon in Ar/Cl_2 plasma

Baranov O. I.[1,2], Rezvanov A. A.[2,3]
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[3] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
obaranov@niime.ru

A two-dimensional model of atomic layer etching of silicon in Ar/Cl_2 plasma is proposed, implemented using the Monte Carlo method, which allows predicting the silicon surface profile based on given process parameters. The model parameters are optimized using surface reaction probabilities obtained from molecular dynamics simulations. Comparison of the simulation results with experimental data demonstrates the adequacy of the proposed approach.
Keywords: atomic layer etching; silicon; Monte Carlo; molecular dynamics.

Поскольку критический размер устройств приближается к атомным масштабам, требования, предъявляемые к методам плазменного травления, стало трудно удовлетворить, используя традиционные процессы непрерывного или импульсного травления. Поэтому предлагается использовать метод атомно-слоевого травления (АСТ), который позволяет разделить процесс на несколько самоограниченных

этапов –пассивацию и ионную бомбардировку [1]. Это делает возможной отдельную оптимизацию каждого этапа, что может значительно улучшить равномерность травления, снизить повреждения материала плазмой, повысить селективность и минимизировать зависимость скорости травления от аспектного соотношения [2]. Чтобы проанализировать влияние неидеальных условий на процесс АСТ кремния в среде Ar/Cl_2 и получить оптимальные параметры процесса для дальнейших экспериментов на установке АСТ, необходимо разработать математическую модель данного процесса. Это позволит более эффективно проводить исследования на установке и уменьшить затраты на отработку режимов.

Целью данной работы являлось создание модели, которая по известным управляющим параметрам позволяет получить профиль поверхности кремния, а также оптимизация данной модели с помощью расчета вероятностей поверхностных реакций методом молекулярной динамики.

В рамках данной работы предложена двумерная модель АСТ кремния в среде Ar/Cl_2, реализованная методом Монте-Карло. В качестве входных данных использовались следующие управляющие параметры: время пассивации и бомбардировки, энергия ионов аргона, потоки хлора и аргона, вероятности поверхностных реакций, температура.

Было проведено сравнение результатов модели с данными экспериментов АСТ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-91-06002.

Литература

1. Huard C. M. et al. Atomic layer etching of 3D structures in silicon: Self-limiting and nonideal reactions. // J. Vac. Sci. Technol. A, 2017. Vol. 35 (3): 031306.
2. Lopaev D. V. et al. Fluorocarbon (C4F8) assisted plasma-enhanced atomic layer etching (PEALE) of SiO2 with high repeatability of cycles in industrial ICP reactor. I. Experiment // J. Vac. Sci. Technol. A, 2026. Vol. 44 (2): 022607.

УДК 621.3.062

Моделирование последовательно-шунтирующего МЭМС-переключателя с расширенным диапазоном частот

Морозов М. О.[1,2], Уваров И. В.[1], д. т. н.
[1] Отдел микротехнологий –Ярославль ОФТИ им. К. А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт»
150067, г. Ярославль, ул. Университетская, 21
matvey19991@mail.ru
[2] Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова
150003, г. Ярославль, ул. Советская, 14

МЭМС-переключатели способны существенно улучшить характеристики систем связи, но узкий рабочий диапазон частот затрудняет их применение. В докладе представлена модель ключа с диапазоном 0,4–10 ГГц. Комбинация последовательного и шунтирующего принципов переключения расширила диапазон более чем на 5 ГГц по сравнению со стандартными МЭМС-ключами.
Ключевые слова: МЭМС-переключатель; последовательный ключ; шунтирующий ключ; изоляция; вносимые потери; метод конечных элементов.

Modeling a series-shunt MEMS switch with an extended frequency range

Morozov M. O.[1,2], Uvarov I. V.[1], Doctor of Technical Sciences
[1] NRC "Kurchatov institute" –Valiev IPT, Yaroslavl Branch
21 Universitetskaya St., Yaroslavl, 150067, Russia
matvey19991@mail.ru
[2] P.G. Demidov Yaroslavl State University
14 Sovetskaya St., Yaroslavl, 150003, Russia

MEMS switches can significantly improve the performance of communication systems, but the narrow bandwidth hinders their application. This paper presents a model of a MEMS switch with the 0.4–10 GHz range. The combination of series and shunt switching principles widens the bandwidth by more than 5 GHz compared with conventional MEMS switches.
Keywords: MEMS switch; series switch; shunt switch; isolation; insertion loss; finite element method.

МЭМС-переключатели представляют собой миниатюрные СВЧ-реле с электростатическим приводом. Обычно они имеют последовательную или шунтирующую конфигурацию. В первом случае подвижный электрод замыкает разрыв сигнального проводника линии передач [1], а во втором –замыкает сигнальный и заземленный проводники [2]. Как правило, последовательные ключи работают в диапазоне 0–4 ГГц, а шунтирующие –на частотах более 4 ГГц, но также в узком диапазоне. В работе рассмотрен МЭМС-переключатель последовательно-шунтирующего типа на основе миниатюрного электростатического актюатора [3]. Расчет методом конечных элементов показал, что ключ обладает рабочим диапазоном 0,4–10 ГГц, расширенным более чем на 5 ГГц по сравнению со стандартными МЭМС-ключами.

Ключ сформирован на сапфировой подложке размерами 3×3×0,46 мм (см. рис. 1). Расположенный на ее поверхности копланарный волновод из алюминия толщиной 3,6 мкм имеет разрыв и встроенный конденсатор $Ru/SiO_2/Ru$ толщиной 100/50/100 нм. Подвижными электродами служат четыре кантилевера: два последовательных и два шунтирующих. В замкнутом состоянии последовательные кантилеверы касаются конденсатора, пропуская сигнал. В разомкнутом состоянии шунтирующие кантилеверы касаются конденсатора. Разрыв препятствует прохождению низкочастотного сигнала, а заземление верхней обкладки изолирует выход от входа на высоких частотах.

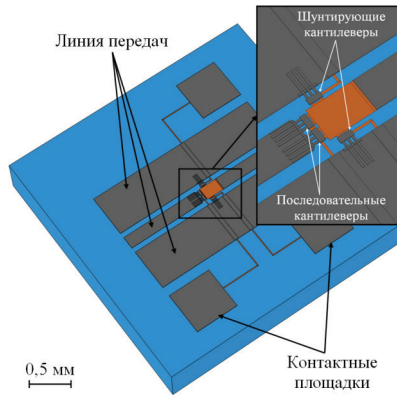


Рис. 1. Модель МЭМС-переключателя

Модель содержит $3 \cdot 10^5$ конечных элементов, сетка показана на рис. 2. Состояние ключа задается изменением высоты контактных выступов на нижней стороне кантилеверов. Контактное сопротивление между кантилевером и верхней обкладкой конденсатора составляет 5 Ом. На входе и выходе линии передач располагаются волновые порты, между которыми распространяется электромагнитная волна. Мощность входного сигнала составляет 0,1 Вт.

Радиочастотные характеристики ключа представлены на рис. 3. На низких частотах ключ вносит большие потери, однако с ростом частоты они быстро уменьшаются, находясь в пределах 0,4–0,5 дБ в диапазоне 0,4–10 ГГц. Изоляция в данном диапазоне монотонно изменяется от 63 до 46 дБ. Комбинация последовательной и шунтирующей конфигураций расширила рабочий диапазон более чем на 5 ГГц и увеличила изоляцию более чем на 10 дБ в сравнении со стандартными МЭМС-ключами. Важно, что рабочий интервал 0,4–10 ГГц определяется именно вносимыми потерями. Еще более расширить этот диапазон позволит уменьшение контактного сопротивления за счет подбора материала контактов или изменения конструкции актюатора. Представленный ключ является перспективным для широкополосных устройств связи.

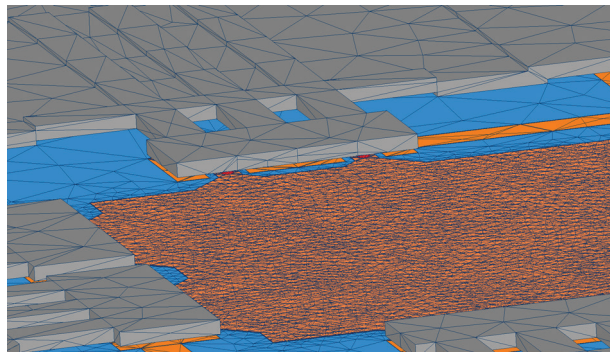


Рис. 2. Сетка конечных элементов в области кантилеверов

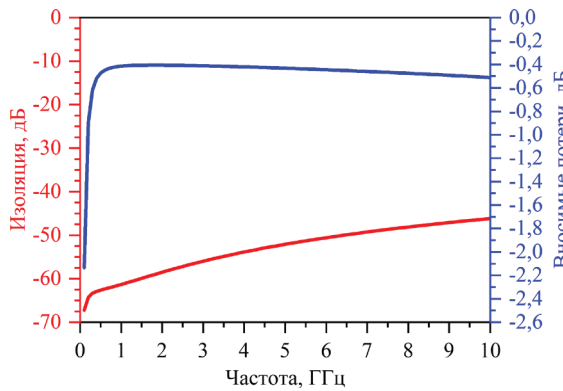


Рис. 3. Зависимость изоляции и вносимых потерь от частоты коммутируемого сигнала

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. Fabrication and analysis of radiofrequency MEMS series capacitive single-pole double-throw switch / D. Bansal, A. Bajpai, P. Kumar, M. Kaur, K. Rangra // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2016. Vol. 15. № 4 (045001).
2. Design of novel compact anti-stiction and low insertion loss RF MEMS switch / D. Bansal, A. Kumar, A. Sharma, P. Kumar, K.J. Rangra // Microsystem technologies, 2014. Vol. 20. № 2. P. 337–340.
3. Belozerov I.A., Uvarov I.V. A compact MEMS switch based on a cantilever with three elastic elements // St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics, 2025. Vol. 83. № 3.2. P. 168–171.

УДК 531.768

Моделирование контактного МЭМС-акселерометра порогового типа

Шалаев В. А.[1], Лысенко И. Е.[1,2], Михеева А. С.[1,3]
[1] АО «Дизайн-центр «Союз»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 1
vshalaev@dcsoyuz.ru
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
ilysenko@dcsoyuz.ru
[3] Научно-исследовательский институт
перспективных материалов и технологий
105187, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Щербаковская, 53
amikheeva@dcsoyuz.ru

Разработаны конструкция и модель многоразового контактного МЭМС-акселерометра с пороговым срабатыванием по оси *Z*. Выполнено моделирование чувствительного элемента, установлена зависимость порога срабатывания от геометрических параметров подвеса.
Ключевые слова: МЭМС; акселерометр; пороговый акселерометр; инерционный переключатель; контактный датчик; КНИ-технология; ударные нагрузки; численное моделирование.

Modeling of a Contact-Type Threshold MEMS Accelerometer

Shalaev V. A.[1], Lysenko I. E.[1,2], Mikheeva A. S.[1,3]
[1] Design Center "Soyuz" JSC
14 Konstruktora Lukina St., Bldg. 1, Moscow, Zelenograd, 124460, Russia
vshalaev@dcsoyuz.ru
[2] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
ilysenko@dcsoyuz.ru
[3] Research Institute of Advanced Materials and Technologies
53 Shcherbakovskaya St., Moscow, Zelenograd, 105187, Russia
amikheeva@dcsoyuz.ru

A design and model of a reusable contact-type MEMS accelerometer with threshold actuation along the Z-axis have been developed. Numerical modeling of the sensing element has been carried out, and the dependence of the actuation threshold on the geometrical parameters of the suspension has been established.
Keywords: MEMS; accelerometer; threshold-type accelerometer; inertial switch; contact sensor; SOI technology; shock loads; numerical modeling.

Микромеханические пороговые акселерометры применяются для регистрации кратковременных ударных воздействий в энергоэффективных системах, переходящих в активное состояние при превышении порогового ускорения [1–3].

Традиционные инерционные переключатели часто являются одноразовыми или используют механизм фиксации, что ограничивает их применение [2]. Перспективным направлением является разработка многоразовых устройств с порогом, задаваемым геометрией чувствительного элемента [3, 4].

Представлена конструкция микромеханического контактного акселерометра порогового типа для автономной активации электронных систем. В отличие от существующих решений, устройство является многоразовым и не использует механизм фиксации.

Акселерометр реализован по КНИ-технологии. Чувствительный элемент включает инерционную массу, подвешенную на упругих балках, сформированных в структурном слое кремния толщиной 25 мкм, и соединенную через оксидный слой. Срабатывание устройства происходит при смещении массы вдоль оси Z и замыкании контакта с верхним электродом.

Проведено математическое моделирование: рассчитан статический отклик, определены собственные частоты и зависимость перемещения от ускорения. Параметрический анализ показал влияние толщины и ширины балок на чувствительность и порог срабатывания.

Порог срабатывания составил 50 g при длительности импульса 0,5 мс с допуском ±10 %.

Конструкция отличается технологичностью, совместимостью со стандартными МЭМС-процессами и многоразовостью, что расширяет область применения в системах мониторинга ударов, защите электроники и энергоэффективных устройствах с активацией по событию.

Литература

1. Xu Q., Younis M. I. Micromachined threshold inertial switches: a review // J. Micromech. Microeng., 2022.
2. Peng Y., Sun Y., Luo G., Wu G., Zhang T. Recent Advancements in Inertial Micro-Switches // Electronics, 2019. Vol. 8. № 6. P. 648.
3. Xu Y., Liu S., He C., Wu H., Cheng L., Yan G., Huang Q. Reliability of MEMS inertial devices in mechanical and thermal environments: A review // Heliyon, 2024. Vol. 10. № 5. P. e27481.
4. Binali R., Demirpolat H., Kuntoğlu M., Makhesana M., Yaghoubi S., Kul B. S. A Comprehensive Review on Low-Cost MEMS Accelerometers for Vibration Measurement: Types, Novel Designs, Performance Evaluation, and Applications // J. Mol. Eng. Mater., 2024.

УДК 536.2.08

Влияние параметров автокорреляционной функции теплового потока на коэффициент теплопроводности кобальта

Виноградов Ф. А., Федотов А. Ю.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34
fvinog3@gmail.com

В работе рассматривается актуальная проблема определения теплопроводности нанопленок кобальта методом молекулярной динамики. Актуальность исследования обусловлена миниатюризацией электроники, где кобальт используется в качестве барьерных слоев и контактов. Целью работы является верификация модели расчета теплопроводности в нанопленках кобальта. Для моделирования применяется метод молекулярной динамики с потенциалом MEAM, а коэффициент теплопроводности рассчитывается по методике Грина — Кубо. В качестве ожидаемых результатов планируется получение графиков зависимости теплопроводности объемного кобальта от параметров автокорреляционной функции теплового потока.
Ключевые слова: теплопроводность; MEAM; LAMMPS; нанопленки; молекулярная динамика.

The influence of the parameters of the autocorrelation function of heat flow on the thermal conductivity coefficient of cobalt

Vinogradov F. A., Fedotov A. Yu.
Udmurt Federal Research Center,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
34 T. Baramzina St., Izhevsk, 426067, Russia
fvinog3@gmail.com

The paper considers the actual problem of determining the thermal conductivity of cobalt nanofilms by the method of molecular dynamics. The relevance of the study is due to the miniaturization of electronics, where cobalt is used as barrier layers and contacts. The aim of the work is to verify the thermal conductivity calculation model in cobalt nanofilms. The method of molecular dynamics with the MEAM potential is used for modeling, and the coefficient of thermal conductivity is calculated using the Green-Kubo method. As expected results, it is planned to obtain graphs of the dependence of the thermal conductivity of bulk cobalt on the parameters of the autocorrelation function of the heat flow.
Keywords: thermal conductivity; MEAM; LAMMPS; nanofilms; molecular dynamics.

Актуальность исследования теплопроводности нанопленок кобальта методом математического моделирования обусловлена несколькими ключевыми факторами. В условиях миниатюризации электроники проблема тепловыделения выходит на первый план, а кобальт широко используется в качестве барьерных слоев и контактов, что требует точного знания его теплофизических свойств в наноразмерном состоянии. Основная научная сложность связана с тем, что в нанопленках

классические законы теплопереноса неприменимы из-за размерных эффектов: рассеяние фононов на границах приводит к многократному снижению теплопроводности. Для ферромагнитного кобальта эта задача усложняется необходимостью учитывать совместный вклад электронов и фононов в перенос тепла. Кроме того, наноструктурированные пленки на основе кобальта перспективны для термоэлектрических применений, где требуется минимальная теплопроводность. Математическое моделирование позволяет оптимизировать структуру материала еще на этапе разработки, а современные экспериментальные методы дают возможность верифицировать полученные результаты. Таким образом, исследование находится на стыке фундаментальной физики размерных эффектов и практических задач наноэлектроники. Целью работы является верификация модели расчета теплопроводности в нанопленках кобальта.

Для исследования теплопроводности образца применялся метод молекулярной динамики. В основе метода лежат уравнения движения всех атомов системы:

$$m_i \frac{d^2\mathbf{r}_i}{dt^2} = \mathbf{F}_i\left(t, \mathbf{r}(t)\right),\ i = 1, 2, ..., N, \tag{1}$$

$$t_0 = 0,\ \mathbf{r}_i(t_0) = \mathbf{r}_{i0},\ \frac{d\mathbf{r}_i(t_0)}{dt} = \mathbf{v}_i(t_0) = \mathbf{v}_{i0},\ i = 1, 2, ..., N, \tag{2}$$

где m_i –это масса i-го атома; N –количество атомов в системе; $\mathbf{r}_{i0}$ и $\mathbf{r}_i$ –начальный и текущий радиус-векторы соответственно; $\mathbf{v}_i$ и $\mathbf{v}_{i0}$ –текущая и начальная скорость i-го атома соответственно; $\mathbf{F}_i\left(t, \mathbf{r}(t)\right)$ –суммарная сила, действующая на i-й атом. В уравнении (1) сила расписывается следующим образом:

$$\mathbf{F}_i\left(t, \mathbf{r}(t)\right) = -\frac{\partial U(\mathbf{r}(t))}{\partial \mathbf{r}_i(t)},\ i = 1, 2, ..., N. \tag{3}$$

Метод молекулярной динамики опирается на понятие потенциала $U(\mathbf{r})$, который отвечает за характер и величину взаимодействия атомов системы. В данной работе использовался потенциал MEAM (Modified Embedded Atom Method) [1]. В данном методе результирующий потенциал представляется в виде суммы вкладов энергий отдельных атомов, причем отдельно выделяется вклад парного и многоэлементного взаимодействия:

$$U(\mathbf{r}) = \sum_i U_i(\mathbf{r}) = \sum_i \left(F_i(\bar{\rho}_i) + \frac{1}{2}\sum_{j=1} \varphi_{ij}(r_{ij}) \right),\ i = 1, 2, ..., N, \tag{4}$$

где $U_i(\mathbf{r})$ –вклад в общую потенциальную энергию каждого отдельного атома; $F_i(\bar{\rho}_i)$ –функция погружения, зависящая от фоновой электронной плотности $\bar{\rho}_i$; $\varphi_{ij}(r_{ij})$ –парное взаимодействие между атомами, которые находятся на расстоянии r_{ij}. Более подробно о функции погружения и парном взаимодействии написано в работе [2].

Для определения коэффициента теплопроводности применялась методика расчета Грина — Кубо, описанная в [3]:

$$\kappa = \frac{1}{3VK_B T^2} \int_0^\infty \left\langle \mathbf{J}(t) \cdot \mathbf{J}(0) \right\rangle dt, \tag{5}$$

где V –объем системы; k_B –постоянная Больцмана; T –температура системы; $\mathbf{J}(t)$ и $\mathbf{J}(0)$ –тепловой поток в момент времени t и в нулевой момент времени соответственно.

В результате проведенных исследований были построены графики зависимостей коэффициента теплопроводности от параметров автокорреляционной функции теплового потока (рис. 1). Полученные результаты согласуются с исследованиями других авторов [4].

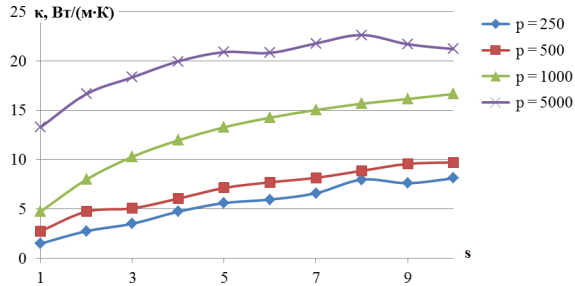


Рис. 1. Результаты вычислительного эксперимента

Литература

1. Baskes M. I. Modified embedded-atom potentials for cubic materials and impurities // Physical Review B, 1992. Vol. 46. № 5. P. 2727–2742.
2. Вахрушев А. В. Федотов А. Ю. Савва Ю. Б., Сидоренко А. С. Моделирование процессов формирования атомарной структуры сверхпроводящего спинового вентиля // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, 2020. — № 2. — С. 16–27.
3. Surblys D., Matsubara H., Kikugawa G., Ohara T. Methodology and meaning of computing heat flux via atomic stress in systems with constraint dynamics // J. Appl. Phys., 2021. Vol. 130. № 21. P. 215104.
4. Tong Z., Li S., Ruan X., Bao H. Comprehensive first-principles analysis of phonon thermal conductivity and electron-phonon coupling in different metals // Physical review B, 2019. Vol. 100. № 14. P. 144306.

УДК 621.372.8.01

Моделирование влияния температуры на характеристики микрополосковой линии с двумя боковыми заземленными проводниками при разных влагозащитных покрытиях

Сагиева И. Е., к. т. н.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40
indira_sagieva@mail.ru

Выполнено моделирование влияния температуры на характеристики микрополосковой линии с двумя боковыми заземленными проводниками на основе четырех марок диэлектрической подложки PTFE при разных влагозащитных покрытиях (лаках).
Ключевые слова: печатная плата; микрополосковая линия; погонная задержка; волновое сопротивление; температура; тепловой коэффициент; лак.

Modeling the influence of temperature on the characteristics of a microstrip line with two side grounded conductors with different moisture-proof coatings

Sagiyeva I. Y., Ph.D
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), 40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia
indira_sagieva@mail.ru

The influence of temperature on the characteristics of a microstrip line with two side grounded conductors based on 4 grades of PTFE dielectric substrate with different moisture-proof coatings (varnishes) was simulated.
Keywords: printed circuit board; microstrip line; per-unit-length delay; impedance; temperature; thermal coefficient; moisture-proof coating.

Радиоэлектронная аппаратура широко применяется в промышленности, медицине, аэрокосмической и морской областях. Ее основой является печатная плата (ПП), обеспечивающая интеграцию и надежность компонентов в разных климатических условиях, включая космос, Арктику и тропики. Надежность ПП сильно зависит от температуры (T) и влажности: T вызывает деформацию материалов, приводящую к изменению геометрических размеров элементов ПП, а влажность может вызвать дендритный рост проводников и короткие замыкания. Поэтому для защиты ПП от влажности применяют влагозащитные покрытия (лаки). При проектировании ПП важно выбирать правильные типы линий передачи, например микрополосковую линию (МПЛ) и ее модификации [1]. МПЛ в микроэлектронике обеспечивает эффективную передачу сигналов, фильтрацию и согласование, что делает ее ключевой для антенн и усилителей благодаря компактности и технологичности.

В данной работе представлены новые результаты моделирования в системе TUSUR.EMC [2] влияния T (от –50 до 150 °C шагом 25 °C) на характеристики

погонной задержки (τ) и волнового сопротивления (Z) МПЛ с двумя боковыми заземленными проводниками (рис. 1) при разных влагозащитных покрытиях (табл. 1) на основе линейной температурной модели [3] для четырех марок материала PTFE (табл. 2). Марки PTFE имеют одну общую относительную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_r = 3$, но отличаются тепловыми коэффициентами (α).

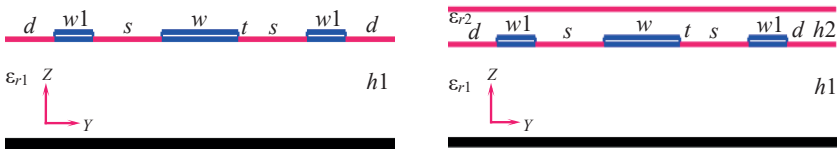


Рис. 1. Поперечное сечение исследуемой линии без влагозащитного покрытия (*а*) и с ним (*б*)

Таблица 1. Параметры влагозащитных лаков

Параметр \ Тип лака	Полипараксилилен	Полихлорпараксилилен	Эпоксидный	Силиконовый	Уретановый
ε_{r2}	2,65	2,95	3,3	2,7	6,5
α, 10^{-5} K^{-1}	6,9	3,5	4,5	25	10

Таблица 2. Марки материала PTFE

Марка PTFE	**α · 10^6 K^{-1}**			**ε_r**	**α(ε_r) · 10^6 K^{-1}**
	X	***Y***	***Z***		
GNA300 (армированный без наполнителя)	16	18	130	3	−132
GNC3008 (армированный с керамическим наполнением)	14	17	30	3	−17
GNC3003 (без армирования с керамическим наполнением)	17	17	23	3	−6
GNH300 (армированный углеводородный композит с наполнением)	15	16	36	3	280

Выявлено, что с увеличением ε_r лака значения τ увеличиваются, а Z уменьшаются для всех марок PTFE (рис. 2). Между тем из-за значений ε_r всех лаков, кроме уретановых с ε_r, близким к маркам GNC3008 и GNC3003, появляется возможность минимальной чувствительности τ и Z с ростом T. Это означает возможность минимизации влияния T до стабильных значений τ и Z за счет правильного учета подбора материалов диэлектрической подложки и влагозащитного лака, т.е. за счет компенсации значений их ε_r и α.

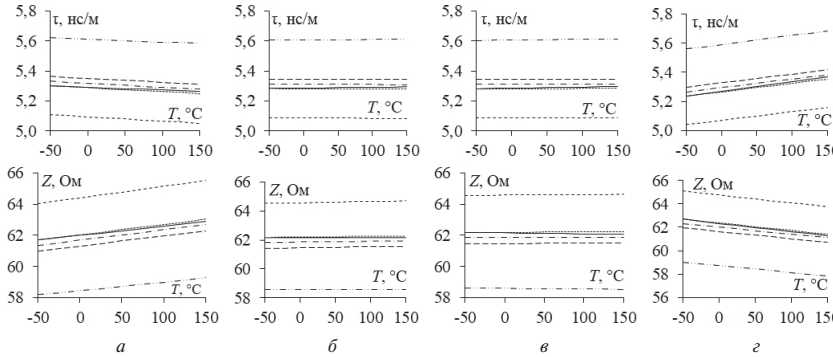


Рис. 2. Зависимости τ и Z с ростом T без (- -) и с учетом влагозащитного лака: полипараксилилена (· ·), полихлорпараксилилена (–·–), эпоксидного (– –), силиконового (–), уретанового (–··–) для марок GNA300 (*а*), GNC3008 (*б*), GNC3003 (*в*), GNH300 (*г*)

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ, проект FEWM-2024-0005.

Литература

1. Maloratsky L. G. Using modified microstrip lines to improve circuit performance // High frequency electronics, 2011. Vol. 10. № 5. P. 38–52.
2. Kuksenko S. P. Preliminary results of a project of the University of TUSUR on designing the distribution network space vehicles: modeling EMS // IOP Conf. Series: Materials science and engineering, 2019. Vol. 560. № 012110. P. 1–7.
3. Sagiyeva I. Y., Nosov A. V., Surovtsev R. S. The influence of temperature on microstrip transmission line characteristics // 21st International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). Erlagol, Altai, Russia, 29 June — 3 July 2020. P. 191–194.

УДК 621.318.4

Исследование частотной стабильности спиральной катушки индуктивности с переменной шириной проводника

Власов С. В., аспирант, Жечев Е. С., к. т. н.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, ул. Ленина, 40
sergei.v.vlasov@tusur.ru

Исследована частотная стабильность круглой планарной спиральной катушки индуктивности при нерегулярной ширине проводника, задаваемой коэффициентом $k = w_1/w_2 \in \{1{,}5;\ 2;\ 3;\ 6\}$. Показано, что умеренная нерегулярность профиля проводника ($k = 1{,}5–2$) обеспечивает наибольшую добротность при сохранении частотной стабильности индуктивности, тогда как значительное увеличение k приводит к смещению частоты собственного резонанса в низкочастотную область.
Ключевые слова: катушка индуктивности; частотная стабильность; переменная ширина проводников; добротность; арсенид галлия.

Study of frequency stability of a spiral inductor with variable conductor width

Vlasov S. V., graduate student, Zhechev E. S., Ph.D
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenin St., Tomsk, 634050, Russia
sergei.v.vlasov@tusur.ru

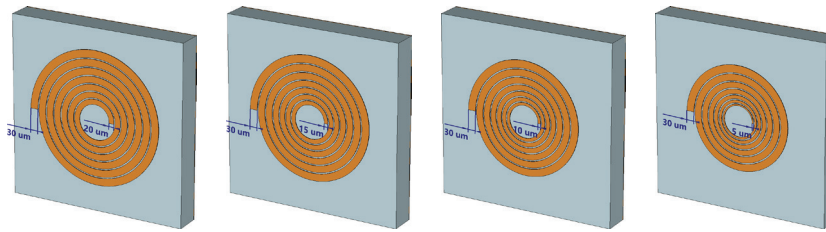
The frequency stability of a circular planar spiral inductor with a non-uniform conductor width, defined by the tapering coefficient $k = w_1/w_2 \in \{1.5;\ 2;\ 3;\ 6\}$, has been investigated. It is demonstrated that moderate conductor width non-uniformity ($k = 1.5–2$) yields the highest quality factor while preserving the frequency stability of the inductance, whereas a substantial increase in k results in a downward shift of the self-resonant frequency.
Keywords: inductor; frequency stability; variable conductor width; *Q*-factor; gallium arsenide.

В условиях миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры и роста рабочих частот стабильность параметров интегральных пассивных компонентов приобретает первостепенное значение, особенно в ВЧ- и СВЧ-диапазонах, где изменение эффективной индуктивности приводит к деградации характеристик трактов передачи [1, 2].

Анализ литературы показал, что использование переменной ширины проводника в катушках индуктивности позволяет перераспределить токовую плотность и повысить максимальную добротность [3–5], однако влияние данного подхода на частотную стабильность индуктивности остается неисследованным.

В настоящей работе исследуется круглая планарная спиральная катушка индуктивности с числом витков $N = 6$, реализованная на подложке арсенида галлия

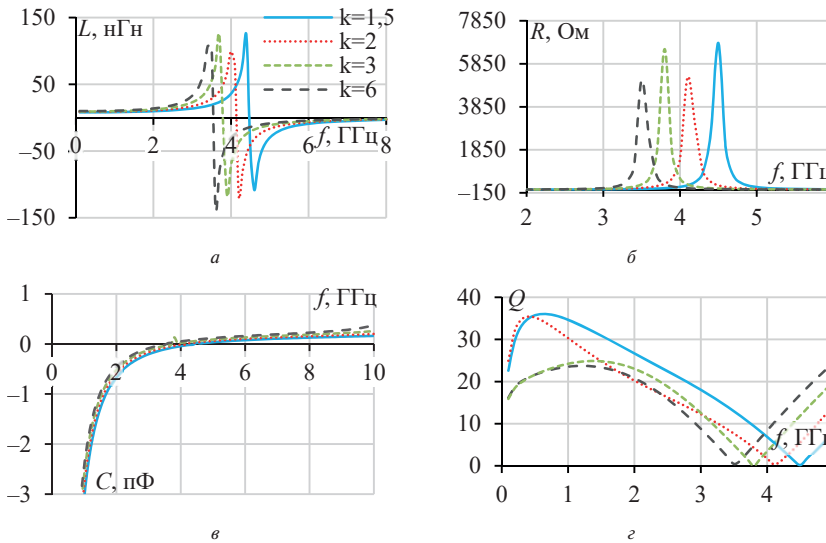
(GaAs). В качестве геометрического параметра варьирования принят коэффициент нерегулярности ширины проводника, определяемый как отношение ширины внешнего витка к ширине внутреннего витка: $k = w_1/w_2$. При фиксированной ширине $w_1 = 30$ мкм рассматриваются значения $w_2 = 20$ мкм ($k = 1{,}5$), $w_2 = 15$ мкм ($k = 2$), $w_2 = 10$ мкм ($k = 3$) и $w_2 = 5$ мкм ($k = 6$). На рис. 1 представлены конфигурации исследуемых катушек индуктивности.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Структуры исследуемых катушек индуктивности с разной шириной w_2: 20 мкм (*а*), 15 мкм (*б*), 10 мкм (*в*), 5 мкм (*г*)

Электромагнитное моделирование выполнено методом конечных интегралов. Анализировались зависимости эффективной индуктивности $L(f)$, добротности $Q(f)$, паразитной емкости $C(f)$, эквивалентного сопротивления $R(f)$; результаты представлены на рис. 2.



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Номинал индуктивности (*а*), активное сопротивление (*б*), паразитная емкость (*в*) и добротность (*г*) исследуемых катушек индуктивности

В результате проведенного исследования установлено, что увеличение коэффициента k оказывает влияние на электрические характеристики планарной спиральной катушки индуктивности. С ростом k наблюдается смещение частоты собственного резонанса в сторону низких частот, что свидетельствует об увеличении паразитной емкости структуры и сужении рабочего диапазона частот. При этом номинальное значение индуктивности сохраняется на сопоставимом уровне для всех рассмотренных вариантов. Максимальная добротность достигается при $k = 1{,}5$ и $k = 2$, тогда как при $k = 3$ и $k = 6$ пиковые значения Q снижаются, а сам пик смещается к более низким частотам. Таким образом, умеренная нерегулярность профиля проводника ($k \approx 1{,}5–2$) обеспечивает наилучший компромисс между добротностью и частотной стабильностью индуктивности.

Литература

1. Yu X., Huang W., Li M. Ultra-small, high-frequency and substrate-immune microtube inductors transformed from 2D to 3D // Scientific reports, 2015. Vol. 5. № 1. P. 9661.
2. Muniandy M., Mariappan S., Rajendran J., Idros N., Manaf A. A., Kumar N., Nathan A. A CMOS 65 nm On-Chip RF Inductor with Hybrid Spiral-Meander Layout Optimization and Ferroelectric Stack-Up Integration for Q-Factor Enhancement // Majlesi Journal of Electrical Engineering, 2025. Vol. 19. № 3.
3. Cañada J., López-Villegas J. M., Vidal N., Nagle S. F., Velásquez-García L. F. Geometry optimization of broadband, planar, spiral inductors via continuous trace width modulation // Scientific Reports, 2025. Vol. 15. № 1. P. 38728.
4. Kharbouch H., Hamid A., Lebey T. Using the variable width in a planar inductor on Kapton for optimizing its performance // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2017. Vol. 25. № 5. P. 3798–3810.
5. Chen H. H., Hsu Y. W. Analytic design of on-chip spiral inductor with variable line width // Electronics, 2022. Vol. 11. № 13. P. 2029.

УДК 621.3.049

Численное моделирование процесса лазерного отжига для формирования омических контактов к карбиду кремния

Джавадов Р. Р.[1], Маринов Д. Л.[1], Ковалёв А. С.[2]
[1] АО «Нанотроника»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский пр-т, 10, пом. 571
r.dzhavadov@nanotronica.ru, d.marinov@nanotronica.ru
[2] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
kovalev.alexand@yandex.ru

Выполнено численное моделирование наносекундного лазерного отжига тонкой пленки Ni на 4H-SiC при формировании омических контактов. Проанализировано влияние параметров лазерного импульса на характеристики реакционной зоны и удельное контактное сопротивление.
Ключевые слова: лазерный отжиг; карбид кремния; силицидообразование; омический контакт; численное моделирование.

Numerical simulation of laser annealing of nickel contacts to silicon carbide

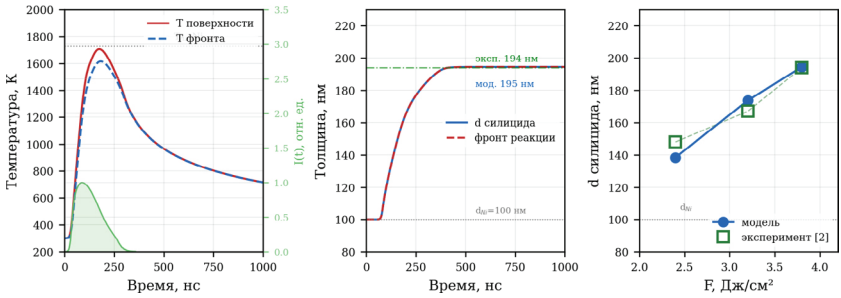
Dzhavadov R. R.[1], Marinov D. L.[1], Kovalev A. S.[2]
[1] Nanotronica JSC
10, room 571 Panfilovsky Ave., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
r.dzhavadov@nanotronica.ru, d.marinov@nanotronica.ru
[2] Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
kovalev.alexand@yandex.ru

Numerical simulation of nanosecond laser annealing of a thin Ni film on 4H-SiC has been performed for ohmic contact formation. The influence of laser pulse parameters on the characteristics of the reaction zone and the specific contact resistance is analyzed.
Keywords: laser annealing; silicon carbide; silicide formation; ohmic contact; numerical simulation.

Карбид кремния (4H-SiC) является одним из ключевых материалов для силовой электроники, обеспечивая приборам высокие рабочие напряжения, температуры и частоты коммутации. Критической технологической операцией при изготовлении приборов на основе SiC служит формирование низкоомных омических контактов к сильнолегированным областям, что традиционно достигается термическим отжигом никелевой металлизации при температурах порядка 1000 °C. Однако такой отжиг несовместим с последующими этапами формирования лицевой стороны прибора, поскольку приводит к деградации ранее созданных структур. Для решения этой проблемы применяется технология импульсного лазерного отжига [1], при которой локальный нагрев осуществляется энергией субмикросекундных лазерных импульсов. Оптимальный выбор режима обработки требует

количественной оценки связи параметров лазерного воздействия с характеристиками получаемого контакта.

В настоящей работе построена модель наносекундного лазерного отжига системы Ni/4H-SiC, включающая нестационарный теплоперенос, кинетику силицидообразования и перераспределение углерода. Учитывается изменение оптических и теплофизических свойств пленки по мере конверсии в силицид. Модель позволяет рассчитывать толщину реакционной зоны и контактное сопротивление. Установлено, что переход к омическому поведению связан с достижением сквозного плавления пленки никеля. Расчетная толщина силицида согласуется с экспериментальными данными (рис. 1). Результаты могут быть использованы при проектировании технологий изготовления силовых SiC-приборов.



а *б* *в*

Рис. 1. Результаты моделирования лазерного отжига системы Ni (100 нм) / 4H-SiC (XeCl, λ = 308 нм): *а*) температура поверхности и фронта реакции при F = 3,8 Дж/см^2 (зеленым — профиль импульса); *б*) рост силицидного слоя; *в*) толщина силицида в зависимости от плотности энергии в импульсе (квадраты — эксперимент [2])

Литература

1. Li G. et al. Fabrication of ohmic contact on N-type SiC by laser annealed process: a review // Crystals, 2023. Vol. 13. № 7. P. 1106. URL: https://doi.org/10.3390/cryst13071106.
2. Castorina S. Metalization on SiC surfaces: Ohmic contacts of Ni on 4H-SiC by laser treatment (Ph.D dissertation). University of Catania, Department of Physics and Astronomy “E. Majorana”. 2022.

УДК 544.723

Зависимость электронных свойств монослоев TMD и JTMD от линейной деформации и адсорбции аммиака

Свинкин Н. А.[1], к. ф.-м. н., Кондратьев В. М.[1,2], к. ф.-м. н., Круглов И. А.[1], д. ф.-м. н., Большаков А. Д.[1,2,3]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
svinkin.na@mipt.ru
[2] СПбАУ им. Ж. И. Алферова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8
[3] СПбГУ
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Методами теории функционала плотности с гибридным функционалом HSE исследовано влияние линейной деформации и адсорбции аммиака на электронные свойства монослоев TMD (MoS_2, $MoSe_2$, WS_2, WSe_2) и янус-TMD (MoSSe, WSSe). Установлены зависимости энергии адсорбции от деформации и предложена модель сенсорного отклика для потенциального применения в газовых сенсорах.
Ключевые слова: TMD; JTMD; монослой; DFT; сенсорика; NH_3; адсорбция; деформация.

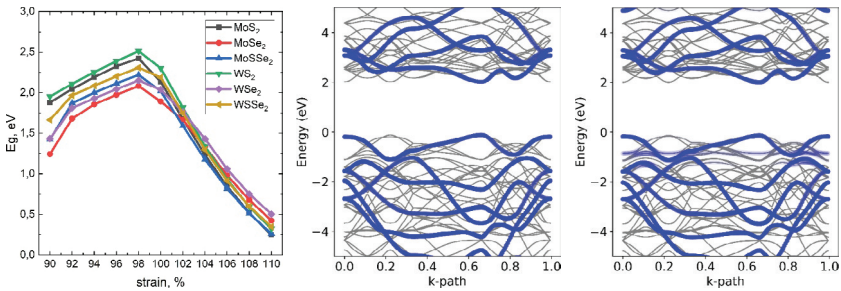
Study of the electronic properties of TMD and JTMD monolayers dependence on linear strain and ammonia adsorption

Svinkin N. A.[1], Ph.D, Kondratev V. M.[1,2], Ph.D, Kruglov I. A.[1], Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Bolshakov A. D.[1,2,3]
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
svinkin.na@mipt.ru
[2] Center for Nanotechnologies, Alferov University
8 Khlopina St., Saint Petersburg, 194021, Russia
[3] Saint Petersburg State University
7–9 Universitetskaya Embankment, St. Petersburg, 199034, Russia

The influence of linear strain and ammonia adsorption on the electronic properties of TMD (MoS_2, $MoSe_2$, WS_2, WSe_2) and Janus-TMD (MoSSe, WSSe) monolayers is studied using hybrid DFT (HSE) calculations. The adsorption energy dependence on deformation is determined, and a sensor response model is proposed for potential gas-sensing applications.
Keywords: TMD; JTMD; monolayer; DFT; sensorics; NH_3; adsorption; strain.

Работа посвящена теоретическому исследованию взаимодействия монослоев дихалькогенидов переходных металлов (TMD) и янус-TMD (JTMD) с молекулой аммиака (NH_3) с точки зрения перспектив создания газовых сенсоров для

применения в здравоохранении и мониторинге окружающей среды. Выбор материалов MoS_2, $MoSe_2$, MoSSe, WS_2, WSe_2 и WSSe обусловлен различием их электронных свойств, возникающих из-за комбинации разных металлов и халькогенов, а также внутренней асимметрии структуры, что позволяет провести систематический анализ механизмов сенсорного отклика [1, 2]. Методами теории функционала плотности (DFT) с использованием гибридного функционала HSE и сохраняющих норму псевдопотенциалов установлены изменения зонной структуры при адсорбции NH_3 и одноосной деформации. Определены зависимости энергии адсорбции аммиака на поверхность TMD и разные стороны JTMD от величины приложенной линейной деформации. Проведен сравнительный анализ результатов расчетов с учетом коэффициента Пуассона, взятого из литературы [3] и рассчитанного теоретически, и без его учета. Предложена модель сенсорного отклика, связывающая изменение электронных свойств с концентрацией аммиака, для последующей экспериментальной проверки.



а *б* *в*

Рис. 1. Зависимость ширины запрещенной зоны от деформации TMD и JTMD, strain = 100 % соответствует недеформированному кристаллу (а); зонная структура недеформированного MoS_2 (*б*); зонная структура недеформированного MoS_2 с адсорбированной молекулой NH_3 (*в*)

Свинкин Н.А. благодарит Российский научный фонд (Грант 24-12-00225) за поддержку исследования. Квантовохимическое моделирование проводилось с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.spbstu.ru).

Литература

1. 2D Janus Transition Metal Dichalcogenides: Properties and Applications / X. Tang, L. Kou // physica status solidi (b), 2022. Vol. 259. № 4. P. 2100562.
2. A Janus MoSSe monolayer: a superior and strain-sensitive gas sensing material / C. Jin, X. Tang, X. Tan, S. C. Smith, Y. Dai et al. // Journal of Materials Chemistry A, 2019. Vol. 7. № 3. P. 1099–1106.
3. Effect of strain on the band gap of monolayer MoS_2 / R. K. Sah, H. Tang, C. Shahi, A. Ruzsinszky, J. P. Perdew // Physical Review B, 2024. Vol. 110. № 14. P. 144109.

УДК 621.3.049.774

Температурная зависимость параметров уравнения Фаулера — Нордгейма в диоксиде кремния

Сорокин Д. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
dbmoksor@gmail.com

Исследована температурная зависимость туннельного тока МОП-конденсаторов в диапазоне температур от −60 до +125 °C. Параметры A и B уравнения Фаулера — Нордгейма извлечены методом наименьших квадратов. Аппроксимирующие функции A(T) и B(T) пригодны для интеграции в компьютерную модель ТПЗ.
Ключевые слова: туннельный ток; уравнение Фаулера — Нордгейма; МОП-конденсатор; ТПЗ; ЭСППЗУ; температурная зависимость.

Temperature Dependence of Fowler–Nordheim Equation Parameters in Silicon Dioxide

Sorokin D. V.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
dbmoksor@gmail.com

The temperature dependence of the tunneling current in MOS capacitors was studied in the range from −60 °C to +125 °C. The parameters A and B of the Fowler–Nordheim equation were extracted using the least-squares method. The approximating functions A(T) and B(T) are suitable for integration into a computer model of a floating-gate transistor.
Keywords: tunneling current; Fowler–Nordheim equation; MOS capacitor; floating-gate transistor; EEPROM; temperature dependence.

Туннельный ток Фаулера — Нордгейма (ФН) определяет перенос заряда через туннельный оксид в транзисторе с плавающим затвором (ТПЗ) ЭСППЗУ [1, 2]. Плотность туннельного тока характеризуется двумя параметрами $-A$ и B, зависящими от температуры вследствие изменения высоты потенциального барьера $\varphi_B(T)$ и эффективной массы носителя в оксиде [3, 4]. Сложный характер этих зависимостей делает необходимой экспериментальную экстракцию параметров с последующей аппроксимацией аналитическими функциями [5].

Измерения проводились на массиве из двадцати МОП-конденсаторов (n+-затвор поликремний — оксид dтун = 6,5 нм — n+-Si, площадь $S = 10^{-3}$ см^2) в диапазоне температур от −60 до +125 °C с помощью анализатора *Keysight B1500A* и вакуумной зондовой станции *PAV200*. Применялась двухсерийная схема: образец P1 — последовательные измерения при каждой точке; образцы P2–P6 — однократное измерение на одной фиксированной температуре.

Температурная зависимость туннельного тока при фиксированных напряжениях носила монотонный возрастающий характер. Температурный коэффициент

$dI_{ФН}/dT$ возрастал от 8 пА/°C при $V_G = 6$ В до 263 пА/°C при $V_G = 7$ В. Экспоненциальный характер зависимости указывает на критическое возрастание температурных эффектов при рабочих напряжениях записи-стирания (12–15 В). Результаты серий Р1 и Р2–Р6 совпадают в пределах погрешности измерений, что подтверждает воспроизводимость полученных зависимостей.

Параметры A и B извлекались из перестроенных в координаты ФН $[\ln(J/E^2) = f(1/E)]$ экспериментальных ВАХ методом наименьших квадратов для каждой температурной точки независимо. Наклон линейной аппроксимации в этих координатах определяет B, а отрезок, отсекаемый на оси ординат, — A. Погрешность извлечения оценивалась по доверительным интервалам коэффициентов МНК; для параметра A она составила до 12% при граничных температурах диапазона вследствие высокой чувствительности отрезка к флуктуациям тока при малых полях.

Параметры A и B, извлеченные методом наименьших квадратов из графика ФН, аппроксимированы линейными и квадратичными функциями температуры [5]. Квадратичная аппроксимация обеспечивает более высокий коэффициент детерминации: $R^2 = 0{,}988$ для $B(T)$ и $R^2 = 0{,}916$ для $A(T)$. Параметр B демонстрирует более стабильную температурную зависимость по сравнению с A, что соответствует его физической природе: B определяется в первую очередь высотой потенциального барьера φ_B, тогда как A чувствителен к изменению эффективной массы носителя и предэкспоненциальному множителю.

Полученные аналитические выражения интегрированы в компьютерную модель ТПЗ для моделирования операций записи и стирания в диапазоне от −60 до +125 °C.

Литература

1. Шелепин Н. А. Основные положения физико-математической модели элемента памяти с плавающим затвором в режимах записи/стирания // Микроэлектроника-2025: Сб. тез. — М.: Техносфера, 2025. — С. 382–383. — EDN: CTKOFH.
2. Сорокин Д. В., Шелепин Н. А. Расчет электрических характеристик режимов записи/стирания элементов энергонезависимой памяти на основе ТПЗ // Микроэлектроника-2025: Сб. тез. — М.: Техносфера, 2025. — С. 284–285. — EDN: MXLNIK.
3. Toumi S. et al. Effect of temperature on the Fowler-Nordheim barrier height in MOS capacitors // Physica B: Condensed Matter, 2020. Vol. 585. Art. 412125. DOI: 10.1016/j.physb.2020.412125.
4. Pananakakis G. et al. Temperature dependence of the Fowler–Nordheim current in metal-oxide-degenerate semiconductor structures // J. Appl. Phys., 1995. Vol. 78. № 4. P. 2635–2641. DOI: 10.1063/1.360124.
5. Сорокин Д. В., Шелепин Н. А. Температурная зависимость туннельного тока в оксиде кремния // Безопасность информационных технологий, 2026. — Т. 33. — № 2. — С. 11–17. — DOI: 10.26583/bit.2026.2.02.

УДК 621.382

Исследование влияния изменения конструкции субмикронного транзистора на уровень шума с использованием метода импедансного поля

Краснокутский Д. С.[1], Шелепин Н. А.[1,2], д. т. н.
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе представлено численное моделирование шумовых характеристик субмикронных транзисторов в широком диапазоне частот. Определены основные физические механизмы возникновения флуктуаций тока стока. Проведен анализ влияния конструктивных параметров транзистора на спектральную плотность мощности шума.
Ключевые слова: МДП-транзистор; низкочастотный шум; спектральная плотность мощности шума; генерационно-рекомбинационный шум; метод импедансного поля; шумовые механизмы; TCAD-моделирование.

Study of the impact of device structure variations on noise characteristics of submicron transistors using the impedance field method

Krasnokutskiy D. S.[1], Shelepin N. A.[1,2], Doctor of Technical Sciences
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[2] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

This work presents numerical modeling of the noise characteristics of submicron transistors over a wide frequency range. The physical mechanisms underlying drain current fluctuations are identified. The influence of transistor design parameters on the noise power spectral density is analyzed.
Keywords: MOSFET; low-frequency noise; noise power spectral density; generation-recombination noise; impedance field method; noise mechanisms; TCAD modeling.

Шум является одним из ключевых ограничивающих факторов, влияющих на стабильность и производительность интегральных схем. Например, в аналоговых схемах наблюдается значительный фазовый шум, а в цифровых схемах увеличивается частота логических ошибок с ростом уровня шума [1]. Поиск конструктивных решений для уменьшения уровня шума транзистора представляет собой сложный и многоступенчатый процесс [2]. Экспериментальное исследование изменения уровня шума является ресурсоемким и ограниченным по числу варьируемых параметров. В связи с этим особый интерес представляют методы численного моделирования шумовых характеристик, позволяющие в кратчайшие сроки оценить изменение спектральных характеристик шума в зависимости от выбранной структуры транзистора. Одним из эффективных с вычислительной точки зрения методов

расчета является метод импедансного поля, основная идея которого заключается в представлении флуктуаций тока или напряжения на контактах устройства как результата свертки функции Грина [3] и характеризующей локальный источник шума автокорреляционной функции.

В данной работе представлены результаты численного моделирования шумовых характеристик для различных структур транзисторов. В рамках моделирования подключаются модели генерационно-рекомбинационной, фликкер- и диффузионной составляющих шума. Расчет осуществляется на основе численного решения дрейф-диффузионной модели с введенными стохастическими источниками (источниками Ланжевена) в рамках малосигнального анализа с линеаризацией уравнений около рабочей точки.

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Результаты моделирования корректно отражают эффект увеличения уровня низкочастотного шума при уменьшении длины канала за счет увеличения вклада процессов захвата носителей заряда на ловушках вблизи интерфейса Si/SiO_2 в доминирующий механизм шума.
2. Отмечено, что спектральная плотность мощности шума уменьшается при увеличении ширины канала за счет роста числа носителей заряда и статистического усреднения вклада локальных источников шума.
3. Показано, что для pМОП-транзисторов уровень низкочастотного шума на несколько порядков ниже, а источником шума является рассеяние носителей заряда на акустических фононах кристаллической решетки, при этом моделирование позволяет отделить его вклад от генерационно-рекомбинационной составляющей.
4. Установлено, что изменение толщины подзатворного диэлектрика оказывает неоднозначное влияние на уровень шума. Это обусловлено конкуренцией между эффективностью взаимодействия носителей заряда с граничными ловушками в диэлектрике и одновременным изменением влияния отдельной ловушки на локальные флуктуации тока в канале.

Исследуемый метод позволяет установить влияние конструктивных параметров на уровень шума и выделить доминирующий стохастический механизм в структуре, что невозможно сделать, основываясь лишь на анализе экспериментально полученных шумовых характеристиках. В заключение отметим, что результаты моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, указанными в [4].

Литература

1. Teramoto A. Evaluation of low-frequency noise in MOSFETs used as a key component in semiconductor memory devices // Electronics, 2021. Vol. 10. № 15. P. 1759.
2. Marinov O., Deen M.J. Jiménez-Tejada Juan A. Low-frequency noise in downscaled silicon transistors: Trends, theory and practice // Phys. Rep., 2022. Vol. 990. P. 1–179.
3. Guerrieri S. D., Pirola M., Bonani F. Concurrent efficient evaluation of small-change parameters and Green's functions for TCAD device noise and variability analysis // IEEE Transactions on Electron Devices, 2017. Vol. 64. № 3. P. 1269–1275.
4. Ioannidis E. G., Leisenberger F. P., Enichlmair H. Low frequency noise investigation of n-MOSFET single cells for memory applications // Solid-State Electronics, 2019. Vol. 151. P. 36–39.

УДК 621.382.323

Приборно-технологическое моделирование FG MOSFET с учетом температуры

Бабурин А. И.[2], Силкин Д. С.[1], к. т. н., Попов Д. А.[1], к. т. н.
[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
da.popov@hse.ru
[2] Российский университет дружбы народов
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Одним из основных элементов современных полупроводниковых запоминающих устройств являются полевые транзисторы с плавающим затвором (FG MOSFET). Однако такие транзисторы мало исследованы с точки зрения температурной стойкости к высоким температурам. В работе разрабатывается приборно-технологическая модель FG MOSFET и исследуется ее работа в различных температурных режимах с помощью Synopsys TCAD.
Ключевые слова: FG MOSFET; флеш-память; температура; TCAD.

Modeling of a Field-Effect Transistor with Temperature Effects Considered

Baburin A. I.[2], Silkin D. S.[1], Ph.D, Popov D. A.[1], Ph.D
[1] National Research University Higher School of Economics (Moscow Institute of Electronics and Mathematics)
34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia
da.popov@hse.ru
[2] RUDN University
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russia

One of the key components of modern semiconductor memory devices is the floating-gate field-effect transistor (FG MOSFET). However, such transistors have been little studied in terms of thermal stability at elevated temperatures. This work develops a device-technology model of FG MOSFET structures and investigates their operation under various temperature conditions using Synopsys TCAD.
Keywords: FG MOSFET; flash memory; temperature; TCAD.

Основой современной флеш-памяти являются полупроводниковые МОП-транзисторы, изготавливаемые по технологии с плавающим затвором или с ловушкой заряда. Такие транзисторы позволяют записывать и в течение долгого промежутка времени сохранять заряд в своей структуре без питания.

Разработана приборно-технологическая модель полевого транзистора с плавающим затвором, изготовленного по технологии 180 нм [1]. На основе изученного принципа работы транзисторов с плавающим затвором и документации к Synopsys Sentaurus TCAD [2] были подобраны необходимые физические модели для эффектов туннелирования, изменения ширины запрещенной зоны, генерации-рекомбинации электронно-дырочных пар и описания ловушечных уровней [3, 4, 5].

На рис. 1 представлены распределение концентрации в рассматриваемой полупроводниковой структуре и переходные характеристики, иллюстрирующие запись и хранение заряда в плавающем затворе, полученные с использованием разработанной модели.

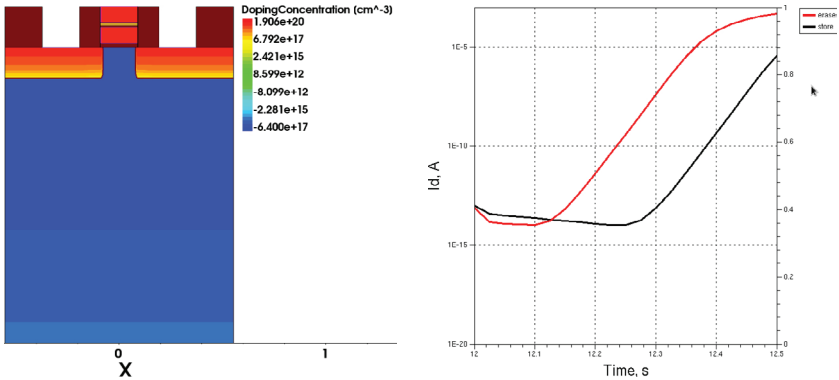


Рис. 1. Распределение концентрации в 180-нм FG MOSFET (слева) и переходные характеристики, иллюстрирующие запись и хранение заряда в плавающем затворе (справа)

Проведена оценка распределения температуры внутри полупроводниковой структуры в режиме хранения ($U_{ЗИ} = U_{СИ} = 0$ В) при различных температурах (от комнатной до 1500 K) и получены значения максимальной температуры внутри структуры. Также проведена оценка изменения сдвига порогового напряжения в зависимости от температуры.

Работа выполнена в рамках проекта ФИ-2025-4 НИУ ВШЭ.

Литература

1. Cong T. D. et al. Applications of TCAD Simulation Software for Fabrication and study of Process Variation Effects on Threshold Voltage in 180 nm Floating-Gate Device // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 2021. Vol. 6. № 1. P. 146–152.
2. TCAD Manual. X-2025.06.
3. Matteo F. et al. Advanced TCAD Simulation of Tunnel Oxide Degradation for EEPROM Applications // Proc. // IEEE 4th International Conference on Dielectrics (ICD 2022), Jul. 2022, Palermo, Italy. P. 764–768.
4. Charge Loss Mechanisms of Nitride-Based Charge Trap Flash Memory Devices // IEEE Transactions on Electron Devices, 2013. Vol. 60. № 10. P. 3256–3264.
5. Cho S. et al. Analyzing Various Structural and Temperature Characteristics of Floating Gate Field Effect Transistors Applicable to Fine-Grain Logic-in-Memory Devices // Micromachines, 2024. 15, 450. P. 1–14.

УДК 537.525

Сравнительный анализ физико-химических свойств плазмы HBr + Ar и HBr + He: влияние соотношения компонентов, давления и вкладываемой мощности

Цепкин М. В.[1,2], Ефремов А. М.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Предложена скорректированная модель плазмы HBr + Ar/He с учетом температуры газа и констант гетерогенной рекомбинации. Методами диагностики и моделирования изучено влияние состава, давления и мощности на электрофизические параметры и кинетику, формирующую стационарные концентрации частиц.
Ключевые слова: бромистый водород; гелий; аргон; индуктивно-связанная плазма; реактивное ионное травление; диссоциация; ионизация.

Comparative study of physical and chemical properties for HBr + Ar and HBr + He plasmas: effects of component ratio, pressure and input power

Tsepkin M. V.[1,2], Efremov A. M.[2]
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

A revised model of the HBr + Ar/He plasma has been proposed, considering the gas temperature and heterogeneous recombination constants. Diagnostic and modeling methods were used to study the effects of composition, pressure, and power on the electrophysical parameters and the kinetics governing the steady-state particle concentrations.
Keywords: hydrogen bromide; helium; argon; inductively coupled plasma; reactive ion etching; dissociation; ionization.

Реактивное ионное травление (РИТ) представляет собой инструмент структурирования поверхности кремниевых пластин и различных функциональных слоев, отличающийся высокой скоростью, приемлемой селективностью по отношению к фоторезистивным маскам и исключительной (по сравнению с жидкостными методами) анизотропией процесса [1]. Среди многообразия газов, обеспечивающих процессы РИТ, заметное место занимает бромистый водород. Основными достоинствами плазмы HBr являются малоинвазивное (с сохранением стехиометрии поверхности) травление полупроводников групп II-III и III-V, а также анизотропное травление моно- и поликристаллического кремния [2].

В реальных процессах РИТ обычно используется не индивидуальный бромистый водород, а его смеси с другими газами, в частности с аргоном. Роль последнего заключается в гомогенизации плазмы и усилении ионной составляющей скорости травления. На фоне значительного внимания исследователей к плазме HBr + Ar определенно менее изученной является смесь HBr + He. Известные работы по сравнительному исследованию этих смесей [2, 3] базируются на модельном подходе, недостатками которого являются ограниченный набор варьируемых параметров, некорректный учет температуры газа и констант скоростей гетерогенной рекомбинации атомов, а также отсутствие сравнения расчета с экспериментом. Целью нашей работы является устранение этих недостатков.

Эксперименты по диагностике плазмы проводились в реакторе планарного типа в условиях индукционного ВЧ-разряда (13,56 МГц). Данные по электрофизическим параметрам плазмы получали с помощью двойного зонда Ленгмюра. Концентрации атомов водорода определяли методом оптической актинометрии. В качестве аналитических максимумов были выбраны линии Ar 750,4 нм и H 656,4 нм. Для получения данных по стационарному составу плазмы использовалась 0-мерная кинетическая [2, 3] модель с данными зондовой диагностики в качестве входных параметров.

Обнаружено, что увеличение содержания Ar или He:

а) вызывает рост температуры электронов (из-за меньших потерь энергии электронов при столкновениях с атомными частицами);

б) снижает электроотрицательность плазмы;

в) приводит к противоположным изменениям как концентрации, так и плотности потока ионов.

Последнее явление обусловлено противоположными изменениями суммарных скоростей ионизации из-за существенной разницы в коэффициентах скоростей ионизации Ar и He. Важными особенностями плазмы HBr + Ar являются более медленное, чем линейное, падение концентрации атомов Br (из-за интенсификации диссоциации молекул HBr и Br_2 электронным ударом), а также увеличение концентрации атомов H (из-за снижения скорости их гибели в газовой фазе).

Установлено, что зависимости электрофизических параметров и состава плазмы от давления и вкладываемой мощности не имеют принципиальных отличий в смесях с Ar и He, при этом их характер соответствует аналогичным зависимостям для других молекулярных газов. Основным определяющим фактором здесь является изменение концентрации электронов при изменении баланса скоростей процессов ионизации, диссоциативного прилипания и гетерогенной гибели заряженных частиц. Показано, что расчетные концентрации атомов водорода имеют хорошее согласие с экспериментом. Это позволяет говорить об адекватности модели плазмы, а также корректности модельного анализа физико-химических свойств плазмы.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69.
2. Kwon K.-H. et al. A model-based analysis of plasma parameters and composition in HBr/X (X = Ar, He, N_2) inductively coupled plasmas // J. Electrochem. Soc., 2010. 157 (5). P. H574–H579.
3. Efremov A. M. et al. Plasma parameters and reactive ion etching kinetics of ZnO in hydrogen bromide: the influence of inert carrier gas // ChemChemTech, 2024. 67 (12). P. 87–95.

УДК 621.382.323

Сравнительный анализ процедур Python для определения параметров мощных МОП-транзисторов и тепловых параметров схем с ними для цифровых двойников электронных компонентов

Зубкова А. И., Харитонов И. А.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
Alex2000zu@yandex.ru

В работе рассматривается двухэтапный подход к идентификации параметров электротепловых моделей схем с мощными МОП-транзисторами: сначала определение параметров самого МОПТ, затем параметров электротепловой цепи. Проанализированы возможности подбора параметров электрической модели МОП-транзистора и подбора тепловых параметров общей тепловой цепи с использованием нескольких методов подбора системы Python: curve_fit, least_squares. Сделаны выводы о применимости и особенностях указанных процедур.
Ключевые слова: цифровой двойник; мощные МОПТ; электротепловая модель; Python Spice; тепловые переходные характеристики; curve_fit; least_squares.

Comparative analysis of Python procedures for identifying parameters of power MOSFETs and their associated thermal circuit parameters for digital twins of electronic components

Zubkova A. I., Kharitonov I. A.
National Research University Higher School of Economics
34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia
Alex2000zu@yandex.ru

The paper considers a two-stage approach to the identification of parameters in electro-thermal models of circuits containing power MOSFETs: first, the parameters of the MOSFET itself are determined, and then the parameters of the electro-thermal network are identified. The capabilities of Python-based fitting procedures for extracting the electrical model parameters of a power MOSFET and the thermal parameters of the common thermal network are analyzed using the curve_fit and least_squares methods. Conclusions are drawn regarding the applicability and specific features of these procedures.
Keywords: power circuit; power MOSFET; digital twin; SPICE simulation; electro-thermal model; Python Spice; Ltspice; ngspice.

Введение

При построении и параметрической идентификации инженерных моделей и цифровых двойников электронных компонентов (ЭК) важную роль играют методы численного подбора параметров моделей, которые позволяют согласовать расчетную зависимость с экспериментальными или эталонными данными [1]. В библиотеке

Python для таких задач широко применяются функции, которые относятся к инструментам нелинейной оптимизации: curve_fit и least_squares [5].

Функция curve_fit предназначена для подгонки параметров функции к набору данных, она ориентирована прежде всего на задачи аппроксимации и прямых зависимостей функции. Данная функция определяется как средство локальной оптимизации параметров модели для минимизации суммы квадратов невязок между моделью и данными [6]. Функция least_squares, в свою очередь, решает более общую задачу нелинейного метода наименьших квадратов. Она работает не только с готовой функцией отклика, но и с заданным вектором невязок. Данное отличие делает функцию curve_fit более универсальной для случаев, когда необходимо одновременно учитывать несколько наборов данных, объединять разные режимы эксперимента, вводить ограничения на параметры или использовать специальные функции потерь для уменьшения влияния выбросов. Функция least_squares описывается как решатель нелинейной задачи наименьших квадратов с ограничениями на переменные, а также с возможностью задания функции потерь, снижающей чувствительность решения к аномальным точкам [7].

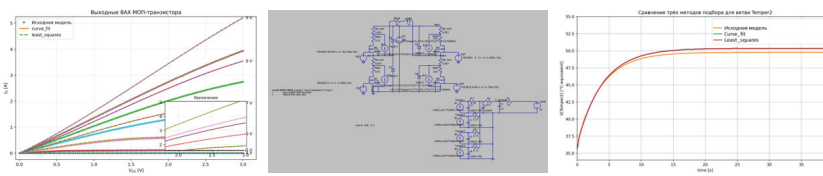
Сравнение результатов использования функций curve_fit и least_squares для подбора электрических и тепловых параметров ЭК

На первом этапе был производился подбор параметров модели МОП-транзистора с помощью двух методов подбора системы Python: curve_fit, least_squares. В качестве исходных данных использовались выходные ВАХ из разработанного цифрового двойника МОП-транзистора IRF610, полученные для набора напряжений затвор – исток [4].

На втором этапе выполнялся подбор тепловых параметров общей тепловой цепи МОПТ и радиатора с использованием этих же методов.

Во всех трех случаях получались близкие кривые: быстрый рост, последующее замедление и выход на стационарное состояние. Однако численные значения параметров моделей и отклонения от исходной кривой нагрева различались.

Метод curve_fit оказался наиболее точным при подгонке одной гладкой переходной характеристики. При использовании метода least_squares можно видеть отклонения от исходной кривой примерно на 5 процентов. Его преимущество проявляется в том, что он позволяет явно задавать структуру невязки, весовые коэффициенты и дополнительные ограничения. Это делает метод предпочтительным для последующего перехода к многорежимной идентификации.



а *б* *в*

Рис. 1. Выходные ВАХ МОП транзистора IRF610, полученные методами curve_fit и least_squares (*а*), анализируемая схема (*б*) и сравнение температурных зависимостей схемы (*в*) с тепловыми параметрами, определенными ранее (эталонными значениями), и с функциями curve_fit и least_squares

Взаимодействие процедуры оптимизации и SPICE строилось по внешней итерационной схеме. На каждом шаге оптимизации формировался новый набор параметров модели транзистора или тепловой подсхемы. Эти параметры передавались в SPICE-модель, после чего выполнялся расчет требуемой характеристики — выходной ВАХ или переходной температурной зависимости.

Итерационный процесс продолжался до достижения минимума функции ошибки или до соответствия другому критерию остановки.

Заключение

Практическое сравнение методов показало, что обе процедуры применимы для задачи подбора параметров модели мощного МОП-транзистора по выходным ВАХ и параметров электротепловой схемы. Оба подхода дают близкие результаты по точности.

Метод curve_fit оказался удобнее в подготовке расчета, так как для него достаточно задать модель и массивы эталонных данных.

Метод least_squares требует более сложной подготовки, поскольку необходимо явно формировать функцию невязки, а при необходимости еще и веса для отдельных участков характеристики. Однако именно least_squares дает большую гибкость, если нужно по-разному учитывать разные области ВАХ, например малые напряжения, область насыщения или точки с повышенной погрешностью.

Поэтому для простой подгонки одной зависимости удобнее использовать curve_fit, а для более сложных инженерных задач с несколькими режимами и настраиваемым критерием ошибки –least_squares.

Литература

1. Andrei Velcescu. Using power MOSFETs in DC motor control applications // [Электронный ресурс] URL: https://www.nexperia.com/applications/interactive-app-notes/IAN50004_using-power-MOSFETs-in-DC-motor-control-applications (дата обращения: 01.02.2025).
2. SPICE Differentiation. Michael Engelhardt // [Электронный ресурс] URL: https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/spice-differentiation.html (дата обращения: 21.03.2025).
3. Comparison Between SPICE Simulators // [Электронный ресурс] URL: https://electronics.stackexchange.com/questions/18760/comparison-between-spice-simulators (дата обращения: 15.05.2025).
4. Зубкова А. И., Харитонов И. А. Разработка цифровых двойников для мощных МОП транзисторов // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов имени Е. В. Арменского –2023.
5. Sergio Vinagrero Gutiérrez. Python Framework for Modular and Parametric SPICE Netlists Generation // Electronics, 2023, 12 (18). P. 3970.
6. SciPy API Reference // SciPy Documentation.

УДК 621.382

Комплексная методика проектирования ММИС К/Ка-диапазона с учетом воздействия электромагнитных помех

Новиков П. Э., Корсак К. В., Ловшенко И. Ю.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
220013, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 6
p.novikov@bsuir.by

Представлена методика сквозного проектирования микроволновых монолитных интегральных схем (ММИС) на основе соединений A^3B^5. Реализована экстракция параметров моделей ASM-HEMT и MEXTRAM 504, синтез малошумящего усилителя (МШУ) (S21 > 20 дБ, NF < 3 дБ, Mu > 1), реализован учет воздействия электромагнитных помех (ЭМП) через добавление к активным элементам схемы параметризированных источников токов.
Ключевые слова: ММИС; К/Ка-диапазон; ASM-HEMT; MEXTRAM; экстракция параметров; электромагнитные помехи.

Comprehensive Design Methodology for K/Ka-Band MMICs Accounting for EMI Degradation

Novikov P. E., Korsak K. V., Lovshenko I. Yu.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
6 P. Brovki Street, Minsk, 220013, Belarus, p.novikov@bsuir.by

A comprehensive methodology for end-to-end design of III–V-based microwave monolithic integrated circuits (MMICs) is presented. Parameter extraction for ASM-HEMT and MEXTRAM 504 models was implemented, along with the synthesis of a low-noise amplifier (LNA) (S21 > 20 dB, NF < 3 dB, Mu > 1). The impact of electromagnetic interference (EMI) was accounted for by integrating parametrized current sources into the active circuit elements.
Keywords: MMIC; K/Ka-band; ASM-HEMT; MEXTRAM; parameter extraction; electromagnetic interference.

Аппаратура К/Ка-диапазона требует повышенной помехозащищенности. Существующие подходы к проектированию ММИС часто игнорируют деградацию характеристик под ЭМП на этапе схемотехнического моделирования [1, 2]. Цель исследования –разработка комплексной методики проектирования ММИС на основе A^3B^5 с учетом влияния ЭМП.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- согласованный маршрут прибор –компактная модель –схема –топология с верифицированной экстракцией параметров ASM-HEMT и MEXTRAM 504;
- подход к моделированию ЭМП посредством параметризованных источников шума и соответствующих поправок к моделям;

- методика оптимизации конструктивно-технологических параметров, снижающая уровни шумов на 60–96 % без потери рабочих характеристик.

Погрешность экстракции составила ≤ 10 % для MEXTRAM и до 42 % в области низких токов для ASM-HEMT. На схемотехническом уровне МШУ обеспечил *S*21 > 20 дБ, *NF* < 3 дБ, *Mu* > 1 в полосе 18–40 ГГц (рис. 1). После топологической оптимизации *S*21 уменьшился до ~ 10 дБ в полосе 25–28 ГГц при сохранении безусловной устойчивости.

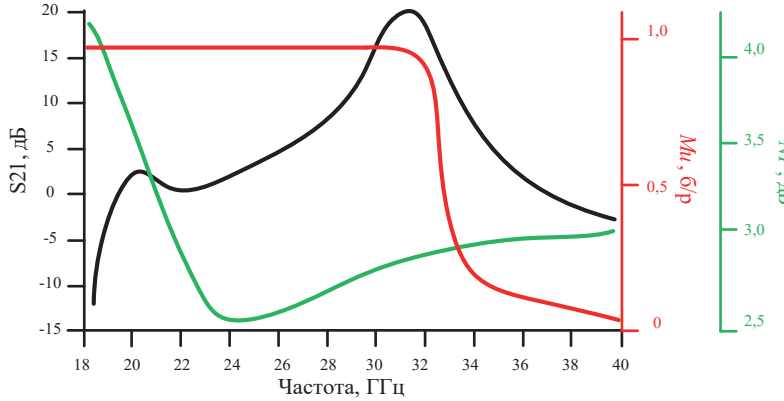


Рис. 1. Частотные зависимости S21, NF и Mu малошумящего усилителя в диапазоне 18–40 ГГц

Таким образом, предложенный подход обеспечивает предсказуемость характеристик ММИС на всех этапах проектирования и позволяет количественно оценивать устойчивость к ЭМП.

Литература

1. Khandelwal S. Advanced SPICE Model for GaN HEMTs (ASM-HEMT): A New Industry-Standard Compact Model for GaN-based Power and RF Circuit Design. Springer Nature, 2022. 188 p.
2. Yu X. et al. Nonlinear and Permanent Degradation of GaAs-Based Low-Noise Amplifier Under Electromagnetic Pulse Injection // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019. Vol. 62. № 1. P. 101–107.

УДК 621.383.51

Численное моделирование и оптимизация перовскитного солнечного элемента с инвертированной архитектурой с использованием TCAD-подходов

Козлов С. В., Муратова Е. Н., к. т. н., Гаджей А. О.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
vkozlovsergey@gmail.com, sokolovaeknik@yandex.ru, gajartem@mail.ru

Численное моделирование перовскитного солнечного элемента с акцентом на инвертированную *p-i-n*-архитектуру методами TCAD. Оценено влияние толщины и энергетических параметров транспортных слоев и плотности дефектных состояний на интерфейсах на ВАХ и КПД устройства.
Ключевые слова: перовскитные солнечные элементы; численное моделирование; TCAD; инвертированная архитектура; транспортные слои.

Numerical modeling and optimization of a perovskite solar cell with inverted architecture using TCAD approaches

Kozlov S. V., Muratova E. N., Ph.D, Gadgey A. O.
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, letter F Professora Popova St., Saint Petersburg, 197376, Russia
vkozlovsergey@gmail.com, gajartem@mail.ru sokolovaeknik@yandex.ru

Numerical TCAD-based simulation of a perovskite solar cell focusing on the inverted (p-i-n) architecture. The influence of transport-layer thickness and energy parameters and of interfacial defect-state density on the I–V characteristics and efficiency of the device is analyzed.
Keywords: perovskite solar cells; numerical modeling; TCAD; inverted architecture; transport layers.

В работе проводится численное моделирование перовскитного солнечного элемента с акцентом на инвертированной *p-i-n*-архитектуре в целях анализа влияния параметров интерфейсов и энергетического согласования слоев на его характеристики. Рассматривается многослойная структура, включающая дырочно-транспортный слой (ДТС), перовскитный поглощающий слой и электронно-транспортный слой (ЭТС). Выполнен сравнительный анализ различных перовскитных материалов и материалов транспортных слоев с учетом их энергетических параметров и влияния на процессы переноса и рекомбинации носителей заряда.

Моделирование основано на решении системы уравнений дрейфа-диффузии и уравнения Пуассона, используемых в TCAD-подходах для описания переноса носителей заряда в полупроводниковых гетероструктурах [3, 4]. Исследуется влияние параметров слоев, включая их толщину, энергетические уровни и плотность дефектных состояний на интерфейсах, на ключевые характеристики устройства: напряжение холостого хода, плотность тока короткого замыкания, фактор заполнения и коэффициент полезного действия.

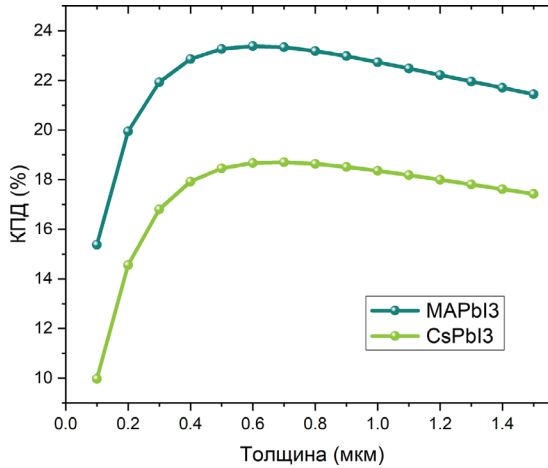


Рис. 1. Зависимость КПД перовскитного солнечного элемента от толщины активного слоя для материалов MAPbI3 и CsPbI3

Зависимость КПД от толщины активного слоя имеет ярко выраженный максимум в диапазоне 0,6–0,8 мкм для обоих рассмотренных перовскитных материалов (рис. 1). При этом структуры на основе MAPbI3 демонстрируют существенно более высокие значения КПД во всем исследованном диапазоне толщин, что обусловлено более широким спектральным диапазоном поглощения по сравнению с CsPbI3.

Показано, что увеличение плотности дефектных состояний на границе перовскит/ЭТС приводит к усилению рекомбинационных потерь и снижению фактора заполнения, что согласуется с ранее опубликованными результатами [1]. Установлено, что параметры транспортных слоев, включая их толщину и энергетическое согласование с перовскитным слоем, определяют эффективность извлечения носителей заряда. Определены оптимальные диапазоны параметров, обеспечивающие минимизацию рекомбинационных потерь при сохранении эффективного переноса носителей.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: построена и верифицирована TCAD-модель перовскитного солнечного элемента, учитывающая дефектные состояния на интерфейсах перовскит/ДТС и перовскит/ЭТС; выполнен совместный анализ влияния толщины и энергетического согласования транспортных слоев на ВАХ устройства; определены оптимальные диапазоны параметров транспортных слоев и допустимая плотность интерфейсных дефектов, при которых сохраняются высокий фактор заполнения и КПД; полученные зависимости могут служить количественными ориентирами при проектировании реальных экспериментальных образцов с инвертированной архитектурой.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и оптимизации перовскитных солнечных элементов с повышенной эффективностью.

Литература

1. Muratova E. N., Ryabko A. A., Moshnikov V. A., Vrublevsky I. A., Maximov A. I., Tuchkovsky A. K. Electron transport, charge transfer and localized states of charge carriers in nanosized anodic TiO_2 films // Nanomanufacturing, 2026. Vol. 6. № 1. DOI: 10.3390/nanomanufacturing6010006.
2. Муратова Е. Н., Мошников В. А., Врублевский И. А., Алешин А. Н. Способы повышения эффективности преобразования энергии солнечных элементов на основе допированных перовскитных ячеек // 7-я Школа молодых ученых в рамках Российского форума «Микроэлектроника». Сириус, 2025. — С. 447–448.
3. Gadgey A., Kozlov S., Muratova E. Modeling of perovskite solar cells // ElCon Conference of Young Researchers in Electrical Engineering, Automation & Control Systems (ElCon-EE). Saint Petersburg, 2026. P. 44–48. DOI: 10.1109/ElCon-EE69794.2026.11452693.
4. Козлов С. В., Кривошеева А. Н., Муратова Е. Н. Моделирование перовскитных солнечных элементов // XIII научно-практическая конференция «Наука настоящего и будущего». Санкт-Петербург, 2025. — Т. 3. — С. 18–22.

УДК 546.26, 537.226.86

Моделирование влияния формы верхнего электрода на чувствительность датчика деформации на основе легированных азотом углеродных нанотрубок

Соболева О. И.[1], Полывянова М. Р.[1], Чебручан Е. В.[1], Ильина М. В.[2], д. ф.-м. н.
[1] Научно-исследовательская лаборатория технологии функциональных наноматериалов, Южный федеральный университет
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
[2] Передовая инженерная школа, Южный федеральный университет
347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81
osotova@sfedu.ru

Представлены результаты моделирования влияния формы верхнего электрода на выходные параметры чувствительного элемента датчика деформации на основе легированных азотом углеродных нанотрубок. Показана эффективность применения пирамидального электрода.
Ключевые слова: датчик деформации; COMSOL Multiphysics; углеродные нанотрубки; пьезоэлектричество.

Modeling of the effect of the shape of the upper electrode on the sensitivity of a strain sensor based on nitrogen-doped carbon nanotubes

Soboleva O. I.[1], Polyvianova M. R.[1], Chebruchan E. V.[1], Il'ina M. V.[2], Sc.D
[1] Southern Federal University, Research Laboratory of Functional Nanomaterials Technology
2 Shevchenko St., Taganrog, 347922, Russia
[2] Southern Federal University,
Advanced Engineering School "Cyber Platforms Engineering"
81 Petrovskaya St., Taganrog, 347900, Russia
osotova@sfedu.ru

The results of modeling the effect of the shape of the upper electrode on the output parameters of the sensing element of a strain sensor based on nitrogen-doped carbon nanotubes are presented. The effectiveness of using a pyramidal electrode is shown.
Keywords: strain sensor; comsol multiphysics; carbon nanotubes; piezoelectricity.

В современном мире датчики деформации (ДД) являются одной из составляющих создания Интернета вещей и интерфейсов человек –машина [1]. Легированные азотом углеродные нанотрубки (N-УНТ) являются перспективным материалом для пьезоэлектрических ДД [2]. При этом активно проводится разработка конструкции ДД для эффективного преобразования внешнего воздействия в выходной сигнал. Цель данной работы –моделирование влияния формы верхнего электрода на выходные параметры ДД на основе N-УНТ.

Моделирование было выполнено в программном пакете *COMSOL Multiphysics* в модулях *Solid Mechanics* и *Electrostatics*, объединенных интерфейсом *Piezoelectic Effect*. Конструкции чувствительного элемента ДД на основе N-УНТ с разными

формами электродов представлены на рис. 1. Длина N-УНТ составила 2 мкм, внешний диаметр ~75 нм. Для моделирования пьезоэлектрических свойств в N-УНТ были сформированы бамбукообразные перемычки диаметром 60 нм и толщиной 2 нм. Величина пьезоэлектрического коэффициента перемычек была задана 72 и 48 Кл/м^2 для продольного и поперечного направления. При моделировании нижний электрод и основание N-УНТ были зафиксированы, вершина оставалась свободной. Деформация N-УНТ моделировалась путем смещения верхнего электрода на 100 нм вниз.

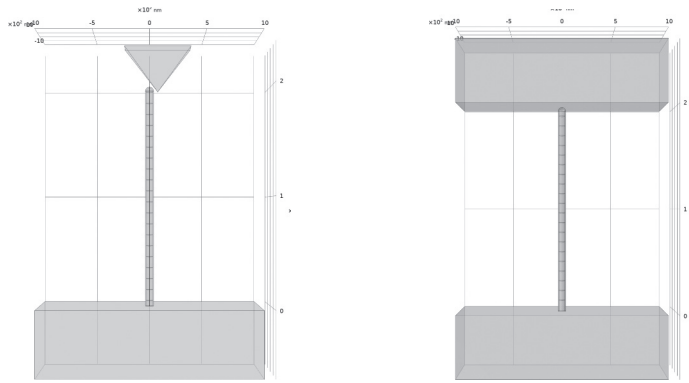


Рис. 1. Конструкции чувствительного элемента ДД с разными формами верхнего электрода

На рис. 2 представлены распределения поверхностного потенциала (ПП) при деформации N-УНТ. При смещении верхнего электрода N-УНТ отклоняется в сторону, в результате чего максимальное механическое напряжение и ПП формируются у основания N-УНТ. В модели с пирамидальным электродом величина ПП составила от 20,98 до -33,93 мВ, с плоским –от 218,34 до -259,77 мВ. Также важно отметить, что при смещении электрода грань, взаимодействующая с вершиной N-УНТ, испытывает силу реакции, противонаправленную силе воздействия на N-УНТ, величина которой составляет 1,52 мкН для пирамидального электрода и 9,91 мкН для плоского, при этом вершина N-УНТ отклоняется на 71,96 и 560,64 нм соответственно. Так, чувствительность к деформациям модели с пирамидальным электродом составила ~18 мВ/мкН, а для плоского –~24 мВ/мкН. Однако применение пирамидального электрода позволяет детектировать меньшие внешние воздействия за счет большей свободы движения N-УНТ.

Полученные результаты моделирования подтверждены экспериментально. На массиве N-УНТ высотой 2,13±0,13 мкм и диаметром 66,8±23,1 нм методом силовой спектроскопии и атомно-силовой микроскопии (АСМ) была измерена величина тока, генерируемого при деформации. В качестве верхнего электрода применялся АСМ-зонд *NSG10* с пирамидальным острием. Величина детектируемого тока составила 0,45 нА при силе воздействия 1,5 мкН, что с учетом ранее измеренного сопротивления N-УНТ 103 МОм [3] соответствует величине ПП 46 мВ. Расхождение результатов моделирования и экспериментальных, вероятно, связано с тем, что

в процессе измерения с острием АСМ-зонда контактировало несколько N-УНТ, создавая параллельное подключение к измерительной цепи.

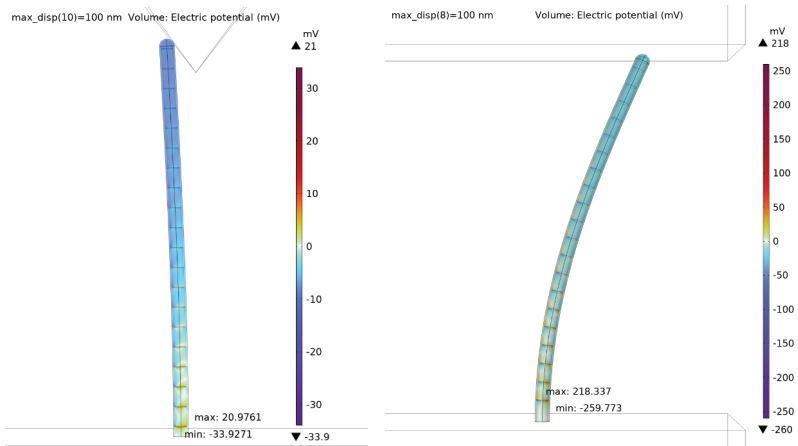


Рис. 2. Распределение поверхностного потенциала при деформации N-УНТ

В работе представлены результаты моделирования влияния формы верхнего электрода на выходные параметры чувствительного элемента датчика деформации на основе N-УНТ. Показана эффективность применения пирамидального электрода и приведено экспериментальное подтверждение полученных результатов.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 25-79-10302 в ЮФУ.

Литература

1. Luo Y. et al. Technology Roadmap for Flexible Sensors // ACS Nano, 2023. Vol. 17. № 6. P. 5211–5295.
2. Il'ina M. et al. Pyrrole-like defects as origin of piezoelectric effect in nitrogen-doped carbon nanotubes // Carbon N. Y. Elsevier Ltd, 2022. Vol. 190. P. 348–358.
3. Соболева О. И., Ильин О. И., Ильина М. В. Семнадцатая Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология», 4–6 июня 2025 года. –Москва, г. Троицк, 2025. — С. 126–127.

УДК 546.26, 537.226.86

Моделирование поверхностного потенциала вертикально ориентированных углеродных нанотрубок в зависимости от геометрических параметров для разработки высокочувствительных сенсоров

Полывянова М. Р.[1], Яковенко М. С.[1], Ильина М. В.[2]
[1] Южный федеральный университет, научно-исследовательская лаборатория технологии функциональных наноматериалов
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корпус Е
[2] Южный федеральный университет, Передовая инженерная школа
347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 83
polyvianova@sfedu.ru

В работе выполнено моделирование деформации и поверхностного потенциала углеродной нанотрубки, легированной азотом (N-УНТ), в зависимости от их длины. Установлено, что увеличение длины N-УНТ с 1 до 10 мкм приводит к росту деформации и поверхностного потенциала, что обусловлено снижением изгибной жесткости и увеличением числа бамбукообразных перемычек.
Ключевые слова: высокочувствительный сенсор; N-УНТ; бамбуковые перемычки; пьезоэлектрический эффект.

Modeling of the surface potential of vertically aligned carbon nanotubes depending on geometric parameters for the development of highly sensitive sensors

Polyvianova M. R.[1], Yakovenko M. S.[1], Il'ina M. V.[2], Sc.D
[1] Southern Federal University,
Research Laboratory of Functional Nanomaterials Technology
2 Shevchenko St., Taganrog, 347922, Russia
[2] Southern Federal University,
Advanced Engineering School "Cyber Platforms Engineering"
83 Petrovskaya St., Taganrog, 347900, Russia
polyvianova@sfedu.ru

The paper simulates the deformation and surface potential of a carbon nanotube doped with nitrogen (N-CNT) depending on their length. It was found that an increase in the length of N-CNTs from 1 to 10 microns leads to an increase in deformation and surface potential, which is due to a decrease in bending stiffness and an increase in the number of bamboo-like bridges.
Keywords: highly sensitive sensor; N-CNT; bamboo jumpers; piezoelectric effect

Современное развитие портативной электроники, носимых устройств и имплантируемых медицинских систем требует создания высокочувствительных гибких и автономных датчиков. Высокочувствительные пьезоэлектрические сенсоры (ПЭС) преобразовывают механическую энергию в электрическую, обеспечивая детектирование внешнего воздействия без источника питания. Однако существующие

материалы, которые используются для создания ПЭС, обладают низким пьезомодулем, что ограничивает чувствительность, являются токсичными и хрупкими, что делает их непригодными для носимой электроники [1, 2]. В данной работе предлагается использовать вертикально ориентированные углеродные нанотрубки, легированные азотом (N-УНТ). N-УНТ являются перспективным функциональным материалом для создания ПЭС, так как обладают аномальными пьезоэлектрическими свойствами и высокими механическими параметрами [3].

Целью данной работы является исследование влияния геометрических параметров N-УНТ на величину поверхностного потенциала под действием верхнего электрода.

Расчеты деформации и поверхностного потенциала (ПП) N-УНТ были выполнены в пакете *COMSOL Multiphysics*. В работе использовался модуль MEMS, включающий в себя расчетные интерфейсы *Solid Mechanics* и *Electrostatics*. Конструкция включает верхний электрод (ВЭ), N-УНТ и нижний электрод (рис. 1). Для имитации внешнего воздействия к ВЭ прикладывалась сила величиной 3,5 мкН, вызывающая деформацию N-УНТ. Длина N-УНТ варьировалась от 1 до 10 мкм.

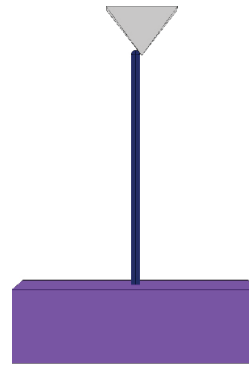


Рис. 1. Расчетная модель на основе N-УНТ

В результате численного моделирования установлено, что величина деформации N-УНТ под действием силы 3,5 мкН, приложенной к вершине ВЭ, существенно зависит от ее длины. Увеличение длины N-УНТ с 1 до 10 мкм приводит к изменению осевого смещения с 2,5 до 14,5 нм соответственно. Таким образом, более протяженные N-УНТ демонстрируют большую величину деформации при одинаковой внешней нагрузке. Это объясняется тем, что короткие N-УНТ обладают большей изгибной жесткостью, что затрудняет их смещение при одинаковом воздействии.

Также была исследована зависимость пьезоэлектрического потенциала (ПП) от длины N-УНТ. Увеличение длины нанотрубки от 1 до 10 мкм приводит к возрастанию генерируемого ПП с −25 до −208 мВ соответственно (рис. 2*а*). Наибольшее значение потенциала наблюдается вблизи вершины N-УНТ, что объясняется локализацией максимальной деформации именно в этой области.

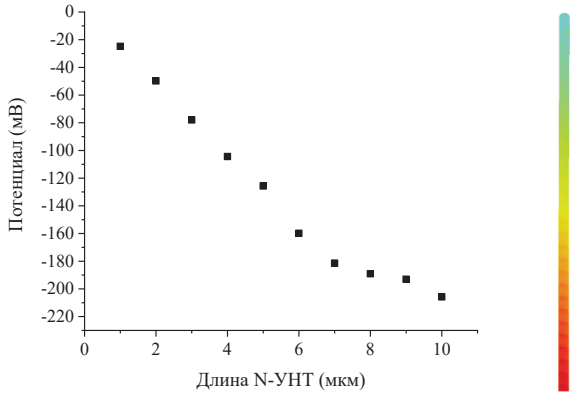


Рис. 2. Зависимость величины ПП от длины N-УНТ вблизи вершины (*а*) и распределение ПП вдоль N-УНТ (*б*)

Это связано с тем, что более длинные N-УНТ сильнее деформируются при одинаковой приложенной силе, а величина ПП прямо пропорциональна степени деформации. Кроме того, источниками пьезоэлектрического отклика в N-УНТ являются бамбукообразные перемычки, формирующиеся за счет дефектов пиррольного типа. Увеличение длины N-УНТ сопровождается ростом количества таких дефектных структур, что приводит к возрастанию суммарного ПП.

В данной работе представлены результаты исследования зависимости ПП от геометрических параметров N-УНТ. Установлено, что увеличение длины N-УНТ с 1 до 10 мкм приводит к росту механической деформации. ПП также возрастает с увеличением длины, что обусловлено увеличением деформации и ростом количества бамбукообразных перемычек. Полученные результаты могут быть использованы при создании высокочувствительного сенсора на основе массива N-УНТ.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 25-79-10302 в Южном федеральном университете.

Литература

1. Cao X. et al. Piezoelectric Nanogenerators Derived Self-Powered Sensors for Multifunctional Applications and Artificial Intelligence // Adv. Funct. Mater., 2021. Vol. 31. № 33.
2. Wang X., Jin C., Bai Z. Review of carbon nanotube-based flexible wearable strain sensors: From materials to applications for human body // Sensors Actuators A Phys., 2025. Vol. 395. P. 117071.
3. Il'ina M. et al. Pyrrole-like defects as origin of piezoelectric effect in nitrogen-doped carbon nanotubes // Carbon N. Y. Elsevier Ltd, 2022. Vol. 190. P. 348–358.

УДК 546.26:537.226.86:681.586

Моделирование резонансной частоты чувствительного элемента сенсора деформации на основе легированных азотом углеродных нанотрубок

Хомленко Д. Н.[1], Горбунов Н. Г.[2], Шиков А. З.[2], Ильин О. И.[1], к. т. н., Ильина М. В.[2], д. ф.-м. н.

[1] Южный федеральный университет, научно-исследовательская лаборатория технологии функциональных наноматериалов
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
khomlenko@sfedu.ru
[2] Передовая инженерная школа «Инженерия киберплатформ» Южного федерального университета
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2

Представлены результаты моделирования резонансных характеристик, легированных азотом углеродных нанотрубок (N-УНТ), используемых в чувствительном элементе энергоэффективного сенсора деформации. Установлено влияние смещения верхнего электрода сенсора, высоты и диаметра N-УНТ на собственные частоты колебаний N-УНТ.
Ключевые слова: углеродные нанотрубки; легирование азотом; сенсор деформации; резонансная частота; собственные моды; COMSOL Multiphysics.

Modeling the Resonant Frequency of a Strain Sensor Sensing Element Based on Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes

Khomlenko D. N.[1], Gorbunov N. G.[2], Shikov A. Z.[2], Il'in O.I.[1], Ph.D, Il'ina M. V.[2], Sc.D

[1] Southern Federal University,
Research Laboratory of Functional Nanomaterials Technology
2 Shevchenko St., Taganrog, 347922, Russia
[2] Advanced Engineering School "Cyberplatform Engineering",
Southern Federal University
2 Shevchenko St., Taganrog, 347922, Russia
khomlenko@sfedu.ru

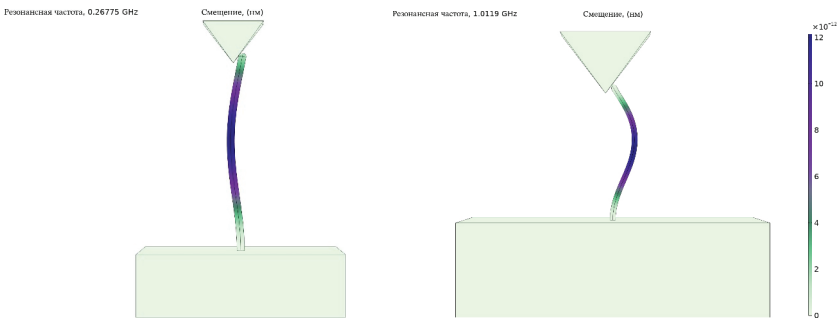
The results of modeling the resonance characteristics of nitrogen-doped carbon nanotubes (N-CNTs) used in the sensing element of an energy-efficient strain sensor are presented. The effects of the displacement of the upper sensor electrode and the height and diameter of N-CNTs on the natural vibration frequencies of N-CNTs were established.
Keywords: carbon nanotubes; nitrogen doping; strain sensor; resonant frequency; eigenmodes; COMSOL Multiphysics.

Энергоэффективные сенсоры деформации востребованы в носимой электронике и системах мониторинга, поскольку позволяют регистрировать механические воздействия при малом энергопотреблении [1]. Перспективным материалом для таких сенсоров являются легированные азотом углеродные нанотрубки (N-УНТ), в которых внедрение азота и формирование бамбукообразных дефектов вызывают

аномальный пьезоэлектрический эффект [2, 3]. Цель работы — определить диапазон резонансных частот сенсора деформации на основе N-УНТ и влияние смещения верхнего электрода и геометрических параметров N-УНТ на его резонансные характеристики.

Для создания энергоэффективного сенсора деформации необходимы N-УНТ с общей концентрацией азота не менее 8 ат. %, при которой проявляется аномальный пьезоэлектрический эффект [2, 3]. В связи с этим были выращены четыре образца массивов N-УНТ С1–С4 с общей концентрацией азота 8,4–12,6 ат. %, концентрацией пиррольного азота 1,3–2,2 ат. %, высотой 0,9–2,5 мкм и диаметром 55,5–75,2 нм.

Для определения резонансных характеристик чувствительного элемента сенсора на основе таких структур в *COMSOL Multiphysics* была построена трехмерная параметрическая модель одиночной N-УНТ с внутренними бамбукообразными перемычками. Расчет выполнялся в два этапа: на шаге *Stationary* определялось преддеформированное состояние при заданном смещении верхнего пирамидального электрода, на шаге *Eigenfrequency* — собственные частоты относительно полученного преднапряженного состояния. В первой серии расчетов использовалась геометрия N-УНТ с высотой H = 2 мкм, внешним d_{ex} = 75 нм и внутренним d_{in} = 60 нм диаметрами, выбранная как характерная для экспериментального диапазона параметров образцов С1–С4, при смещении верхнего электрода от 25 до 150 нм (рис. 1*а*). Во второй серии исследовалось влияние высоты N-УНТ в диапазоне 500–5000 нм. При этом d_{ex} изменялся пропорционально H по соотношению $d_{ex} = 75 \cdot H/2000$, а $d_{in} = 0{,}8 \cdot d_{ex}$, смещение верхнего электрода принималось равным 10 % от высоты трубки (рис. 1*б*).



а *б*

Рис. 1. Иллюстрация собственных форм колебаний N-УНТ:
а) при смещении верхнего электрода 75 нм и высоте УНТ 2000 нм;
б) при смещении верхнего электрода 100 нм и высоте УНТ 1000 нм

Установлено, что смещение верхнего электрода существенно влияет на частоты первых четырех мод. При 125 нм достигались максимальные действительные частоты 1,43; 1,76; 3,07 и 3,93 ГГц. При 150 нм частоты снижались до 0,50; 1,24; 1,60 и 2,09 ГГц. Во второй серии расчетов рост высоты N-УНТ сопровождался снижением частот. Для H = 500 нм частоты 1–4-й мод составляли 2,64; 5,89; 6,59 и 8,96 ГГц,

для H = 1000 нм — 1,01; 2,57; 3,26 и 5,80 ГГц. При H = 2000 нм резонансная частота составляла 0,54 ГГц, а при H ≥ 3000 нм система становилась неустойчивой. Следовательно, резонансные характеристики сенсора определяются предварительным смещением верхнего электрода и геометрией N-УНТ. Для структур высотой порядка 0,9–1,2 мкм первые четыре моды лежат в гигагерцевом диапазоне, тогда как при увеличении высоты до 2 мкм и более устойчивость низших мод ухудшается.

Работа выполнена при поддержке гаранта РНФ № 25-79-10302 в ЮФУ.

Литература

1. Chen Y., Zhang X., Lu Ch. Flexible piezoelectric materials and strain sensors for wearable electronics and artificial intelligence applications // Chem. Sci., 2024. Vol. 15. P. 16436–16466.
2. Il'ina M.V., Soboleva O.I., Polyvianova M.R., Rudyk N.N., Pankov I.V., Khomlenko D.N., Il'in O.I. Development of a nitrogen-doped carbon nanotube nanogenerator for mechanical energy harvesting // Carbon Letters, 2025. Vol. 35. P. 2307–2317.
3. Il'ina M.V., Rudyk N.N., Soboleva O.I., Polyvianova M.R., Khubezhov S.A., Il'in O.I. Study of the Effect of Growth Temperature on the Properties of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes for Designing Nanopiezotronic Devices // Technical Physics, 2024. Vol. 69. № 7. P. 1979–1985.

УДК 621.793.162

Моделирование методом Монте-Карло процесса зарастания пленки TiN, формируемой в процессе АСО на поверхности кремниевой пластины

Раводина А. М.[1,2], Зюзин С. С.[1,2], Резванов А. А.[1,2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В данной работе описана и реализована математическая модель атомно-слоевого осаждения (АСО) слоя нитрида титана на основе кинетического метода Монте-Карло и теории переходного состояния, непосредственно учитывающая технологические параметры процесса. С помощью данной модели были оптимизированы параметры процесса АСО нитрида титана для уменьшения шероховатости поверхности и увеличения скорости роста слоя.
Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение; АСО; кинетический метод Монте-Карло; нитрид титана.

Monte Carlo simulation of the process of growing of a TiN film formed during the ALD process on the surface of a silicon wafer

Ravodina A. M.[1,2], Zyuzin S. S.[1,2], Rezvanov A. A.[1,2]
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
1A Kerchenskaya St., Bldg. 1, Moscow, 117303, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

This paper describes and implements a mathematical model for atomic layer deposition (ALD) of a titanium nitride layer based on the kinetic Monte Carlo method and transition state theory, directly accounting for the process parameters. Using this model, the ALD process parameters for titanium nitride were optimized to reduce surface roughness and increase the layer growth rate.
Keywords: atomic layer deposition; ALD; kMC; TiN.

В настоящее время атомно-слоевое осаждение (АСО) является ключевым методом формирования тонких пленок с высоким аспектным соотношением, в частности нитрида титана (TiN), используемого в качестве барьерного слоя [1, 2] при производстве КМОП-транзисторов. Одной из основных проблем при масштабировании технологических процессов является обеспечение равномерности зарастания пленки на начальных этапах осаждения, когда формируется сплошность покрытия. Дефекты морфологии на стадии зарождения пленки могут приводить к образованию пустот, увеличению шероховатости и, как следствие, ухудшению электрических характеристик готовых структур [3].

Экспериментальное исследование кинетики зарастания на атомарном уровне является крайне сложной задачей. В связи с этим большое значение приобретает

компьютерное моделирование, позволяющее прогнозировать влияние управляющих параметров процесса (температуры, давления, длительности импульсов) на стехиометрию, морфологию и однородность покрытия. Традиционные методы молекулярной динамики ограничены по времени моделирования (наносекунды) и не могут описать полный цикл АСО, длящийся секунды [4]. В данной работе для преодоления этого разрыва используется кинетический метод Монте-Карло (мМК), который позволяет моделировать эволюцию поверхности в течение технологически значимых времен при сохранении атомарного разрешения.

В основе мМК лежит представление о системе, эволюционирующей через редкие события — скачкообразные переходы между дискретными состояниями, которые описываются марковским процессом. Вероятность перехода из состояния *i* в состояние *j* определяется константой скорости k_{ij}. В рамках работы рассматривается модель плазмостимулированного АСО TiN с использованием прекурсора TDMAT (тетракис(диметиламино)титан) и NH_3. Для этого был определен набор из более чем 15 элементарных реакций (событий), включающих адсорбцию, десорбцию, поверхностные реакции восстановления и лигандного обмена, который с достаточной точностью описывает процесс без лишних вычислительных нагрузок.

Расчет констант скоростей термически активируемых реакций (например лигандный обмен) производился с использованием теории переходного состояния (уравнение Эйринга):

$$k_{ij} = k_0 \frac{k_B T}{h} exp\left(\frac{-E_{ij}}{k_B T}\right), \quad (1)$$

где E_{ij} — энергия активации, полученная из первопринципных расчетов (DFT). Для реакций адсорбции использовалась формула из кинетической теории газов:

$$k_{ads} = \frac{P\sigma(T,\theta)S}{\sqrt{2\pi m k_B T}}. \quad (2)$$

Временная эволюция системы моделируется следующим образом: на каждом шаге генерируется случайное число ρ_1 для определения времени на изменение состояния ($\Delta t = -\ln(\rho_1)/k_{tot}$, где k_{tot} –это суммарная скорость всех возможных переходов в системе) и второе случайное число ρ_2 для выбора конкретного пути реакции пропорционально его константе скорости k_{ij} (см. рис. 1). Такой подход позволяет статистически корректно удовлетворять основному кинетическому уравнению.

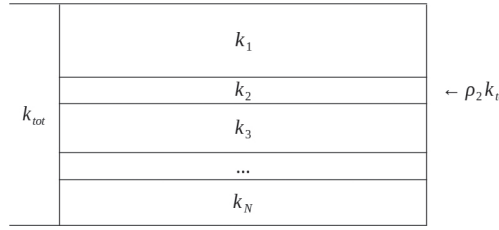


Рис. 1. Иллюстрация процесса выбора нового состояния

Проведенное моделирование позволяет воспроизвести начальные стадии роста пленки TiN и оценить влияние параметров процесса на рост слоя. Разработанная модель может быть использована для оптимизации рецептов АСО, позволяя подбирать ключевые параметры процесса (такие как, например, температура и времена импульсов), минимизирующие шероховатость и дефектность тонких пленок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-91-06002, https://rscf.ru/project/23-91-06002.

Литература

1. Kim J.Y. et al. Remote plasma enhanced atomic layer deposition of TiN thin films using metalorganic precursor // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2004. Vol. 22. № 1. P. 8–12.
2. Knoops H.C. M. et al. Deposition of TiN and TaN by remote plasma ALD for Cu and Li diffusion barrier applications // Journal of the Electrochemical Society, 2008. Vol. 155. № 12. P. G287–G294.
3. George S.M. Atomic layer deposition: an overview // Chemical reviews, 2010. Vol. 110. № 1. P. 111–131.
4. Shankar S., Simka H., Haverty M. Density functional theory and beyond—opportunities for quantum methods in materials modeling semiconductor technology // Journal of Physics: Condensed Matter, 2008. Vol. 20. № 6. P. 064232.

УДК 621.383

Конструктивно-технологические методы улучшения параметров активного пикселя матричного КМОП-сенсора

Свинцов Р. О.[1], Панышев К. А.[2], к. т. н.
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В работе выполнена экстракция ключевых параметров активного пикселя матричного КМОП-фотоприемника с использованием TCAD-моделирования. Проведена оценка различных компонент темнового тока фотодиода, ухудшающего динамический диапазон работы сенсора. Проанализировано влияние конструкции и технологических режимов формирования структуры 4Т-пикселя на величину полной емкости прибора и коэффициент преобразования заряда в напряжение.
Ключевые слова: КМОП-сенсор; активный 4Т-пиксель; полная емкость фотодиода; источники темнового тока фотодиода; коэффициент преобразования заряда в напряжение; динамический диапазон; TCAD-моделирование.

Design and process methods for improving parameters of CMOS active-pixel image sensor

Svintsov R. O.[1], Panyshev K. A.[2], Ph.D
[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

In this work, key parameters of the CMOS active-pixel image sensor were extracted using TCAD simulation. Various components of the photodiode dark current, which reduces CIS dynamic range, were estimated. The impact of the design parameters and process conditions of the 4T active pixel on Full Well Capacity and conversion gain was analyzed.
Keywords: CMOS image sensor; 4T active pixel; Full Well Capacity (FWC); sources of the photodiode dark current; conversion gain; dynamic range; TCAD simulation.

Интерес, проявляемый в настоящий момент к использованию КМОП-сенсоров в приложениях потребительской электроники, связан с целым рядом их характеристик. Высокое качество изображения и быстродействие, относительно низкая стоимость – эти и многие другие достоинства КМОП-сенсоров обуславливают востребованность в широком спектре систем, от компактных цифровых камер до средств медицинской визуальной диагностики [1].

Конструкция активного 4Т-пикселя включает фоточувствительную область (фотодиод) и четыре транзистора, формирующих систему накопления и переноса

заряда, преобразования его в уровень напряжения и дальнейшего усиления сигнала. Улучшение динамического диапазона прибора, подавление темнового тока и эффекта смазывания изображения является время- и ресурсозатратным процессом, что обуславливает необходимость применения средств численного моделирования. Расчет отдельных компонент темнового тока, снижение потенциального барьера при переносе заряда, определение полной емкости прибора в данной работе осуществлялись с использованием 2D-структуры активного пикселя. Модель оптической генерации рассчитывает количество сгенерированных электронно-дырочных пар при воздействии света видимого диапазона по принципу «один фотон = одна пара». Заданы граничные условия и учтены как рекомбинационные, так и оптические потери, связанные с отражением части света от поверхности прибора при фронтальном освещении (Front-Side Illumination –FSI). Режим работы пикселя определяется в соответствии с циклограммой управляющих напряжений, контролирующих процесс накопления заряда и считывания опорного и сигнального уровней.

Основные результаты работы могут быть сформированы следующим образом.

1. Выполнена оценка различных составляющих темнового тока в фотодиоде: выявлена доминирующая компонента, связанная с наличием поверхностных состояний (оборванных связей или так называемых P_b-центров [2]) на границе Si-SiO_2, снижающая динамический диапазон работы прибора. На основании результатов моделирования сформированы рекомендованные конструктивные ограничения на буферную область пикселя, позволяющие подавить уровень паразитного тока без значительного снижения полезного коэффициента заполнения (Fill Factor).
2. Показано, что процесс переноса заряда из фоточувствительной области в плавающий узел может быть блокирован потенциальным барьером, возникающим на границе фотодиод –канал транзистора переноса. Эффект напрямую связан с профилем концентрации примесей в $P^+/N/P^-$ структуре; в целях точного определения границ *p*-*n*-перехода и локального распределения бора и фосфора были откалиброваны технологические модели сегрегации и диффузии примеси с использованием экспериментальных данных вторичной ионной масс-спектроскопии (ВИМС).
3. Установлено, что полная емкость пикселя ограничена не технологическими режимами формирования фотодиода, а конструкцией плавающего узла: для этого была проведена экстракция параметра FWC на тестовых структурах. Сформирован критерий, определяющий максимальное время экспозиции.
4. Определены технологические режимы формирования *P*-кармана, позволяющие подавить паразитный эффект обратного перетекания заряда (spill-back) при закрытии транзистора переноса.

В ходе исследования было продемонстрировано влияние конструктивно-технологических параметров на ключевые характеристики КМОП-сенсора с активным пикселем и установлена необходимость точного контроля профиля примеси и возникающих электрических полей вблизи перехода фотодиод –транзистор переноса с использованием средств численного моделирования. Результаты моделирования в удовлетворительной степени сходятся с экспериментальными данными

для матричных КМОП-фотоприемников с разрешением 128×128 пикселей с проектными нормами 180 нм.

Литература

1. Сафонов А. Матричные КМОП-фотоприемники: современное состояние и перспективы развития // Электроника, 2019. — № 2 (183). — С. 140–154.
2. Fleetwood, D.M., & Schrimpf, R.D. (Eds.). Defects in Microelectronic Materials and Devices (1st ed.). CRC Press, 2008.

УДК 538.911

Применение молекулярно-динамического моделирования для исследования эволюции кластеров ксенона при облучении кремния низкоэнергетичными ионами

Подорожний О. В., Румянцев А. В., Боргардт Н. И.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
podorozhniy_oleg@rambler.ru

Проведено моделирование облучения монокристаллической подложки кремния ионами ксенона с энергиями 5 и 8 кэВ методом молекулярной динамики. Исследованы процессы эволюции кластеров, образованных имплантированными атомами ксенона.
Ключевые слова: молекулярная динамика; ионная имплантация; образование кластеров; кремний; ксенон.

Application of molecular dynamics simulation to study the behavior of xenon clusters after irradiation of silicon with low-energy ions.

Podorozhniy O. V., Rumyantsev A. V., Ph.D, Borgardt N. I., Sc.D
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
podorozhniy_oleg@rambler.ru

Molecular dynamics simulation was performed to study the irradiation of a single-crystal silicon substrate by xenon ions with energies of 5 and 8 keV. The formation and evolution of clusters created by implanted xenon atoms were investigated.
Keywords: molecular dynamics; ion implantation; cluster formation; silicon; xenon.

Метод фокусированного ионного пучка (ФИП) широко применяется в нанотехнологиях для прецизионного формирования различных структур. С развитием плазменных источников ионов все большее значение в методе ФИП получают ионы Xe^+, использование которых позволяет достичь больших величин тока пучка [1] и существенно повысить скорость распыления материала. Для описания нарушенной области образца, включая образование кластеров имплантированными атомами пучка, часто применяется моделирование методом молекулярной динамики (МД).

В работе проведено моделирование облучения подложки кремния Si(100) ионами Xe^+ с энергиями 5 и 8 кэВ и дозой 10^{16} $см^{-2}$ методом МД в программном пакете *LAMMPS*. Поперечные сечения МД-ячеек в направлении [110], полученные при промежуточных значениях дозы облучения, показаны на рис. 1*а–в*. Найденные в ходе моделирования позиции атомов использовались для описания распределения имплантированных атомов Xe в образце.

Поскольку при облучении образца Si ионами Xe^+ происходит формирование имплантированными атомами кластеров, интерес представляет исследование их эволюции. На рис. 1*г,д* представлены графики зависимостей от дозы облучения размера в атомах наибольшего кластера Xe, а также среднего размера крупнейших кластеров с числом атомов больше ста, полученные при моделировании методом

МД. Из приведенных кривых видно, что при облучении ионами с энергией 5 и 8 кэВ они имеют схожий немонотонный характер с локальными максимумами и минимумами, находящимися при различных значениях дозы. Это связано со смещением к поверхности образца в процессе облучения наибольших кластеров Xe, приводящим к дегазации имплантированных атомов из подложки.

Из рис. 1*г*,*д* следует, что на начальном этапе до дозы примерно $2{,}5 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ размеры кластеров Xe в образце, облученном ионами с энергией 5 кэВ, превышают размеры кластеров, образовавшихся при облучении ионами с энергией 8 кэВ. Это объясняется тем, что ионы с энергией 5 кэВ имеют меньшую длину пробега и глубину имплантации, следовательно, имплантированные атомы оказываются сосредоточены в меньшей области, что способствует образованию ими кластеров. При дальнейшем повышении дозы облучения большая глубина залегания атомов Xe при облучении ионами с энергией 8 кэВ затрудняет их дегазацию с поверхности образца, из-за чего максимальное значение размера кластеров в этом случае оказывается выше, чем при облучении ионами с энергией 5 кэВ.

Помимо этого, в данном исследовании проведена термическая релаксация полученных при МД-моделировании структур, не оказавшая существенного влияния на кластеры имплантированных атомов Xe, хотя ранее было установлено, что эта процедура позволяет добиться количественного совпадения ширины переходной области между аморфным и кристаллическим материалом с экспериментальным значением [2]. Это говорит о том, что формирование кластеров происходит главным образом в процессе бомбардировки образца ионами, а не в результате перераспределения атомов после облучения.

Таким образом, в работе с помощью моделирования методом МД был исследован процесс формирования и эволюции кластеров, образованных имплантированными атомами Xe, при облучении образцов монокристаллического Si ионами с энергиями 5 и 8 кэВ. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными, приведенными в [2].

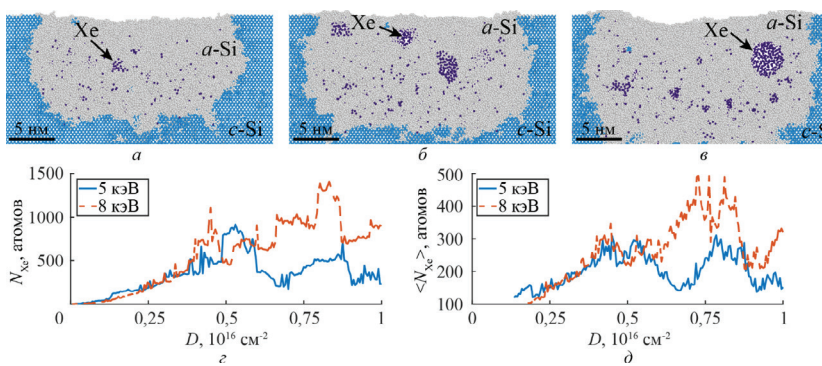


Рис. 1. Поперечное сечение МД-ячейки образца Si, облученного ионами Xe^+ с энергией 5 кэВ при дозе облучения, равной 10^{15} (*а*); $2{,}5 \cdot 10^{15}$ (*б*) ; $5 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ (*в*). Зависимости размера в атомах N_{Xe} наибольшего кластера имплантированного Xe (*г*) и среднего размера кластеров с $N_{Xe} > 100$ (*д*) от дозы облучения при моделировании методом МД

Литература

1. Smith N. S., Notte J. A., Steele A. V. Advances in source technology for focused ion beam instruments // MRS Bulletin, 2014. Vol. 39. № 4. P. 329–335.
2. Podorozhniy O. V., Rumyantsev A. V., Kireev G. S. et al. Structure of crystalline silicon bombarded with low-energy xenon ions studied using electron microscopy and molecular dynamics simulations // Appl. Surf. Sci., 2026. Vol. 717. P. 164764.

УДК 621.3.049

Исследование процесса резистивного переключения элемента хранения ReRAM на основе оксида гафния с помощью сеточных методов и KMC

Козлов А. К.[1,2], Ганыкина Е. А.[1,2], к. ф.-м. н., Резванов А. А.[1,2], к. ф.-м. н.
[1] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В данной работе описана и реализована физико-математическая модель резистивного переключения филаментарного типа на основе кинетического метода Монте-Карло (KMC –kinetic Monte Carlo) и сеточного метода (метода конечных объемов). Были получены основные характеристики элемента хранения резистивной памяти на основе оксида гафния и было проведено сравнение полученных характеристик между собой.
Ключевые слова: резистивная память; резистивное переключение; оксид гафния; кинетический метод Монте-Карло; KMC.

Study of the resistive switching process of hafnium oxide-based ReRAM storage element using grid methods and KMC

Kozlov A. K.[1,2], Ganykina E. A.[1,2], Ph.D, Rezvanov A. A.[1,2], Ph.D
[1] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

This paper describes and implements a physico-mathematical model of filamentary-type resistive switching based on the Kinetic Monte Carlo (KMC) method and a grid method (the finite volume method). The main characteristics of a resistive memory storage element based on hafnium oxide were obtained, and a comparison of these characteristics was performed.
Keywords: resistive memory; resistive switching; hafnium oxide; Kinetic Monte Carlo method, KMC.

Традиционные виды памяти, такие как DRAM и флеш-память, сталкиваются с ограничениями энергопотребления и масштабирования. В связи с этим потребовалась разработка альтернативных видов памяти, таких как SCM — storage class memory, основанных на новых физических принципах (MRAM, FeRAM, PCAM, ReRAM) [1]. ReRAM (резистивная память с произвольным доступом) основана на явлении скачкообразного изменения электрического сопротивления активного слоя при подаче внешнего напряжения [2]. Ввиду своих основных преимуществ – высокой масштабируемости, высокой скорости перезаписи (~нс) и низкому энергопотреблению (~10 пДж) [3], данный вид памяти является наиболее востребованным.

В данной работе рассматривались элементы хранения ReRAM на основе оксида гафния, так как ранее уже были продемонстрированы успешные попытки получения ячеек с данным активным слоем с необходимыми параметрами [4], а во-вторых, оксид гафния повсеместно используется в КМОП-производстве [5].

Для стека Ti/HfO_2/TiN было продемонстрировано резистивное переключение филаментарного типа [4, 6]. Однако данный тип переключения обладает большим недостатком –стохастической природой роста и разрыва проводящего канала внутри слоя диэлектрика [4]. Для исследования резистивного переключения в таких структурах прибегают к математических моделям атомарного и постатомарного уровня, где рассматриваются отдельные частицы или их непрерывные концентрации соответственно. Феноменологическая модель данного типа переключения описывается процессом восстановления и разрыва проводящего канала, состоящего из вакансий кислорода, с учетом влияния локального нагрева из-за джоулевых потерь. Для математического описания и реализации физико-математической модели был использован кинетический метод Монте-Карло, который позволяет учитывать дискретную и случайную природу процессов, а также модель дрейф-диффузии и термодиффузии с учетом генерации и рекомбинации ионов и вакансий кислорода.

По результатам проведенного моделирования были получены распределения концентрации кислородных вакансий, температуры, электрического поля, характерные напряжения переключения, вольт-амперная характеристика. Также было проведено сравнение между двумя подходами к моделированию, были описаны преимущества и недостатки рассмотренных моделей.

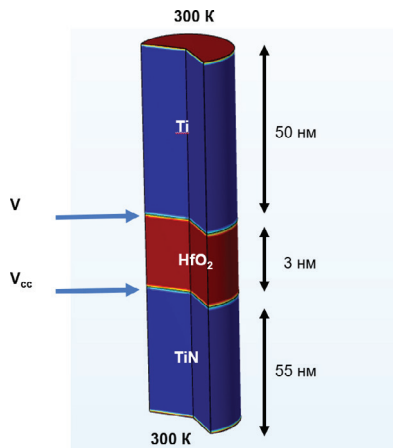


Рис. 1. Объект моделирования и граничные условия для сеточного метода

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-91-06003, https://rscf.ru/project/23-91-06003.

Литература

1. Красников Г. Я., Орлов О. М., Макеев В. В. Исследование эффекта переключения и транспорта заряда в бесформовочном мемристоре на основе нитрида кремния с разными типами металла верхнего электрода // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2020. — № 1. — С. 42–46.
2. Резванов А. А. и др. Использование пористых материалов в качестве буферного слоя в мемристорных структурах // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 1. — С. 69–86.
3. Алексеева Л. Г. и др. Мемристор –новый наноразмерный элемент многоуровневой нейроподобной логики // Биотехносфера, 2016. — № 3–4 (45–46). — С. 73–78.
4. Govoreanu B. et al. 10×10 nm^2 Hf/HfO_x crossbar resistive RAM with excellent performance, reliability and low-energy operation // International Electron Devices Meeting, 2011. P. 31.6.
5. Егоров К. В. Резистивное переключение в структурах металл –изолятор –металл на основе оксида гафния и оксида тантала, формируемых атомно-слоевым осаждением: дис. ... канд. физ.-мат. наук. –Москва, 2019.
6. Cabout T. et al. Role of Ti and Pt electrodes on resistance switching variability of HfO_2-based resistive random-access memory // Thin Solid Films, 2013. Vol. 533. P. 19–23.

УДК 621.396.6:004.891

Методика прогнозирования надежности электронных средств с применением методов машинного обучения

Кацнельсон А. И., Костиков Д. В., Полесский С. Н., к. т. н.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
akatsnelson@hse.ru, dan-kos1@yandex.ru, spolessky@hse.ru

Обоснована актуальность прогноза интенсивности отказов ЭКБ при устаревших справочниках. Методика — регрессия по конструктивно-электрическим признакам; массив — свыше 20 тыс. записей; модели по классам ЭРИ (MAPE, SHAP); верификация ускоренными испытаниями; модуль расчета надежности схем в LTspice.
Ключевые слова: надежность радиоэлектронной аппаратуры; электронная компонентная база; интенсивность отказов; машинное обучение; регрессионный анализ; ускоренные испытания; LTspice; градиентный бустинг; SHAP

Reliability prediction methodology for electronic systems based on machine learning techniques

Katsnelson A. I., Kostikov D. V., Polessky S. N., Ph.D
National Research University Higher School of Economics
20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russia
akatsnelson@hse.ru, dan-kos1@yandex.ru, spolessky@hse.ru

The relevance of predicting failure rates for electronic components under outdated handbook data is substantiated. The methodology uses regression on structural and electrical features; a dataset of over twenty thousand records; class-specific models (MAPE, SHAP); accelerated-test validation; and a software tool for schematic reliability estimation in LTspice.
Keywords: radio electronic equipment reliability; electronic component base; failure rate; machine learning; regression analysis; accelerated testing; LTspice; gradient boosting; SHAP.

Оценка надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) традиционно опирается на справочные значения базовой интенсивности отказов $\lambda_б$ (при +25 °C и номинальной электрической нагрузке) и коэффициенты учета режимов и условий эксплуатации. В зарубежной практике интенсивность отказов часто выражают в FIT (Failure In Time — число отказов на 10^9 часов наработки) и связывают с MTTF. Действующие справочники (MIL-HDBK-217, IEC TR 62380, «Надежность ЭРИ» и др.) часто не отражают параметры современной электронной компонентной базы (ЭКБ), а формирование новых справочников требует длительных испытаний и подконтрольной эксплуатации. Натурное подтверждение показателей безотказности ресурсоемко, поэтому актуален переход к предиктивной оценке показателей надежности по конструктивно-технологическим и электрическим признакам элементов [1—4].

Цель иссследования –разработка методики прогнозирования интенсивности отказов ЭКБ методами машинного обучения, ее экспериментальная верификация и встраивание в контур схемотехнического моделирования (LTspice). Задачи –обзор справочных подходов, сбор и унификация данных о параметрах и показателях надежности, построение регрессионных моделей по классам электрорадиоизделий (ЭРИ), ускоренные испытания, программный модуль расчета надежности схем.

Сбор и подготовка данных

Источниками данных послужили открытые материалы производителей и дистрибьюторов (*Taiwan Semiconductor, Texas Instruments, RS, Future Electronics, onsemi, ROHM* и др.): PDF-отчеты по надежности, табличные выгрузки и динамический контент сайтов. Извлечение выполнялось с применением парсинга (Beautiful Soup, Selenium). Сформирован массив свыше 20 тыс. наблюдений по основным классам ЭКБ (резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, реле, интегральные микросхемы и др.). Целевой показатель –интенсивность отказов (FIT) либо связанный с ней MTBF; признаки –конструктивные (тип корпуса, число выводов, габариты) и электрические (напряжения, токи, мощность, температурный диапазон и др.). Выполнены фильтрация признаков с высокой долей пропусков, приведение единиц измерения к единому виду и разбиение составных полей на отдельные признаки.

Модели машинного обучения

Поскольку набор признаков существенно различается по классам ЭРИ, регрессионные модели строились отдельно для каждого класса. Сравнивались линейная регрессия, ансамбли на основе деревьев решений и градиентный бустинг (CatBoost, XGBoost, LightGBM), а также AutoML-подходы (LightAutoML, AutoGluon). Качество оценивалось по средней абсолютной процентной ошибке (MAPE), для интерпретации использовался метод SHAP. Линейная регрессия показала неприемлемо высокую ошибку и далее не рассматривалась. Наилучшие результаты по большинству классов получены моделями градиентного бустинга (прежде всего CatBoost) после подбора гиперпараметров. Для практического применения дополнительно построены облегченные модели с сокращенным набором признаков (для конденсаторов MAPE –порядка 23 %, для диодов –около 29 %), что снижает требования к полноте исходных данных при умеренной потере точности.

Таблица 1. Ориентировочные показатели качества моделей (MAPE) для отдельных классов ЭРИ

Класс ЭРИ	Лучшая модель	MAPE, %
Конденсаторы (облегченная)	CatBoost	≈23
Диоды (облегченная)	CatBoost	≈29
Резисторы	Градиентный бустинг	Близко к 0*

* Для резисторов при ограниченном числе информативных признаков (тип корпуса, предельная рассеиваемая мощность и др.) достигается практически точное восстановление справочных оценок.

Анализ SHAP показал, что вклад признаков согласуется с инженерными представлениями о факторах надежности (корпус, электрические нагрузки, температурные характеристики). Сопоставление прогнозов со справочником «Надежность ЭРИ» для диодов и конденсаторов дало среднюю абсолютную процентную ошибку порядка 18 и 13% соответственно, что сопоставимо с расхождением справочных и экспериментальных оценок.

Ускоренные испытания

Для верификации моделей разработан измерительный стенд, включающий коммутационную, измерительную и испытательную части. Коммутация обеспечивает режимы 3,3 / 5 / 12 В и циклы включения-выключения; измерительный блок на базе АЦП MCP3008 и микроконтроллера AVR 328P снимает вольт-амперные характеристики; испытательные платы рассчитаны на одновременную работу до 21 объекта в термокамере. Ускоряющие факторы (температура, влажность, циклы включения-выключения) учитывались по РДВ 319.01.11-98 и ГОСТ Р 27.013-2019 (модель Эйринга, перемножение коэффициентов ускорения). Тестируемые образцы диодов и конденсаторов исключались из обучающей выборки. Полученные экспериментальные оценки интенсивности отказов согласуются с прогнозами моделей в пределах, сопоставимых с неопределенностью справочных данных.

Программный модуль для LTspice

Реализован модуль на языке Python с графическим интерфейсом (tkinter), принимающий на вход файлы схем формата .asc (LTspice). Программа разбирает описания компонентов (SYMBOL, SYMATTR), сопоставляет их с базой данных и обученными моделями и назначает интенсивности отказов по приоритету: точное совпадение в базе; прогноз модели при достаточности признаков; иначе –значения справочника «Надежность ЭРИ». Итогом является оценка надежности схемы на ранних этапах проектирования без отдельного ручного расчета по справочникам.

Выводы

Сформулирована и апробирована методика сбора данных, регрессионного прогноза интенсивности отказов ЭКБ, натурной верификации на ускоренных испытаниях и программной поддержки расчета надежности схем в LTspice. Показано преимущество моделей градиентного бустинга над линейной регрессией и сопоставимость прогнозов со справочными и экспериментальными оценками; интерпретация SHAP подтверждает физическую содержательность признаков. Направление дальнейших работ –расширение покрытия классов (в том числе ИМС), уточнение моделей по накопленной статистике отказов и интеграция с другими САПР.

Литература

1. Надежность ЭРИ: Справочник. –МО РФ, 2006.
2. MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment. –U.S. DoD, 1991.
3. РДВ 319.01.11-98. Использование стандартов распределения. — М.: Росстандарт, 1998.
4. ГОСТ Р 27.013-2019. Надежность в технике. Применение количественных методов оценки надежности при испытаниях на надежность. — М.: Стандартинформ, 2020.
5. Беляев Ю. К. и др. Надежность технических систем: справочник / Под ред. И. А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1985. –608 с.

6. Ушаков И. А. Курс теории надежности систем. — М.: Дрофа, 2008. –239 с.
7. Маркин А. В., Полесский С. Н., Жаднов В. В. Методы оценки надежности элементов механики и электромеханики электронных средств на ранних этапах проектирования // Надежность, 2010. — № 2 (33). — С. 63–70.

УДК 621.382.32

Особенности SPICE-моделирования мощных GaN- и SiC-приборов с учетом влияния широкого диапазона температур

Исмаил-Заде М. Р., Петросянц К. О., Самбурский Л. М.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
mismailzade@hse.ru

В работе рассмотрены особенности SPICE-моделирования мощных полупроводниковых приборов на основе GaN и SiC с учетом влияния широкого диапазона температур (от –200 до +300 °C). Показано, что стандартные модели транзисторов недостаточно точно отражают температурные зависимости параметров V_{TH}, μ_{eff}, *Rds(on)* и др. Использован единый подход, расширяющий возможности SPICE-моделей в области низких и высоких температур.
Ключевые слова: GaN; SiC; SPICE-моделирование; мощные приборы; силовая электроника; широкий диапазон температур.

Features of SPICE modeling of GaN and SiC power devices in the wide temperature range

Ismail-Zade M. R., Petrosyants K. O., Sambursky L. M.
National Research University Higher School of Economics (Moscow Institute of Electronics and Mathematics)
34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia
mismailzade@hse.ru

This paper discusses the features of SPICE modeling of GaN- and SiC-based power semiconductor devices considering the influence of a wide temperature range (from –200 to +300 °C). It is shown that standard transistor models do not sufficiently accurately reflect the temperature dependences of threshold voltage, carrier mobility, capacitances, and dynamic resistance. A unified approach is used to extend the capabilities of standard SPICE models in the low- and high-temperature ranges.
Keywords: GaN; SiC; SPICE modeling; power devices; power electronics; wide temperature range.

Развитие силовой электроники требует применения широкозонных полупроводников — нитрида галлия (GaN) и карбида кремния (SiC). Данные приборы работают при более высоких напряжениях, частотах и температурах по сравнению с традиционными кремниевыми аналогами [1]. Адекватное схемотехническое моделирование невозможно без точных SPICE-моделей, корректно отражающих поведение GaN- и SiC-транзисторов в широком диапазоне температур (от –200 до +300 °C и выше). Настоящая работа посвящена анализу особенностей такого моделирования.

Для построения температурных SPICE-моделей мощных GaN- и SiC-приборов в работе использован единый подход, справедливый для расширенного температурного диапазона. Суть подхода заключается в следующем [2, 3].

1. В качестве базовой выбирается стандартная SPICE-модель, имеющаяся в библиотеках коммерческих SPICE-симуляторов и удовлетворительно описывающая характеристики транзистора в стандартном диапазоне температур (от –60 до +125 °C).
2. Выделяется ряд параметров базовой модели, являющихся температурно-зависимыми, для них вводятся новые полуэмпирические аппроксимации, справедливые в расширенном диапазоне (от –200 до +300 °C).
3. В макромодель транзистора включаются дополнительные схемные элементы (источники напряжения, резисторы и т. п.) для учета температурных эффектов, которые не могут быть описаны с помощью выражений базовой модели.

Применение данного подхода дает возможность сравнительно просто дополнить SPICE-модель рядом физических эффектов, влияние которых не учитывалось при моделировании приборов в условиях высоких и низких температур.

На рис. 1 приведены результаты моделирования с использованием модифицированных SPICE-моделей для силового GaN MIS-HEMT- и 6H-SiC n-JFET-транзисторов с учетом влияния сверхширокого диапазона температур. Погрешность моделирования ВАХ составляет не выше 15% во всем температурном диапазоне.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ (HSE-BR-2025-004).

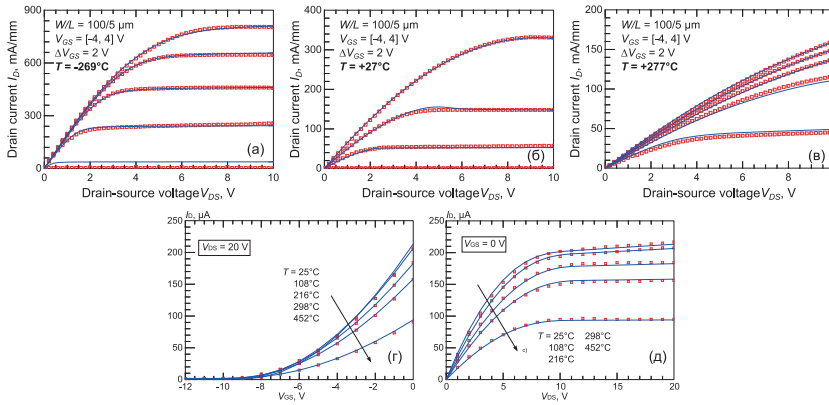


Рис. 1. Сопоставление результатов измерения (символы) и моделирования (линии) ВАХ: GaN MIS-HEMT в диапазоне T от –269 до +277 °C (*а–в*); 6H-SiC *n*-JFET в диапазоне T от +25 до +450 °C (*г, д*)

Литература

1. Kassakian J. G. et al. Principles of power electronics. Cambridge University Press, 2023.
2. Petrosyants K. O. et al. SPICE Modeling of GaN HEMTs in the Wide Temperature Range (–269 °C...+500 °C) // 2025 31st THERMINIC, Naples, Italy, 2025. P. 1–4.

3. Petrosyants K.O. et al. SPICE Compact BJT, MOSFET, and JFET Models for ICs Simulation in the Wide Temperature Range (From –200 °C to +300 °C) // IEEE Trans. on CAD of IC and Syst., 2021. Vol. 40. № 4. P. 708–722.

УДК 621.382; 004.383.8.032.26

Схемотехническое моделирование мемристора с учетом эффектов деградации, вариации и залипания его электрических параметров в SPICE-подобных симуляторах

Неустроев А. А., Бусыгин А. Н., к. ф.-м. н., Удовиченко С. Ю., д. ф.-м. н., Бобылев А. Н., к. т. н., Шулаев Н. А.
Тюменский государственный университет
625003, Тюмень Тюменской области, ул. Володарского, 6
al.a.neustroev@utmn.ru, a.n.busygin@utmn.ru, s.y.udovichenko@utmn.ru, a.n.bobylev@utmn.ru, n.a.shulaev@utmn.ru

Представлена модифицированная SPICE-модель мемристора на гладких функциях, описывающая группу нежелательных эффектов, для анализа надежности и эффективности устройств. Представлен метод и алгоритм настройки модели. Валидация на лабораторных образцах показывает адекватность и высокую точность модели.
Ключевые слова: мемристор; SPICE; схемотехническая модель; деградация; вариация; нежелательные эффекты.

Circuit-level modeling of a memristor with degradation, variation, and stuck-at of its electrical parameters in SPICE-like simulators

Neustroev A. A., Busygin A. N., Ph.D, Udovichenko S. Yu., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Bobylev A. N., Ph.D, Shulaev N. A.
University of Tyumen
6 Volodarsky St., Tyumen, 6250036, Russia
al.a.neustroev@utmn.ru, a.n.busygin@utmn.ru, s.y.udovichenko@utmn.ru, a.n.bobylev@utmn.ru, n.a.shulaev@utmn.ru

A modified SPICE model of a memristor based on smooth functions is presented, which describes a set of undesirable effects for the purpose of analyzing device reliability and performance. A method and algorithm for tuning the model are presented. Validation using laboratory samples demonstrates the model's adequacy and high accuracy.
Keywords: memristor; SPICE; circuit model; degradation; variation; undesirable effects.

Применение мемристоров и образованных из них кроссбар-массивов позволяет электронным устройствам демонстрировать высокую энергоэффективность и производительность при относительной компактности и простоте изготовления мемристорных кроссбар-массивов. Совместная работа полевых транзисторов и мемристорных кроссбар-массивов активно исследуется с помощью схемотехнического моделирования, к которому относятся SPICE-подобные симуляторы. Данный класс симуляторов обладает высокой точностью расчетов сигналов электрических цепей, широким набором моделей активных и пассивных компонентов.

Существующие SPICE-модели мемристоров описывают их идеальную усредненную вольт-амперную характеристику, однако не обладают достаточным функционалом для симуляции нежелательных эффектов, присущих реальным

компонентам. К этой группе нежелательных эффектов относятся в первую очередь деградация вольт-амперной кривой со временем, стохастическое изменение сопротивления в низкопроводящем (LRS) и высокопроводящем (HRS) состояниях, а также стохастическое изменение напряжения переключения мемристора. При анализе отказоустойчивости, надежности, энергопотребления электрических цепей аппаратных нейросетей, энергонезависимой памяти, ускорителей вычисления нейросетей эти нежелательные эффекты оказывают значительное негативное влияние на электрические сигналы и должны быть учтены совместно при моделировании.

В данной работе представлена модифицированная SPICE-модель мемристора (рис. 1) на гладких функциях [1], которая учитывает следующие нежелательные эффекты:

- деградация (уменьшение) вольт-амперной кривой от времени и приложенного напряжения;
- стохастическая вариация силы тока в HRS и LRS, а также напряжения переключения согласно заданному закону распределения;
- изменение вариации силы тока в HRS и LRS в зависимости от времени;
- залипание мемристора от внешнего сигнала.

Кроме того, модифицированная модель мемристора позволяет добавить как один из нежелательных эффектов, так и несколько по необходимости.

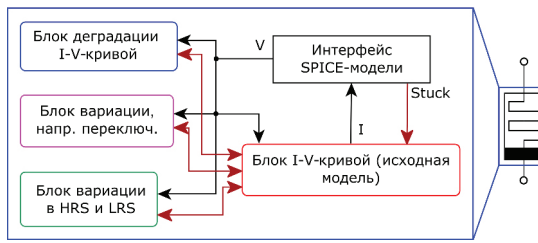


Рис. 1. Укрупненная схема модели

Предложен метод настройки параметров как исходной модели [1], так и ее модификации, состоящий из многостадийного оптимизатора и алгоритма численной оптимизации. Данный многостадийный оптимизатор последовательно определяет и фиксирует параметры модели, значительно облегчая исследователю задачу переноса характеристик измеренных лабораторных образцов мемристора в его модель.

Проведена валидация полученной модифицированной модели мемристора путем настройки на лабораторный образец мемристора топологии TiN/AL : HfO_2/TiN, а также из [2]. Проведено сравнение трендов деградации и вариации вольт-амперной кривой. Продемонстрирован предел настройки модели из-за формы вольт-амперной кривой мемристора. Полученные результаты говорят об адекватности и высокой точности моделирования нежелательных эффектов SPICE-модели.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FEWZ-2024-0020).

Литература

1. Yakopcic C. et al. A memristor device model // IEEE electron device letters, 2011. Vol. 32. № 10. P. 1436–1438.
2. Wu L. et al. A multi-level memristor based on Al-doped HfO2 thin film // Nanoscale research letters, 2019. Vol. 14. № 1. P. 177.

УДК 621.382.32

Модификация температурной зависимости и автоматизация определения параметров SPICE-модели стабилитрона в рабочем диапазоне токов

Хлынов П. А.[1], Самбурский Л. М.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
pakhlynov@edu.hse.ru, lsambursky@hse.ru
[2] Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН
124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3

В работе описана модифицированная SPICE-модель стабилитрона в диапазоне рабочих токов при изменении температуры. В стандартную SPICE-модель диода добавлены уравнения температурной зависимости для параметров, описывающих поведение тока в реверсивном режиме стабилитрона. Предложена методика определения стандартных и введенных параметров модифицированной модели в автоматизированном режиме.
Ключевые слова: стабилитрон; SPICE-модель; экстракция параметров; температурная зависимость.

Modification of the temperature dependence and automation of parameter extraction for the Zener diode SPICE model within the operating current range

Khlynov P. A., Sambursky L. M.
National Research University Higher School of Economics (Moscow Institute of Electronics and Mathematics),
34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia
pakhlynov@edu.hse.ru, lsambursky@hse.ru

The paper describes a modified SPICE model of a Zener diode within the operating current range under temperature variations. Temperature dependence equations for parameters describing current behavior in the reverse mode of the Zener diode are added to the standard SPICE model of the diode. A method for the automated extraction of both standard and newly introduced parameters of the modified model is proposed.
Keywords: Zener diode; SPICE-model; parameter extraction procedure; influence of temperature.

Введение

Базовая модель диода, используемая в LtSpice, SystemVision и др. симуляторах, недостаточно точно описывает поведение стабилитрона вблизи участка стабилизации при малых токах до 10^{-6} А, особенно в широком диапазоне температуры (от −60 до +125 °C) (см. пример на рис. 1). Из литературы известны доработанные модели, например, [1, 2]. В этих работах предлагаются достаточно сложные модели – с несколькими дополнительными нелинейными элементами и кратным числом

дополнительных параметров, что усложняет как процесс моделирования характеристик стабилитрона, так и процедуру определения параметров модели.

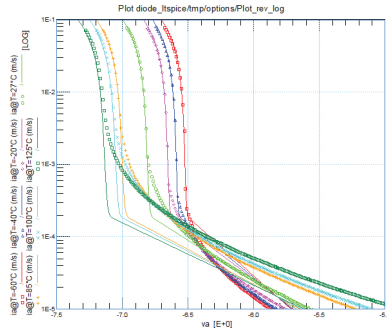


Рис. 1. Измеренные и моделированные ВАХ стабилитрона 2с168а в области отрицательных напряжений в диапазоне температур от −60 до 125 °С с использованием стандартной модели

Предложенное решение

В данной работе предлагается использовать модель стабилитрона, которая более точно учитывает его поведение в диапазоне рабочих токов и температуры, но в то же время имеет минимальные отличия от модели, встроенной в промышленные симуляторы. В стандартную модель добавлены температурные зависимости для параметров IBVL, NBVL, которые используются для расчета тока стабилитрона в диапазоне ниже тока стабилизации. На основе полученных из эксперимента значений сдвига этих параметров (см. рис. 2) для описания их зависимости от температуры выбраны квадратические уравнения:

$$NBVL = NBVLbb \cdot (TEMP - TNOM)^2 + NBVLb \cdot (TEMP - TNOM) + NBVLa, \quad (1)$$

$$IBVL = IBVLbb \cdot (TEMP - TNOM)^2 + IBVLb \cdot (TEMP - TNOM) + IBVLa, \quad (2)$$

где коэффициенты $NBVL\alpha$ и $IBVL\alpha$ рассчитываются для номинальной температуры.

Автоматизация определения параметров модели

Для проверки предложенного решения использован стабилитрон серии 2с168а. Измерения вольт-амперных характеристик проводились в квазиимпульсном режиме с использованием разработанного автоматизированного измерительного комплекса на основе источника-измерителя *Keithley 2602* при температурах −60, −40, −20, +27, 85, 100, 125 °С. Для анализа работы модели из партии компонентов был выбран образец, имеющий средние значения ВАХ.

Для автоматизированного расчета всех параметров SPICE-модели был разработан скрипт, работающий в рамках программы определения параметров SPICE-моделей IC-CAP. Интерфейс разработанного ПО обеспечивает автоматический расчет статических параметров SPICE-модели стабилитрона и при необходимости их ручную доводку. При разработке алгоритма использованы имеющиеся в литературе рекомендации по вычислению параметров модели [3]. Результаты расчета

параметров модели стабилитрона 2с168а для обратной ветви его ВАХ, полученные по результатам измерения и моделирования, приведены на рис. 2.

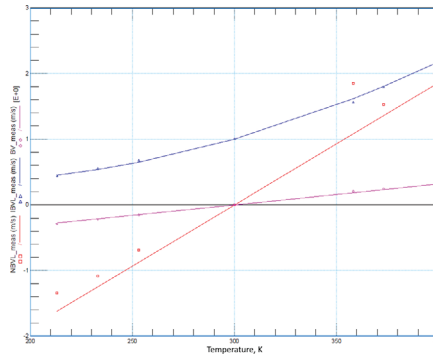


Рис. 2. Значение параметров NBVL, IBVL, BV стабилитрона 2с168а, рассчитанные при различных температурах на основе результатов измерений (символы) и моделирования (сплошные линии)

Верификация

На рис. 3 приведено сравнение результатов измерения обратной ветви ВАХ в диапазоне температуры и схемотехнического моделирования с использованием предложенной модели. Время, затрачиваемое на определение параметров SPICE-модели, составляет порядка 5 минут. Погрешность моделирования характеристик на участке стабилизации и ниже до 10^{-6} А составляет 10–15 % в диапазоне температуры от −60 до +125 °С.

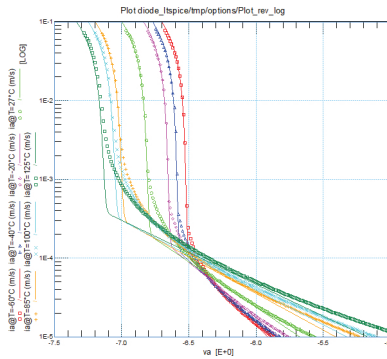
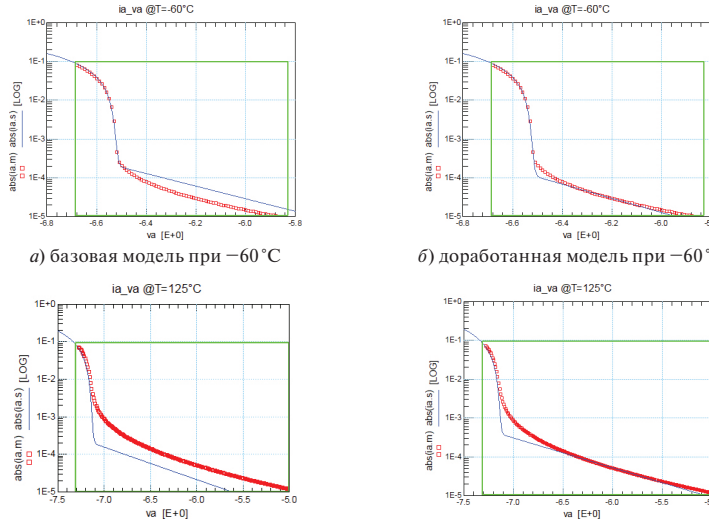


Рис. 3. Измеренные и моделированные ВАХ стабилитрона 2с168а в области отрицательных напряжений в диапазоне температур от −60 до 125 °С с использованием модифицированной модели



а) базовая модель при −60 °C

б) доработанная модель при −60 °C

в) базовая модель при 125 °C

г) доработанная модель при 125 °C

Рис. 4. Сравнение измеренных и смоделированных ВАХ при использовании стандартной модели (*а* и *в*), при использовании модифицированной модели (*б* и *г*) при крайних значениях температуры

На рис. 4 для сравнения приведены характеристики при крайних значениях температуры, смоделированные с использованием двух вариантов модели: встроенной в симулятор и доработанной.

Литература

1. Buchheit T. E. et al. Zener Diode Compact Model Parameter Extraction Using Xyce-Dakota Optimization. Sandia National Laboratories (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2017. № SAND–2017-13790.
2. Lepkowski J. Zener Macro-Models Provide Accurate SPICE Simulations // ONSemiconductor, January, 2006.
3. Deveney M. A temperature dependent SPICE macro-model for Zener and avalanche diodes // [1991] Proceedings of the 34th Midwest Symposium on Circuits and Systems. IEEE, 1992. P. 592–596.

УДК 519.6

Атомистическое моделирование работы элементов энергонезависимой памяти на основе сегнетоэлектрика $SrTiO_3$

Павлишин К. Ю.[1], д. ф.-м. н., Абгарян К. К.[2], к. ф.-м. н., Бажанов Д. И.[2]
[1] Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН)
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2
kirill1999super15@gmail.com
[2] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
abgaryankk@yandex.ru, dima@kintechlab.com

Атомистическая модель FeRAM на основе кубического $SrTiO_3$ использует локальные моды ячеек и эффективный гамильтониан, параметры которого получены из квантово-механических расчетов. Модель описывает динамику поляризации и позволяет строить петли гистерезиса, зависимости мод, деформаций и энергий.
Ключевые слова: математическое моделирование; энергонезависимая память; технология FeRAM; $SrTiO_3$; эффективный гамильтониан; атомистическое моделирование.

Atomistic modeling of non-volatile memory elements based on the ferroelectric $SrTiO_3$

Pavlishin K. Yu.[1], Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Abgaryan K. K.[2], Ph.D, Bazhanov D. I.[2]
[1] Federal Research Center "Informatics and Management" of the Russian Academy of Sciences (FRC IU RAS)
44, Bldg. 2, Vavilova St., Moscow, 119333, Russia
kirill1999super15@gmail.com
[2] Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
abgaryankk@yandex.ru, dima@kintechlab.com

An atomistic FeRAM model based on cubic $SrTiO_3$ uses local cell modes and an effective Hamiltonian whose parameters are obtained from quantum-mechanical calculations. The model describes polarization dynamics and enables the construction of hysteresis loops and dependencies of modes, strains, and energies.
Keywords: mathematical modeling; non-volatile memory; FeRAM technology; $SrTiO_3$; effective Hamiltonian; atomistic modeling.

Для описания работы элементов памяти, основанных на сегнетоэлектрических эффектах, в данной работе используется атомистическое моделирование. В рамках этого подхода строится динамическая система, фазовыми переменными которой являются векторы локальных мод элементарных ячеек. Эти моды описывают коллективные полярные смещения внутри ячейки, связанные с мягкой сегнетоэлектрической модой. Силы, действующие на локальные моды, определяются на основе

эффективного гамильтониана, параметры которого рассчитываются методами квантово-механического моделирования.

Такой подход для материалов перовскитного типа (ABO_3) подробно обсуждается в работах [1, 2, 3] и реализован в программном комплексе FeRAM [4]. В настоящей работе именно эта схема используется в качестве основы для построения теоретического блока моделирования элементов энергонезависимой памяти FeRAM на основе кубической фазы $SrTiO_3$.

На первом этапе выполняется серия первопринципных расчетов, в ходе которых последовательно определяются эффективная масса дипольной локальной моды, эффективный заряд Борна, оптическая диэлектрическая постоянная, собственное значение мягкой моды, коэффициенты связи между локальными модами и деформациями, матрица ближнего взаимодействия, упругие константы и коэффициенты связи. Для проведения таких расчетов используется программный пакет ABINIT [5]. При этом был подготовлен специальный патч, обеспечивающий перенос и корректную работу требуемой вычислительной схемы на современной версии ABINIT.

Полученные на этом этапе параметры затем передаются на следующий наномасштабный уровень моделирования, где рассматривается динамика поляризации в элементе FeRAM. Здесь используется математическая модель, основанная на уравнениях движения локальных мод элементарных ячеек в оксидном слое, параметризованных амплитудой мягкой моды. В правую часть этих уравнений входят основные физические факторы, определяющие эволюцию системы: собственная энергия локальной моды, дальнодействующее диполь-дипольное взаимодействие, ближнее взаимодействие между локальными модами, упругая энергия и взаимодействие локальных мод с локальной деформацией.

Компоненты правой части уравнений вычисляются дифференцированием эффективного гамильтониана по локальному вектору моды. В результате такого моделирования удается описывать пространственно-временную эволюцию поляризационного состояния в активном слое элемента FeRAM.

Разработанный вычислительный блок позволяет анализировать не только итоговый макроскопический отклик материала, но и внутреннюю динамику системы. В частности, могут быть получены и визуализированы петля гистерезиса, временные зависимости компонент поляризации, компонент локальной моды, компонент деформации, а также отдельных энергетических вкладов эффективного гамильтониана и полной энергии, отнесенной к элементарной ячейке. Это дает возможность исследовать как отклик материала на внешнее воздействие, так и эволюцию его внутреннего полярного состояния на уровне локальных мод.

В рамках работы выполняется программная реализация модели на C++ с использованием технологий распараллеливания. Она позволяет проводить масштабные вычисления и исследовать поляризационные свойства $SrTiO_3$, а также динамику локальных мод в материалах перовскитного типа. Преимуществом подхода является связь параметров модели с химическим составом и структурой, поскольку они определяются из квантово-механических расчетов. Поэтому модель сохраняет связь с атомистическим строением системы, повышает физическую обоснованность расчетов и расширяет применение к материалам различного состава. Результаты важны для понимания процессов, определяющих поведение FeRAM. Это создает основу для оптимизации характеристик устройств, повышения их

долговечности и энергоэффективности, а также разработки решений энергонезависимой памяти. Кроме того, подход может служить базисом для моделирования других оксидных материалов, в частности HfO_2 и $HfZrO_2$.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-91-01012).

Литература

1. Nishimatsu T. Fast molecular-dynamics simulation for ferroelectric thin-film capacitors using a first-principles effective Hamiltonian / T. Nishimatsu, U. V. Waghmare, Y. Kawazoe, D. Vanderbilt // Physical Review B, 2008. Vol. 78. № 10. P. 104104. DOI: 10.1103/PhysRevB.78.104104.
2. Zhong W. First-principles theory of ferroelectric phase transitions for perovskites: The case of BaTiO3 / W. Zhong, D. Vanderbilt, K. M. Rabe // Physical Review B, 1995. Vol. 52. № 9. P. 6301–6312. DOI: 10.1103/PhysRevB.52.6301.
3. King-Smith R. D. First-principles investigation of ferroelectricity in perovskite compounds / R. D. King-Smith, D. Vanderbilt // Physical Review B, 1994. Vol. 49. № 9. P. 5828–5844. DOI: 10.1103/PhysRevB.49.5828.
4. Программный комплекс «FeRAM» для быстрой молекулярной динамики для объемных и тонкопленочных сегнетоэлектриков и релаксоров [Электронный ресурс]. — URL: https://loto.sourceforge.net/feram (дата обращения: 25.04.2026).
5. Программа для первопринципных расчетов «ABINIT» [Электронный ресурс]. — URL: https://abinit.github.io/abinit_web (дата обращения: 25.04.2026).

УДК 519.6

Гибридная модель мемристора с использованием корректирующего аппроксиматора

Хлопук В. С., Абгарян К. К., д. ф.-м. н.
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН)
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2
vasily.hk@gmail.com, kristal83@mail.ru

При разработке нейроморфных систем на основе аналоговых вычислений большое внимание уделяется одному из главных электронных компонентов устройства –мемристору. Для современных направлений использования мемристора необходимо иметь возможность получать приемлемые результаты эффекта STDP и вольт-амперных характеристик, что напрямую влияет на корректное проектирование архитектур на базе мемристоров. В данной работе предлагается единая модель мемристора, способная корректно воспроизводить как эффект резистивного переключения, так и вольт-амперные характеристики компонента, сохраняя требуемый интерфейс взаимодействия через напряжение.
Ключевые слова: нейроморфные вычисления; мемристор; STDP.

Hybrid memristor model using an adaptive approximator

Khlopuk V. S., Abgaryan K. K., Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS)
44, Bldg. 2, Vavilova St., Moscow, 119333, Russia
vasily.hk@gmail.com, kristal83@mail.ru

When developing neuromorphic systems based on analog computing, a lot of attention is paid to one of the main electronic components of the device –memristor. For modern directions of memristor use, it is necessary to be able to obtain acceptable results of the STDP effect and volt-ampere characteristics, which directly affects the correct design of architectures based on memristors. In this paper, a unified model of a memristor is proposed, capable of correctly reproducing both the effect of resistive switching and the volt-ampere characteristics of the component, while maintaining the required voltage-based interaction interface.
Keywords: neuromorphic computing; memristor; STDP.

В ситуациях, когда требуется с достаточной точностью воспроизводить одной моделью одновременно эффект STDP [1, 2] и вольт-амперные характеристики, можно столкнуться с проблемой, когда модель неспособна обобщить поведение мемристора сразу в нескольких режимах, что может быть критично при проектировании. В связи с этим были проведены эксперименты в целях оптимизации под разные режимы для моделирования мемристоров на основе ниобата лития и парилена. В оптимизации использовались такие известные модели, как модель линейного ионного дрейфа [3], экспоненциальная модель легирующей примеси [4], нелинейного ионного дрейфа [5], TEAM [6] и VTEAM [7]. Однако ни одна из моделей

не удовлетворила требованию воспроизвести одновременно эффекты STDP и BAX, несмотря на успехи в этих режимах по отдельности.

В таких случаях требуется адаптировать модель сразу под две задачи, однако не всегда есть возможность использовать аппроксимацию напрямую. Примером такой ситуации может быть моделирование эффекта STDP, где строится зависимость изменения проводимости от разницы во времени прихода спайков. Тем не менее если в случае STDP отсутствует возможность аппроксимации эффекта напрямую, то в вольт-амперных характеристиках это допустимо. Это значит, что открывается возможность построить гибридную модель, которая использует в своей основе классическую модель и корректирующую функцию для вольт-амперных характеристик.

Суть гибридного подхода в построении модели мемристора заключается в создании «опорной» (базовой) модели, способной адекватно воспроизводить эффект резистивного переключения, и корректирующей модели тока. Для расчета переменной состояния достаточно использовать только входное напряжение, в связи с чем открывается возможность для коррекции силы тока, так как в базовой модели он может не участвовать. Базовая модель позволяет рассчитать сопротивление по входному напряжению, после чего к току базовой модели (из полученного сопротивления по закону Ома) добавляется корректор, который представляет из себя аппроксимацию разницы тока базовой модели и тока экспериментальных данных и фактически решает задачу регрессии. Таким образом, обе модели объединяются в одну общую, не нарушая при этом интерфейс взаимодействия, и позволяют лучше описывать реальные данные вследствие последовательной оптимизации под каждую из задач.

Исходя из результатов моделирования эффектов резистивного переключения и STDP, в качестве базовой модели был выбран VTEAM. Для коррекции тока использовался полином, обученный на разнице тока базовой модели и экспериментального тока. В итоге данный подход позволил оптимизировать напрямую разные режимы, в связи с чем гибридная модель удовлетворительно воспроизводит эффекты требуемых режимов с приемлемой скоростью вычислений.

Литература

1. Feldman D. E. The spike-timing dependence of plasticity // Neuron, 2012. Vol. 75. № 4. P. 556–571. DOI:10.1016/j.neuron.2012.08.001.
2. Абгарян К. К., Ревизников Д. Л., Журавлев А. А., Морозов А. Ю., Гаврилов Е. С. Многомасштабное моделирование нейроморфных систем. — М.: МАКС Пресс, монография, 2022. — С. 128. –ISBN 978-5-317-06886-8.
3. Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R. and Williams R. S. The missing memristor found // Nature, 2008. Vol. 453. P. 80–83. DOI:10.1038/nature06932.
4. Zheng G., Mohanty S. P., Kougianos E., Okobiah O. Polynomial Metamodel integrated Verilog-AMS for memristor-based mixed-signal system design // 2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Columbus, OH, 2013. P. 916–919. DOI:10.1109/MWSCAS.2013.6674799.
5. Yang J. J., Pickett M. D., Li X., Ohlberg D. A. A., Stewart D. R., Williams R. S. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices // Nature Nanotechnology, 2008. Vol. 3. № 7. P. 429–433. DOI:10.1038/nnano.2008.160.

6. Kvatinsky S., Friedman E. G., Kolodny A., Weiser U. C. TEAM: Threshold Adaptive Memristor Model // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013. Vol. 60. № 1. P. 211–221. DOI:10.1109/TCSI.2012.2215714.
7. Kvatinsky S., Ramadan M., Friedman E. G., Kolodny A. VTEAM: A General Model for Voltage-Controlled Memristors // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2015. Vol. 62. № 8. P. 786–790. DOI:10.1109/TCSII.2015.2433536.

УДК 534-16

Влияние материала резонатора на чувствительность резонансно-частотного датчика давления

Таловская А. А., Барбин Е. С., к. т. н., Кулинич И. В., к. т. н., Гуляева А. А.
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40
alena.a.talovskaia@tusur.ru, evgenii.s.barbin@tusur.ru, kulinich@tusur.ru, gelya@mail.ru

Исследовано влияние материала резонатора на чувствительность микроэлектромеханического резонансно-частотного датчика давления. Установлено, что наибольшую чувствительность обеспечивают резонаторы из карбида кремния, бериллия, оксида алюминия и нитрида кремния. С учетом технологических ограничений наибольший практический интерес представляют оксид алюминия и нитрид кремния. Поскольку оба материала являются диэлектриками, для реализации электромагнитного возбуждения колебаний требуется введение проводящего слоя. В связи с этим были исследованы композитные резонаторы на основе Al_2O_3, обеспечивающего более высокую чувствительность по сравнению с Si_3N_4. Рассматривались структуры Al_2O_3/V, Al_2O_3/Ti и Al_2O_3/Rh, выбранные с учетом близости коэффициентов термического линейного расширения материалов. Показано, что структуры Al_2O_3/Ti при соотношении толщин слоев 3:1 обеспечивают максимальную чувствительность, превосходящую показатели резонаторов из монокристаллического кремния и однородных материалов, входящих в состав композита.
Ключевые слова: МЭМС; датчик давления; резонатор; чувствительность; композитный материал.

Influence of the resonator material on the sensitivity of a resonant-frequency pressure sensor

Tolovskaia A. A., Barbin E. S., Ph.D, Kulinich I. V., Ph.D, Guliaeva A. A.
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenin Ave., Tomsk, 63405040, Russia
alena.a.talovskaia@tusur.ru, evgenii.s.barbin@tusur.ru, kulinich@tusur.ru, gelya@mail.ru

The influence of the resonator material on the sensitivity of a microelectromechanical resonant-frequency pressure sensor is studied. It is shown that the highest sensitivity is achieved using resonators made of silicon carbide, beryllium, aluminum oxide, and silicon nitride. To further improve sensitivity, composite resonators based on aluminum oxide with a metallic layer are proposed. The Al_2O_3/V, Al_2O_3/Ti, and Al_2O_3/Rh structures are analyzed, selected with consideration of the similarity of the materials' coefficients of thermal expansion. It is demonstrated that the maximum sensitivity is obtained for the Al_2O_3/Ti structure at a layer thickness ratio of 3:1. The obtained results confirm the potential of composite resonators for improving the sensitivity of resonant-frequency pressure sensors.

Keywords: MEMS; pressure sensor; resonator; sensitivity; composite material.

Микроэлектромеханические (МЭМС) датчики давления широко применяются в нефтегазовой, химической, энергетической, медицинской, автомобильной и аэрокосмической отраслях для контроля параметров технологических процессов [1, 2]. Наибольшее распространение получили емкостные, пьезорезистивные и резонансно-частотные датчики давления.

Емкостные датчики отличаются высокой чувствительностью и простотой конструкции, однако характеризуются нелинейностью выходного сигнала и влиянием паразитных емкостей [3, 4]. Пьезорезистивные датчики обеспечивают хорошие метрологические характеристики, но обладают выраженной температурной зависимостью и нелинейностью [5]. Резонансно-частотные датчики давления (РЧДД) обладают высокой долговременной стабильностью при отсутствии гистерезиса и необходимости в аналого-цифровом преобразователе. Вместе с тем одним из факторов, ограничивающих область применения РЧДД, остается сравнительно невысокая чувствительность [6].

Чувствительный элемент резонансно-частотного датчика давления представляет собой мембрану с двумя резонаторами, размещенными в областях растягивающих и сжимающих механических напряжений. При деформации мембраны под действием давления напряженное состояние резонаторов изменяется, что приводит к изменению их резонансных частот в противоположных направлениях. Разность частот используется в качестве выходного сигнала датчика и пропорциональна приложенному давлению (рис. 1) [7].

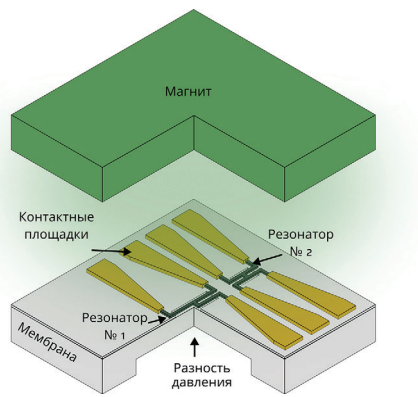


Рис. 1. Конструкция сенсора резонансно-частотного датчика давления

Одним из перспективных способов повышения чувствительности РЧДД является изменение материала резонатора. Для оценки его влияния проведено моделирование при фиксированных геометрических параметрах чувствительного элемента. Толщина кремниевой мембраны составляла 250 мкм, область приложения давления представляла собой ромб со стороной 1400 мкм. Геометрия резонаторов задавалась параметрами H, B, L и D (рис. 2), значения которых приведены в табл. 1.

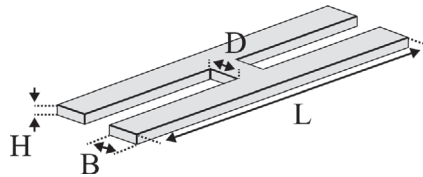


Рис. 2. Параметры геометрии резонатора

Таблица 1. Геометрические параметры резонаторов

Резонатор	H, мкм	B, мкм	L, мкм	D, мкм
1	4	30	900	40
2	4	30	600	40

Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты исследования зависимости чувствительности от материала резонатора

Материал	Резонатор № 1			Резонатор № 2		
	f, кГц		S, Гц/кПа	f, кГц		S, Гц/кПа
	P_1, 0 кПа	P_2, 10 кПа		P_1, 0 кПа	P_2, 10 кПа	
SiC	75,049	75,15	**10,1**	166,36	166,3	**6,0**
Be	61,232	61,318	**8,6**	135,63	135,58	**5,0**
Al_2O_3	49,339	49,408	**6,9**	109,28	109,24	**4,0**
Si3N4	44,21	44,272	**6,2**	98,027	97,988	**3,9**
Si	40,938	40,996	5,8	90,832	90,796	3,6
Cr	30,73	30,773	4,3	68,112	68,085	2,7
SiO_2	27,836	27,877	4,1	61,799	61,773	2,6
Mo	27,925	27,964	3,9	61,977	61,952	2,5
Al	25,223	25,259	3,6	56,101	56,079	2,2
Ti	25,054	25,09	3,6	55,674	55,651	2,3
Ni	24,472	24,507	3,5	54,318	54,297	2,1
Co	24,396	24,431	3,5	54,152	54,131	2,1
W	22,66	22,691	3,1	50,211	50,191	2,0
Cu	18,102	18,128	2,6	40,233	40,217	1,6

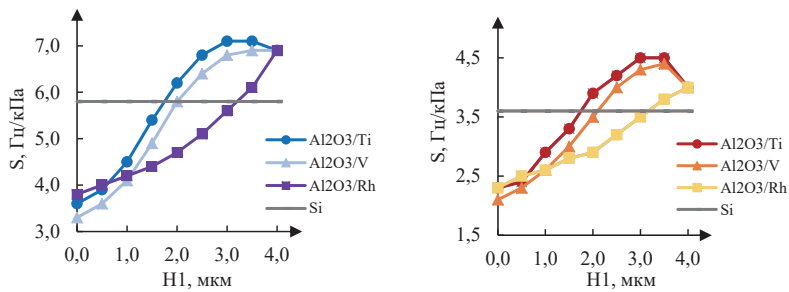
В результате проведенного исследования было выявлено, что наибольшую чувствительность обеспечивают резонаторы из карбида кремния (SiC), бериллия (Be), оксида алюминия (Al_2O_3) и нитрида кремния (Si_3N_4). Однако дальнейшее применение SiC-резонаторов связано с усложнением технологического процесса изготовления, а использование бериллия ограничено его высокой токсичностью.

Поэтому наибольший практический интерес представляют резонаторы из Al_2O_3 и Si_3N_4, сочетающие высокую чувствительность с технологической совместимостью, химической и термической стабильностью.

Поскольку Al_2O_3 и Si_3N_4 являются диэлектриками, их использование в рассматриваемой конструкции требует введения проводящего слоя, необходимого для электромагнитного возбуждения и регистрации колебаний. Поэтому дальнейшие исследования были сосредоточены на композитных резонаторах. В качестве базового материала выбран Al_2O_3, обеспечивающий более высокую чувствительность по сравнению с Si_3N_4.

При выборе материалов композитной структуры основным критерием являлась близость коэффициентов термического линейного расширения, необходимая для минимизации температурных напряжений. Рассматривались пары материалов с различием ТКЛР не более $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}. По результатам анализа были выбраны следующие комбинации: Al_2O_3/V, Al_2O_3/Ti, Al_2O_3/Rh.

Композитный резонатор формировался из нижнего слоя Al_2O_3 и верхнего металлического слоя при общей толщине структуры 4 мкм. Исследовано влияние соотношения толщин слоев на чувствительность резонаторов. В качестве базового варианта использовались результаты моделирования резонаторов из монокристаллического кремния (рис. 3).



а *б*

Рис. 3. Зависимость чувствительности резонаторов от соотношения толщин слоев композитной структуры: *а*) резонатор № 1, *б*) резонатор № 2

Анализ результатов показал, что структура Al_2O_3/Ti при соотношении толщин слоев 3:1 обеспечивает наибольшую чувствительность: 7,1 Гц/кПа для первого резонатора и 4,5 Гц/кПа для второго. Достигнутые значения превышают показатели резонаторов из монокристаллического кремния, оксида алюминия и титана. Полученные результаты подтверждают перспективность применения композитных резонаторов для повышения чувствительности резонансно-частотных датчиков давления.

Результаты получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2024-0008).

Литература

1. Krakover N., Ilic R., Krylov S. Resonant pressure sensing using a micromechanical cantilever actuated by fringing electrostatic fields // 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Belfast: IEEE, 2018. P. 846–849. URL: https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2018.8346688.
2. Таловская А. А., Барбин Е. С., Трошкинев Н. М. Обзор микроэлектромеханических систем в кардиологической практике: принципы работы, диагностические возможности и перспективы применения // Казанский медицинский журнал, 2025. — DOI: 10.17816/KMJ642503. –EDN: KGKLLM.
3. Chow E. Y., Chlebowski A. L., Chakraborty S., Chappell W. J., Irazoqui P. P. Fully wireless implantable cardiovascular pressure monitors integrated with a medical stent // IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010. Vol. 57. № 6. P. 1487–1496. DOI: 10.1109/TBME.2010.2041058.
4. Shubham S., Nawaz M. Capacitive Pressure Sensor Design Using COMSOL Multiphysics. COMSOL Conference, 2019. 265 p.
5. Михеев В. П., Просандеев А. В. Датчики и измерительные преобразователи: учебное пособие. –Москва, 2007. –172 с.
6. Lu Y., Yan P., Xiang C. et al. A Resonant Pressure Microsensor with the Measurement Range of 1 MPa Based on Sensitivities Balanced Dual Resonators // Sensors, 2019. Vol. 19. № 10. Art. 2272. DOI: 10.3390/s19102272.
7. Herrera-May A. L., Aguilera-Cortés L. A., García-Ramírez P. J., Manjarrez E. Resonant Magnetic Field Sensors Based on MEMS Technology // Sensors, 2009. Vol. 9. № 10. P. 7785–7813. DOI: 10.3390/s91007785.
8. Wang J., Yan G., Zhang W. et al. Electromagnetic Excitation and Detection for Resonant Pressure Sensor // Journal of Physics: Conference Series, 2009. Vol. 188. Art. 012042. DOI: 10.1088/1742-6596/188/1/012042.
9. Таловская А. А., Моховиков Д. М., Барбин Е. С., Кулинич И. В., Гуляева А. А. Исследование механических параметров чувствительного элемента резонансно-частотного датчика давления // Известия вузов. Физика, 2024. — Т. 67. — № 2 (795). — С. 91–100. — DOI: 10.17223/00213411/67/2/10.

УДК 537.312.7:004.332.3

Модель MIM-селектора ReRAM на основе кинетического метода Монте-Карло для САПР

Курьянов А. О.[1,2], Федотов М. И.[1,2,3], к. ф.-м. н., Теплов Г. С.[1,2], к. ф.-м. н.
[1] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[3] ИПТМ РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

В работе представлена физико-математическая модель MIM селектора ReRAM. Моделирование выполнено на основе метода кинетического Монте-Карло. Проведена валидация модели на основе экспериментальных данных.
Ключевые слова: Энергонезависимая память; ReRAM; селектор; MIM диод.

A model of the ReRAM MIM selector based on the kinetic Monte Carlo method for CAD

Kuryanov A. O.[1,2], Fedotov M. I.[1,2,3], Ph.D, Teplov G. S.[1,2], Ph.D
[1] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[3] IMT RAS
6 Akademika Osipyana St., Chernogolovka, 142432, Russia

The paper presents a physical and mathematical model of the MIM selector ReRAM. The modeling was carried out using the kinetic Monte Carlo method. The model was validated based on experimental data.
Keywords: Non-Volatile Memory; ReRAM; selector; MIM diode.

Развитие энергонезависимой памяти ориентировано на увеличение плотности хранения и снижение энергопотребления. Одной из перспективных технологий для достижения этой цели является энергонезависимая резистивная память (ReRAM), работающая за счет изменения проводимости между высоко- и низкорезистивным состояниями [1]. Для увеличения плотности хранения применяют архитектуру *Crossbar*, однако паразитные токи утечки через соседние ячейки делают необходимым использование селектора в ячейке 1S1R. Наиболее технологически реализуемым вариантом является MIM-селектор — тонкопленочная структура металл –диэлектрик –металл, транспорт носителей в которой осуществляется туннелированием через диэлектрик.

Ранее в работах по моделированию MIM-селекторов в TCAD применялись упрощенные аналитические модели туннелирования (прямое и Фаулера — Нордгейма). Такие модели не учитывают влияние локализованных дефектов

в диэлектрике и дают лишь качественное описание характеристик. Для повышения точности в настоящей работе предлагается использовать модель *Kinetic Monte Carlo (KMC) MIM Transport*, применяемую для описания транспорта носителей в тонких диэлектриках [2]. Данный подход основан на стохастическом моделировании дискретных событий туннелирования, захвата и эмиссии носителей на дефектах, а также прыжковой проводимости между ловушками.

Моделирование выполнено для структуры TiN/Ta_2O_5 (3 нм) / TiN с площадью 40×40 нм^2. На рис. 1 показана валидация модели по экспериментальным ВАХ [3]. Заданы концентрация и энергетическое положение дефектов, работа выхода электродов и ширина запрещенной зоны диэлектрика. Учтены механизмы прямого туннелирования, эмиссии Пула — Френкеля, неупругого туннелирования электрод –ловушка и прыжковой проводимости между ловушками. Расчетное стохастическое облако ВАХ (цветные кривые), полученное варьированием случайного расположения дефектов, хорошо согласуется с экспериментом (черная кривая).

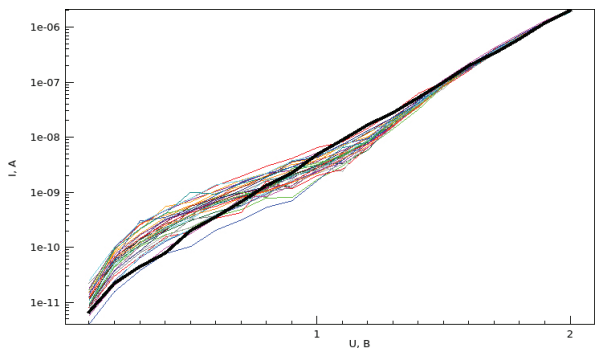


Рис. 1. ВАХ валидации модели по эксперименту

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: впервые для MIM-селектора ReRAM применен метод кинетического Монте-Карло, позволяющий учесть влияние дефектов в слое диэлектрика; выполнена валидация модели по литературным экспериментальным данным, подтверждающая ее применимость к реальным устройствам.

Литература

1. Теплов Г. С., Горнев Е. С. Модель на языке VERILOG-A многоуровневого биполярного мемристора с учетом девиаций параметров переключения // Микроэлектроника, 2019. — Т. 48. — № 3. — С. 163–175.
2. Kim S., Lee J. TCAD simulation of resistive switching devices: Impact of ReRAM configuration on neuromorphic computing // Nanomaterials, 2024. Vol. 14. № 23. P. 1864.
3. Govoreanu B. et al. High-performance metal-insulator-metal tunnel diode selectors // IEEE electron device letters, 2013. Vol. 35. № 1. P. 63–65.

УДК 621.376

Оптимизация структур с квантовыми ямами в модуляторах электропоглощения

Мустафин А. Д., Гришаков К. С., к. ф.-м. н., Васильевский И. С., д. ф.-м. н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
anto.mustafin@yandex.ru, ksgrishakov@mephi.ru, isvasilyevskij@mephi.ru

Реализован метод глобальной оптимизации квантово-размерных гетероструктур для модуляторов электропоглощения. На основе сравнительного анализа различных конфигураций обоснована эффективность использования асимметричных квантовых ям для достижения максимального эффекта электропоглощения.
Ключевые слова: спектр поглощения; электропоглощение; квантовая яма; гетероструктура; оптический модулятор.

Optimization of Quantum Well Structures in Electroabsorption Modulators

Mustafin A. D., Grishakov K. S., Ph.D, Vasil'evskii I. S., Sc.D
National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia
anto.mustafin@yandex.ru, ksgrishakov@mephi.ru, isvasilyevskij@mephi.ru

A global optimization method for quantum-well heterostructures of electroabsorption modulators has been implemented. Based on a comparative analysis of various configurations, the effectiveness of using asymmetric quantum wells to achieve a maximum electroabsorption effect has been demonstrated.
Keywords: absorption spectrum; electroabsorption; quantum well; heterostructure; optical modulator.

Развитие современной интегральной фотоники определяется растущей потребностью в компактных энергоэффективных и высокоскоростных устройствах для передачи и обработки информации. Важными элементами таких систем являются модуляторы электропоглощения, сочетающие в себе малые габариты, низкое энергопотребление и высокое быстродействие. Амплитудный характер модуляции электропоглощения дает преимущество в компактности и простоте проектирования, так как не требует реализации интерферометрических плеч и вспомогательных компонентов (MMI-делителей), критичных к точности изготовления. Особый интерес представляют полупроводниковые структуры с квантовыми ямами, где управление оптическим поглощением реализуется за счет квантово-размерных эффектов.

Несмотря на обширные исследования в этой области, выбор конкретных конфигураций слоев гетероструктуры зачастую остается необоснованным, а сравнительный анализ различных классов структур проводится редко. Это ставит под сомнение оптимальность предлагаемых решений. Кроме того, большинство

расчетных работ используют вариационный метод, который, как известно, не дает достоверных результатов и нередко ведет к расхождению с экспериментальными данными [1], что подчеркивает необходимость разработки более точных и системных подходов к оптимизации.

В настоящей работе моделирование спектров поглощения и зависимостей показателя преломления от длины волны проводится на основе численного решения интегрального уравнения для экситонов в импульсном пространстве [2]. Теоретическая модель учитывает пространственную вариацию материальных параметров в зависимости от состава слоев гетероструктуры, а также возможность смешивания состояний тяжелых и легких дырок в валентной зоне в рамках 4×4 kp-гамильтониана. Данный метод расчета интегрирован в алгоритм глобальной оптимизации, что позволяет автоматически находить конфигурацию слоевой структуры из рассматриваемого класса, обладающей наибольшим эффектом электропоглощения (рис. 1). Проведен сравнительный анализ нескольких классов гетероструктур с квантовыми ямами, при этом особое внимание уделено несимметричным конфигурациям [3]. Установлено, что нарушение симметрии потенциала выступает ключевым фактором усиления электропоглощения. Дано детальное физическое обоснование обнаруженных закономерностей.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

1) методика расчета спектра поглощения и алгоритм глобальной оптимизации структуры с квантовыми ямами для усиления эффекта электропоглощения в выбранном диапазоне длин волн;

2) вывод о том, что нарушение симметрии потенциала является ключевым фактором, позволяющим под действием электрического поля сохранить высокую силу осциллятора при значительном штарковском сдвиге пика поглощения;

3) конфигурации гетероструктур с квантовыми ямами, обеспечивающие трехкратное усиление эффекта электропоглощения по сравнению с традиционными одиночными симметричными квантовыми ямами.

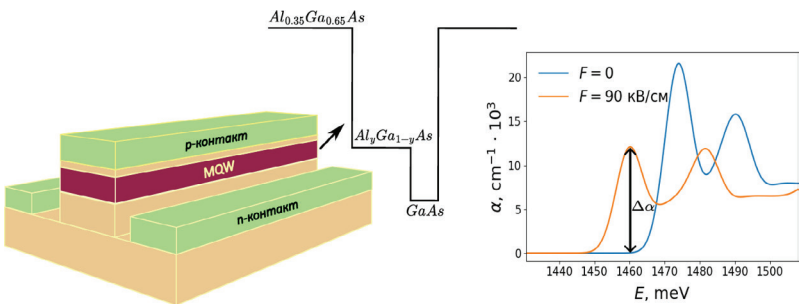


Рис. 1. Слева изображена структура рассматриваемого модулятора электропоглощения и его активной области, справа — спектр поглощения, демонстрирующий достижение большого изменения коэффициента поглощения Δα под действием электрического поля на рабочей длине волны

Литература

1. Chao C. Y.-P., Chuang S. L. Momentum-space solution of exciton excited states and heavy-hole–light-hole mixing in quantum wells // Physical Review B, 1993. Vol. 48. № 11. P. 8210.
2. Мустафин А. Д., Гришаков К. С., Васильевский И. С. Оптимизация электрооптического эффекта в структурах с квантовыми ямами на технологической платформе InP // Микроэлектроника, 2026. — Т. 55. — № 2.
3. Ahmadi V., Abedi K., Darabi E. New Asymmetric Quantum Well Traveling-Wave Electroabsorption Modulator with Very Low Insertion Loss and High Extinction Ratio // IEEE Photonics Technology Letters, 2018. Vol. 30. № 21. P. 1866–1869.

УДК 32.850.4

Разработка и верификация инструмента для моделирования пассивных СВЧ-компонентов

Коптев А. С.[1,2], Нуштаев А. В.[2], Потупчик А. Г.[2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Разработана методика создания моделей для пассивных СВЧ-компонентов при помощи метода моментов 2.5D MoM. Приведены результаты моделирования, верифицированные с помощью измерений реальных структур.
Ключевые слова: MoM; 2.5D; СВЧ; пассивные компоненты; ЭМ-симуляция; модели.

Development and verification of instrument for modeling passive microwave components

Koptev A. S.[1,2], Nushtaev A. V.[2], Potupchik A. G.
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

A methodology for creating models of passive microwave components using the 2.5D Method of Moments (MoM) has been developed. Simulation results, verified by measurements of real structures, are presented. Various approaches to constructing models for SPICE simulators are demonstrated.
Keywords: MoM; 2.5D; microwave; passive components; EM simulation; models.

В кремниевых структурах в СВЧ-диапазоне большое влияние имеют частотные эффекты. Из-за этих эффектов точность аналитических моделей становится недостаточной. ЭМ-симуляция производится на основе метода моментов (MoM). Такой метод способен учитывать эффекты, которые появляются в СВЧ-диапазоне. Пожалуй, главным недостатком ЭМ-симуляции является ее высокое время моделирования, по этой причине модели на основе аналитических формул еще применяются [1].

Исследована возможность разработки компактных моделей на основе ЭМ-симуляции методом моментов 2.5D MoM. Симуляция выполнялась в квазистатическом приближении из-за более высокой скорости моделирования, все устройства являются электрически средними по длине $L \approx \lambda/10$ [2]. Для верификации применялись результаты измерений реальных тестовых структур, что дает высокую точность верификации. Из плюсов можно отметить, что ЭМ-симуляция позволяет уменьшить количество тестовых структур на кристалле.

Для катушки ошибка составляет 4,55% на резонансной частоте (рис. 1). Для MIM-конденсатора ошибка составляет 4,3% при емкости 5 пФ (рис. 2).

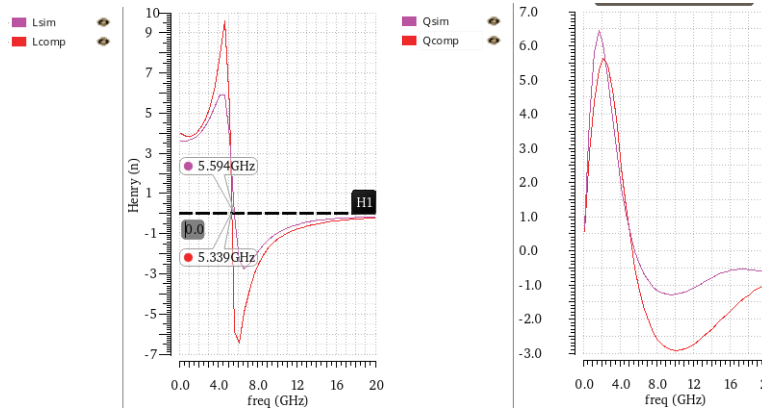


Рис. 1. Результат ЭМ-моделирования катушки

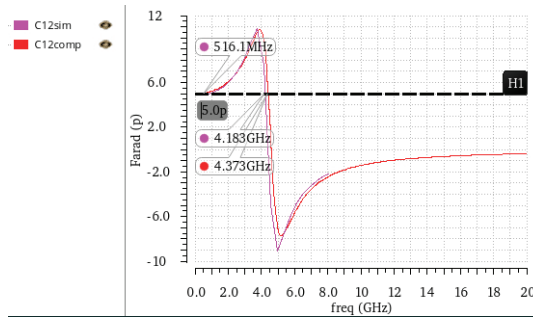


Рис. 2. Результат ЭМ-моделирования MIM-конденсатора

Литература

1. Stoebe J. Investigation and Modelling of On-Chip Inductors in a 28 nm Technology using Commercial EM-Simulation Tools // Thesis for: Bachelor Advisor: Prof. Dr. S. Milady. 2022.
2. Cadence Design Systems. EMX User Manual — Product Version 6.1. –May 2021.

УДК 004.942: 621.3.049.75

Сравнение предобуславливателей для итерационного решателя на основе метода Галёркина для интегрального уравнения электрического поля в экранированных многослойных печатных платах

Макаренко А. О., к. ф.-м. н., Жеглова П. В., к. ф.-м. н., Щербаков А. А.
Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49, лит. А
ITMO University
49 Kronverksky Ave., Bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia
aleksandr.makarenko@metalab.ifmo.ru

Разработан аналог блочно-диагонального предобуславливателя решателя на основе метода Галёркина для интегрального уравнения электрического поля для экранированных многослойных печатных плат, основанный на разложении по волноводным модам и асимптотически уменьшающий время расчета.
Ключевые слова: метод Галёркина; интегральное уравнение; печатные платы; PCB; предобуславливатель.

Comparison of preconditioners for an iterative 2.5D method-of-moments for boxed multilayer printed circuit boards

Makarenko A. O., Ph.D, Zeglova P. V., Ph.D, Shcherbakov A. A.
ITMO University
49 Kronverksky Ave., St. Petersburg, 197101, Russia
aleksandr.makarenko@metalab.ifmo.ru

An analogue of a block-diagonal preconditioner for the iterative solver of the 2.5D method of moments for boxed multilayer printed circuit boards based on waveguide mode expansion for electric field integral equation (EFIE) is developed with asymptotical speedup of calculations.
Keywords: method of moments; EFIE; printed circuit boards; PCB; preconditioner.

На сегодняшний день одним из основных этапов проектирования устройств микроэлектроники является численное моделирование отклика многослойных печатных плат (МПП). Известным способом для расчета свойств таких структур является применение метода Галёркина для интегрального уравнения электрического поля [1] (известного в литературе как *method of moments*), задача которого сводится к поиску распределения токов на МПП (рис. 1).

Стуктура матрицы метода позволяет использовать итерационные решатели, однако время поиска приближенного решения в таком случае существенно зависит от свойств оператора и частоты, на которой моделируется структура, что приводит к долгой работе алгоритма в окрестности резонансных точек. Для уменьшения количества итераций в проблемной области используются предобуславливатели [2].

В рамках данной работы решается проблема квадратичной зависимости времени работы от количества металлизаций в многослойнике с помощью аналога

блочно-диагонального предобуславливателя на основе метода Галёркина для интегрального уравнения электрического поля. Основой служит представление взаимодействия между металлизациями на разных интерфейсах как переизлученных волноводных мод, что в силу малого количества незатухающих волн и дает преимущество.

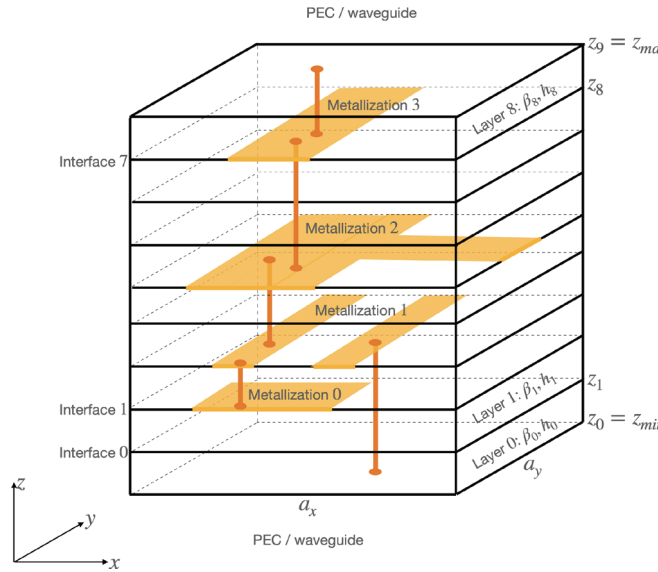


Рис. 1. Схематическое изображение экранированной многослойной печатной платы

Приведено сравнение данного предобуславливателя с левым и правым блочно-диагональными предобуславливателями для обобщенного метода минимальных невязок (GMRes). Таким образом, время работы уменьшается не только за счет трехдиагональной структуры предобуславливателя, линейно зависящего от количества металлизаций, но и за счет упрощения расчета взаимодействия между интерфейсами.

Литература

1. Crespo-Valero P. et al. Analysis of multilayer boxed printed circuits // MELECON 2006-2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. IEEE, 2006. P. 206–209.
2. Chen K. Matrix Preconditioning Techniques and Applications: monograph / K. Chen ; Reader in Mathematics, Department of Mathematical Sciences, The University of Liverpool. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. (Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics ; 19). ISBN 978-0-521-83828-3.

УДК 004.942

Моделирование и оптимизация характеристик ультрафиолетовых фотодетекторов на основе алмазных диодов Шоттки

Абдуллоев А. Д., Карданов Л. А., Гришаков К. С., к. ф.-м. н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
abdulloyev.a@list.ru, lokman_kardanov@mail.ru, ksgrishakov@mephi.ru

Выполнено 2D-моделирование псевдовертикальной структуры алмазного диода Шоттки для применения в качестве УФ-фотодетектора. Исследовано влияние параметров слоев на темновой ток и фоточувствительность. Сформулированы рекомендации по оптимизации структуры для повышения эффективности прибора.
Ключевые слова: алмаз; фотодетектор; диод Шоттки; моделирование; ультрафиолетовый диапазон.

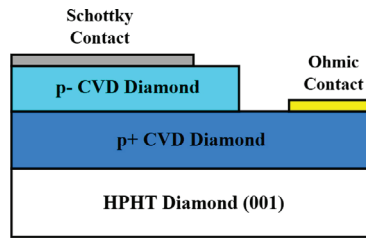
Modeling and optimizing the performance of UV detectors based on diamond Schottky diodes

Abdulloev A. D., Kardanov L. A., Grishakov K. S., Ph.D
National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia

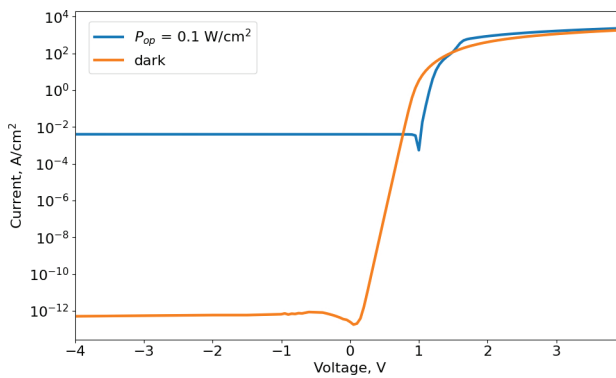
A 2D simulation of the pseudovertical diamond Schottky diode structure for use as a UV photodetector was performed. The effect of layer parameters on dark current and responsivity was investigated. Finally, recommendations for optimizing the structure to increase device efficiency were formulated.
Keywords: diamond; photodetector; Schottky diode; simulation; ultraviolet range.

Синтетический алмаз является перспективным материалом для создания ультрафиолетовых (УФ) фотодетекторов благодаря широкой запрещенной зоне (5,5 эВ, что соответствует краю поглощения ~225 нм), высокой радиационной стойкости, химической инертности и рекордной теплопроводности [1]. Эти свойства способны обеспечить стабильную работу приборов в экстремальных условиях и селективность к глубокому ультрафиолету. Однако создание эффективных классических *p-i-n*-структур фотодетекторов на алмазе существенно затруднено из-за высокой энергии ионизации донорных примесей. В связи с этим наиболее актуальной альтернативой являются приборы с барьером Шоттки. Разработка таких фотодетекторов требует оптимизации слоевой структуры и топологии контактов для баланса между высокой чувствительностью и низким темновым током. Экспериментальный подбор параметров структуры является дорогостоящей процедурой, поэтому применение методов приборно-технологического моделирования для предварительного анализа и прогнозирования характеристик прибора представляется актуальной задачей, особенно с учетом растущего интереса к силовым и оптоэлектронным применениям алмазных полупроводников [2].

В работе представлены расчеты для двумерной модели алмазного диода Шоттки с псевдовертикальной структурой. При описании электрофизических свойств алмаза используются модель неполной ионизации примеси, зависимости подвижности носителей от легирования и температуры. Для учета неидеальности контакта Шоттки применены модель пиннинга уровня Ферми на поверхностных состояниях и модель нелокального туннелирования через потенциальный барьер. Генерация носителей заряда рассчитывалась на основе данных оптического моделирования. Параметры модели были верифицированы по экспериментальным данным. В ходе исследования проанализировано влияние геометрических и электрофизических параметров структуры на величину фототока и спектральную чувствительность. По результатам проведенных расчетов сформулированы практические рекомендации по выбору оптимальной конструкции алмазного диода Шоттки, обеспечивающей максимальное значение чувствительности в области глубокого ультрафиолета при сохранении низкого уровня темнового тока.



а



б

Рис. 1. Схема диода Шоттки в псевдовертикальной геометрии (*а*); ВАХ диода Шоттки при наличии и отсутствии освещения (*б*)

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: комплексная 2D-модель диода Шоттки, учитывающая неполную ионизацию примесей, пиннинг уровня Ферми и механизмы туннелирования; установленные закономерности влияния параметров CVD-слоев алмаза на фототок

и чувствительность; оптимизированные параметры структуры, обеспечивающие максимальную чувствительность в глубоком УФ при минимальном темновом токе.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение/грант 075-15-2025-609).

Литература

1. Diamond: Electronic Properties and Applications / Eds. L. S. Pan, D. R. Kania. Boston: Springer, 1995.
2. Koizumi S., Umezawa H., Pernot J., Suzuki M. Power Electronics Device Applications of Diamond Semiconductors. Woodhead Publishing, 2018.

УДК 621.3.049.77

Разработка компактной модели деградации для КМОП-технологии 180 нм

Унтилова П. Д.[1,2], Потупчик А. Г.[2], Кривенцев А. М.[2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Разработана компактная модель деградации КМОП-транзисторов технологии 180 нм под воздействием эффекта горячих носителей. На основе результатов эксперимента получена зависимость изменения порогового напряжения от времени стрессового воздействия, внедренная в компактную модель BSIM3. Верификация показала, что модель позволяет оценивать влияние старения на характеристики схемы.
Ключевые слова: МОП-транзистор; горячие носители; деградация; BSIM3; SPICE-моделирование.

Development of a methodology for predicting changes in the parameters of MOS transistors and a compact degradation model for 180 nm CMOS technology

Untilova P. D.[1,2], Potupchik A. G.[2], Kriventsev A. M.[2]
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

A compact model for hot carrier injection (HCI) degradation in 180 nm CMOS transistors has been developed. The work addresses the critical need for incorporating aging effects into circuit-level simulations. Based on experimental data, the time-dependent threshold voltage shift was characterized and integrated into the BSIM3 compact model. Verification results demonstrate that the model accurately predicts the impact of aging on circuit performance.
Keywords: MOS transistor; hot carrier; degradation; BSIM3; SPICE modeling.

Инжекция горячих носителей является одним из ключевых механизмов деградации МОП-транзисторов в субмикронных технологиях. Данный эффект сопровождается сдвигом порогового напряжения и изменением токовых характеристик прибора [1].

На первом этапе сформирована тестовая структура, включающая одиночные NMOS- и PMOS-транзисторы с независимым доступом к выводам стока, затвора, истока и подложки. Далее был сформирован HCI-тест, задающий режимы стрессового воздействия, измерительные условия и временные интервалы нагрузки. По результатам экспериментальных данных установлено, что для PMOS-транзистора изменение порогового напряжения имеет выраженный монотонный характер и может быть описано степенной зависимостью вида $dVth\ (t) = A*t^B$, где

A и B –коэффициенты аппроксимации, определяемые по экспериментальным данным. Полученная зависимость (рис. 1) внедрена в компактную модель BSIM3 в виде дополнительной надстройки, модифицирующей базовый параметр порогового напряжения. Верификация на уровне прибора показала согласование модельных и экспериментальных данных по основному тренду деградации. На следующем этапе модифицированная модель была использована при моделировании кольцевого генератора. Показано, что деградация параметров транзисторов проявляется на схемном уровне в виде уменьшения частоты генерации.

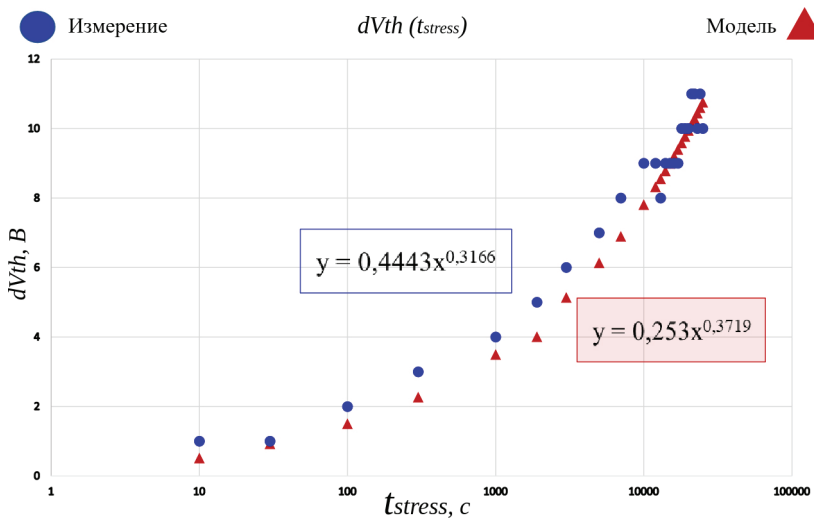


Рис. 1. Сравнение экспериментальной и модельной зависимостей dVth (t)

Литература

1. Thi-Phuong-Yen Tran. CMOS 180 nm Compact Modeling Including Ageing Laws for Harsh Environment. Electronics. Université de Bordeaux, 2022.
2. Takeda E., Suzuki N. An Empirical Model for Device Degradation Due to Hot-Carrier Injection // Elec. Dev. Lett., 1983. 4, № 4. P. 111–113.
3. Денисенко В. В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и наноэлектронике. — М.: Физматлит, 2010.

УДК 621.31

Перспективы развития современных литографических процессов

Рощупкин Д. В.
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
rochtch@iptm.ru

Миниатюризация ЭКБ связана с развитием литографических технологических процессов. Если процессы фотолитографии позволяют формировать элементы с минимальными размерами до 28 нм, то дальнейшая миниатюризация элементов ЭКБ связана с использованием уже более высокотехнологичных процессов, таких как рентгеновская литография, электронно-лучевая и ионно-лучевая литография, наноимпринтинг. Наиболее важными процессами являются электронно-лучевая и ионно-лучевая литография, которые позволяют не только формировать элементы ЭКБ с критическим размерами до 1–2 нм, но и создавать шаблоны для рентгеновской литографии и мастер-шаблоны для наноимпринтинга.
Ключевые слова: электронно-лучевая литография; рентгеновская литография; ионно-лучевая литография; наноимпринтинг.

The development of modern lithographic processes

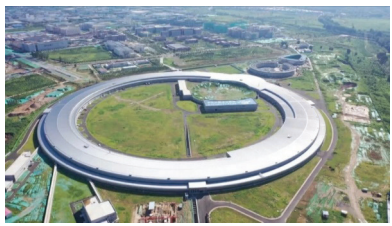
Roshchupkin D. V.
Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials, Russian Academy of Sciences
6 Academik Osipyan St., Chernogolovka, 142432, Russia
rochtch@iptm.ru

The miniaturization of integrated circuits is linked to advances in lithographic processes. While photolithography processes allow for the formation of elements with minimum dimensions down to 28 nm, further miniaturization of electronic circuit elements relies on the use of more advanced processes such as X-ray lithography, electron beam lithography, ion beam lithography, and nanoimprinting. The most important processes are electron-beam and ion-beam lithography, which not only allow the formation of integrated circuit elements with critical dimensions as small as 1–2 nm but also enable the creation of masks for X-ray lithography and master templates for nanoimprinting.
Keywords: electron beam lithography; X-ray lithography; ion beam lithography; nanoimprinting.

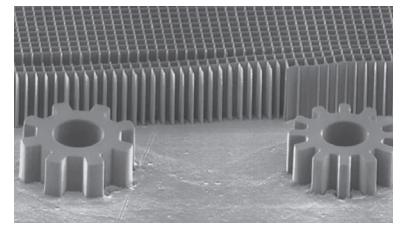
Развитие современной микро- и наноэлектроники связано с уменьшением размеров элементов микросхем. Для решения данных задач необходимо использовать современные технологические литографические процессы, которые постоянно развиваются. Наиболее распространенным методом формирования рисунка топологии микросхемы является метод фотолитографии. Сегодня развиваются методы фотолитографии с использованием для экспозиции фоторезистов ультрафиолетового излучения с длинами волн 248 и 193 нм, что потенциально позволяет

формировать структуры с критическими размерами до 28 нм. Дальнейшее развитие процессов фотолитографии связано с развитием источников излучения. В перспективе возможно использование длин волн 150 и 120 нм.

Дальнейшее развитие процессов литографии связано с использованием методов рентгеновской литографии, где возможно формирование элементов микросхем с критическими размерами 7–12 нм. В настоящий момент компания *ASML* выпускает EUV-литографы на длину волны 13,5 нм. Однако для развития рентгеновской литографии в диапазоне длин волн от жесткого рентгеновского излучения до EUV-диапазона можно использовать и источники синхротронного излучения, что сегодня активно реализуется в Китае [1–2]. Преимущество источников синхротронного излучения связано с пространственно-временной когерентностью излучения и плоским волновым фронтом излучения, что позволяет не только реализовывать проекционную литографию, но и использовать эффект Тальбота в области дифракции Френеля, а также рентгеновскую голографию. На рис. 1 представлены фотография источника синхротронного излучения и структура, сформированная методом рентгеновской литографии.



а



б

Рис. 1. Источник синхротронного излучения (*а*), использование рентгеновской литографии для формирования структур микромеханики (*б*)

Однако процессы фотолитографии и рентгеновской литографии требуют создания шаблонов. Здесь важным фактором является применение методов электронно-лучевой и ионно-лучевой литографии, которые позволяют не только изготавливать фотошаблоны, но и формировать критические элементы микросхем с размерами до 1–2 нм. Процессы электронно-лучевой и ионно-лучевой литографии являются медленными из-за того, что область экспонирования обычно не превышает 100×100 мкм^2. Это требует последующего перемещения и позиционирования подложки для совмещения экспонируемых областей, поэтому время экспонирования одной пластины может достигать суток. Обычно время перемещения и позиционирования экспонируемой подложки составляет до 95 % времени процесса электронно-лучевой литографии.

В последние десятилетия появились подходы, связанные с созданием многолучевых установок. Возможна реализация двух подходов. Прежде всего это установка электронно-лучевой литографии с несколькими мини-колоннами (девять мини-колонн), которые одновременно экспонируют пластину. В данном случае каждая мини-колонна осуществляет экспонирование на площади 100×100 мкм^2 с последующим перемещением и совмещением, что позволяет в итоге существенно уменьшить время экспозиции. Второй подход связан с реальной многолучевой

литографией, когда в процессе экспонирования участвуют несколько десятков тысяч электронных пучков. Электронные пучки могут одновременно осуществлять экспонирование как аналогичных структур, так и различных структур. Область сканирования одним пучком составляет 1×1 мкм^2. В данном случае возможно создание большой матрицы источников электронов ~260000 электронных пучков. Такой подход позволяет практически полностью отказаться от процесса перемещения и позиционирования экспонируемых подложек или свести его к минимуму.

В последнее время особое внимание уделяется процессу наноимпринтинга, который позволяет формировать структуры с размерами до 5 нм. Данный метод является самым технологически простым и считается самым перспективным. Но для создания мастер-шаблонов на начальном этапе надо использовать процессы электронно-лучевой или ионно-лучевой литографии.

Помимо создания литографических установок и разработки технологических процессов, необходимо решение важных задач с материалами для литографии. Прежде всего это задача разработки резистов, которая сегодня эффективно решается и имеет перспективы дальнейшего развития в области создания новых многообещающих резистов [3]. Другой важной задачей является использование оптически совершенных материалов для процессов фотолитографии и материалов фотошаблонов. Здесь очень высоки требования к качеству оптических материалов, коэффициент пропускания которых должен превышать 90 %. Если для фотолитографии на длине волны 248 нм можно использовать кварц, то на длине волны 193 нм уже необходимо использовать CaF_2. Здесь сегодня есть большие проблемы, так как производство материалов соответствующего оптического качества полностью отсутствует.

Для рентгеновской литографии также нужны шаблоны, но в этой сфере есть разные подходы. Прежде всего это вариант шаблонов на отражение рентгеновского излучения. Здесь необходимо использовать хорошую плоскостность поверхности с минимальной шероховатостью на уровне 2–3 Å, так как необходимо иметь плоский волновой фронт рентгеновской волны. Второй вариант шаблонов связан с литографией на пропускание, когда в качестве пропускающей мембраны можно использовать полиимид, Si_3N_4 или алмаз. В данном случае на поверхности мембраны из сильнопоглощающего материала формируется структура для последующего процесса проекционной рентгеновской литографии.

Литература

1. X-Ray Lithography for Nanofabrication: Is There a Future? / A. Bharti, A. Turchet, B. Marmiroli // Frontiers in Nanotechnology, 2022. Vol. 4. P. 835701.
2. J. R. Maldonado, Peckerar M. X-ray lithography: Some history, current status and future prospects // Microelectronic Engineering, 2016. Vol. 61. P. 87–93.
3. Zaitsev S. I., Irzhak D. V., Il'in A. I., Knyazev M. A., Roshchupkin D. V., Grachev V. P., Kurbatov V. G., Malkov G. V. Prospects for the Development of Electron-Beam and Ion-Beam Lithography in Russia // Russian Microelectronics, 2025. Vol. 54. P. 376–383.

УДК 004.932.4

Разработка инструмента коррекции эффектов оптической близости на основе моделирования с учетом геометрических ограничений топологии

Московцев А. Ф.[1,2], Иванов В. В.[1]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
amoskovtsev@niime.ru, vlaivanov@niime.ru
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В данной работе рассматривается подход к реализации коррекции эффектов оптической близости на основе моделирования с учетом геометрических ограничений топологии. Описываются численные методы оптимизации топологии, а также принципы построения вычислительной архитектуры для обработки топологий кристаллов.
Ключевые слова: фотолитография; коррекция эффектов оптической близости; проверка правил проектирования маски.

Towards an MRC-aware model-based optical proximity correction tool

Moskovtsev A. F.[1,2], Ivanov V. V.[1]
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
amoskovtsev@niime.ru, vlaivanov@niime.ru
[2] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

This work presents an approach to model-based optical proximity correction with MRC awareness. Numerical methods for topology optimization are described, along with principles for designing computational architecture for processing full-chip layouts.
Keywords: OPC; photolithography; MRC.

В условиях уменьшения проектных норм и роста сложности топологий интегральных схем существенно возрастают требования к точности литографических процессов. Одним из наиболее эффективных методов компенсации искажений является коррекция эффектов оптической близости, основанная на численном моделировании процесса формирования изображения и последующей коррекции топологии (model-based optical proximity correction, MB-OPC)[1, 2].

Специалисты, разрабатывающие современные подходы к MB-OPC, сталкиваются с рядом ограничений, связанных с высокой вычислительной сложностью моделирования и необходимостью обработки больших объемов геометрических данных [3]. Дополнительную сложность представляет обеспечение устойчивости

алгоритмов оптимизации при наличии технологических ограничений на параметры топологии.

В работе рассматривается архитектура инструмента MB-OPC, ориентированного на обработку топологий кристаллов за счет их иерархического разбиения на макрообласти. Такой подход позволяет локализовать вычисления и обеспечить масштабируемость при ограничениях по вычислительным ресурсам.

Оптическое моделирование реализуется на основе метода Хопкинса [4] с учетом частичной когерентности источника освещения. Изображения в резисте моделируется путем применения сигмоидальной функции к воздушному изображению.

Геометрия топологии представляется в виде набора сегментов, получаемых путем фрагментации полигонов. Такой подход обеспечивает локализацию управления положением границ и позволяет формализовать задачу коррекции как итерационный процесс минимизации ошибки размещения края (edge placement error, EPE) [5].

Существенной особенностью рассматриваемого подхода является учет геометрических ограничений на каждом этапе коррекции. В процессе оптимизации обеспечивается соблюдение минимальной ширины элементов, минимальных расстояний между структурами, а также ограничений по площади полигонов. Это достигается за счет включения процедур контроля и коррекции геометрии в итерационный контур оптимизации.

Предложенная архитектура инструмента допускает расширение как в части усложнения моделей литографии, так и в части методов оптимизации, что позволяет рассматривать ее как основу для решений, применимых в диапазоне технологических норм до 28 нм.

Литература

1. Levinson H. J. Principles of Lithography, 1000 20th Street, Bellingham. WA 98227-0010 USA: SPIE, 2010.
2. Cobb N. B. Fast Optical and Process Proximity Correction Algorithms for Integrated Circuit Manufacturing.
3. Jin Q. et al. Recent advances in computational lithography technology // Moore. More, 2025. Vol. 2. no 1. P. 15.
4. Mack C. Fundamental principles of optical lithography: the science of microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.
5. Banerjee S., Li Z., Nassif S. R. ICCAD-2013 CAD contest in mask optimization and benchmark suite // 2013 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD). San Jose, CA, USA: IEEE, 2013. P. 271–274.

УДК 51-74

Разработка и калибровка процессной модели фотолитографии для резистов с химическим усилением

Степанова М. Г.[1,2], Шарапов А. А.[1,2], к. ф.-м. н., Литаврин М. В.[1], Шишлянников А. В.[1,2], к. ф.-м. н., Фортунова Е. А.[1,2], Горнев Е. С.[1], академик РАН, д. т. н.
[1]АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
mastepanova@niime.ru
[2]Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Построена и откалибрована модель химически усиленного фоторезиста для технологии 180 нм. Калибровка выполнена на одномерных тестовых структурах, верификация –на двумерных элементах. Выявлены особенности моделирования сложных двумерных топологий. Ошибка предсказания размеров не превышает 2%.
Ключевые слова: фотолитография; процессное моделирование фотолитографии; модель фоторезиста; фоторезист с химическим усилением.

Development and calibration of a photolithography process model for chemically amplified resists

Stepanova M. G.[1,2], Sharapov A. A.[1,2], Ph.D, Litavrin M. V.[1], Shishlyannikov A. V.[1,2], Ph.D, Fortunova E. A.[1,2], Gornev E. S.[1], Academician of RAS, Sc.D
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
mastepanova@niime.ru
[2] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

A chemically amplified photoresist model for 180 nm technology has been built and calibrated. The calibration is based on one-dimensional test structures, and the verification is performed on two-dimensional patterns. The study reveals specific features arising in modeling complex 2D topologies. The model predicts critical dimensions with an error of less than 2%.
Keywords: photolithography; photolithography process modeling; photoresist model; chemically amplified photoresist.

Процесс фотолитографии занимает ключевое место в производстве интегральных схем [1]. Для предсказания критических размеров структур, оценки возможностей их формирования и коррекции технологических условий активно используются инструменты вычислительной литографии. Одним из ее направлений является процессное (полное) моделирование. Этот подход основан на использовании уравнений, описывающих физико-химические процессы в резисте. Процессное моделирование позволяет отслеживать изменения характеристик пленки

на протяжении всех этапов фотолитографии и предсказывать результирующий трехмерный профиль рисунка в резисте [2].

Отличительной особенностью процессной модели является интерпретируемость ее параметров [3]. Многие из них известны из описания технологических режимов или могут быть измерены в независимых экспериментах [4]. Однако часть параметров, несмотря на понятный физический смысл, представляет трудность для непосредственного измерения, поэтому требуется их калибровка по экспериментальным данным.

Проведен анализ основных уравнений, описывающих физико-химические процессы в резисте на этапах экспозиции, сушки и проявления. На языке Python построена модель формирования изображения, учитывающая зависимость коэффициентов диффузии компонентов фоторезиста от их локальной концентрации (по Фуджите — Дулиттлу) и температурную зависимость констант скоростей реакций.

Модель откалибрована на наборе данных измерений критических размеров одномерных (1D) тестовых структур [5]. Основное внимание в данной работе уделено расширению модели на случай двумерных топологических элементов и ее верификации на 2D-рисунках. В ходе верификации выявлены ключевые особенности моделирования структур сложных конфигураций: трехмерный характер диффузии и смешанные граничные условия, требующие пересмотра численной реализации; неоднозначность метрик оценки критических размеров элементов, геометрия которых не сводится к регулярным линиям или зазорам; искажение профиля в угловых областях.

Построенная модель литографического процесса для технологии 180 нм позволяет предсказывать размеры структур с ошибкой менее 2%, а также строить их профили. Принципы построения модели химически усиленного фоторезиста и определения значений ее параметров потенциально могут быть использованы для процессов проектных норм менее 180 нм.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-91-18002.

Литература

1. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. –№ S5–1 (102). — С. 13–19.
2. Балан Н. Н., Иванов В. В., Кузовков А. В., Соколова Е. В., Шамин Е. С. Основные подходы к моделированию формирования фоторезистивной маски в вычислительной литографии // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники, 2020. — Т. 22. — № 4. — С. 279–289.
3. Smith M. D., Byers J. D., Mack C. A. The lithographic impact of resist model parameters // Advances in Resist Technology and Processing XXI. SPIE, 2004. Vol. 5376. P. 322–332.
4. Литаврин М. В., Шарапов А. А., Шишлянников А. В., Горнев Е. С. Экстракция эмпирических констант экспонирования и постэкспозиционной сушки для фоторезистов с химическим усилением // Наноиндустрия, 2024. — Т. 17. — № S10–2 (128). — С. 710–718.
5. Литаврин М. В., Шарапов А. А., Горнев Е. С. Моделирование изображения в резисте с помощью модели со смешанными параметрами // Наноиндустрия, 2025. — Т. 18. — № S11–3 (135). — С. 1014–1026.

УДК 004.932.4

Исследование и разработка компактных моделей резиста для задач литографического моделирования и ОРС

Сергеев Е. Д., Московцев А. Ф., Иванов В. В.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
esergeev@niime.ru, amoskovtsev@niime.ru, vivanov@niime.ru

Разработан программный комплекс для литографического моделирования, интегрирующий оптический симулятор на основе подхода Аббе с компактной моделью резиста на принципе вариативного порога (VTR). Реализована гибкая параметризация оптических характеристик (числовая апертура, длина волны, форма источника, степень когерентности) и коэффициентов модели резиста (экстремумы интенсивности, крутизна характеристической функции). Разработанное решение ориентировано на интеграцию в вычислительные ОРС-пайплайны в качестве законченного вычислительного ядра для многократных итерационных расчетов, обеспечивая баланс между точностью прогнозирования критических размеров и вычислительной эффективностью.
Ключевые слова: литографическое моделирование; оптическая коррекция близости (ОРС); модель резиста с вариативным порогом (VTR); компактная модель резиста; подход Аббе; вычислительное ядро ОРС-пайплайна; эффекты оптической близости.

Development of compact variable threshold resist models for lithography simulation and OPC

Sergeev E. D., Moskovtsev A. F., Ivanov V. V.
Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
esergeev@niime.ru, amoskovtsev@niime.ru, vivanov@niime.ru

A software framework for lithography simulation has been developed, integrating an optical simulator based on the Abbe approach with a compact variable threshold resist (VTR) model. Flexible parameterization of optical characteristics (numerical aperture, wavelength, source shape, degree of coherence) and resist model coefficients (intensity extrema, slope of characteristic function) has been implemented. The developed solution is intended for integration into computational OPC pipelines as a self-contained computational kernel for multiple iterative calculations, providing a balance between critical dimension prediction accuracy and computational efficiency.
Keywords: optical proximity correction (OPC); variable threshold resist model (VTR); compact resist model; Abbe imaging formulation; OPC pipeline computational kernel.

Проекционная фотолитография характеризуется ограничениями точности воспроизведения топологических элементов, обусловленными эффектами оптической близости. Для компенсации данных искажений применяются методы оптической коррекции близости (ОРС), базирующиеся на многократном моделировании процесса формирования литографического изображения для крупных фрагментов

топологии. С уменьшением проектных норм погрешности, вносимые упрощенными пороговыми моделями, становятся сопоставимыми с допусками на критические размеры (CD), что приводит к систематическим ошибкам при прогнозировании ширины линий, особенно в областях с высокой плотностью упаковки элементов [1]. Данная проблема усугубляется для химически усиленных резистов, чувствительность которых немонотонно зависит от локального распределения интенсивности экспонирующего излучения.

Существующие подходы к моделированию резиста можно разделить на две основные категории. К первой относятся физико-химические модели, описывающие кинетику экспонирования и диффузию компонентов, что обеспечивает высокую точность предсказания профилей. Однако процедура их калибровки сопряжена с необходимостью проведения масштабных экспериментальных исследований, а высокая вычислительная сложность делает их применение в итерационных OPC-циклах затруднительным из-за кратного возрастания времени счета при многократных пересчетах топологии. Вторая категория представлена компактными пороговыми моделями, использующими бинарное или сигмоидальное преобразование рассчитанной интенсивности. Данные модели вычислительно эффективны, но фиксированный порог не учитывает вариативность резистной чувствительности в зависимости от градиентов интенсивности, что особенно критично для топологий с малыми зазорами между элементами [2]. Компромиссным решением, реализуемым в настоящей работе, является модель резиста с вариативным порогом (variable threshold –VT), в которой порог проявления динамически адаптируется к локальным характеристикам поля интенсивности. Это позволяет существенно повысить точность моделирования без кратного увеличения вычислительных затрат.

Целью данного иссследования является разработка программного комплекса для литографического моделирования, объединяющего высокопроизводительный оптический симулятор на основе формализма Аббе с компактной VT-моделью резиста. В отличие от существующих реализаций, предлагаемый симуляционный движок предусматривает гибкое конфигурирование как оптических параметров (числовая апертура, длина волны, форма источника освещения, степень частичной когерентности), так и параметров модели резиста (экстремумы интенсивности, крутизна характеристической функции), что обеспечивает его адаптацию к различным классам фоторезистов и условиям экспонирования. Разрабатываемое решение ориентировано на интеграцию в вычислительные OPC-пайплайны в качестве законченного вычислительного ядра для многократных итерационных расчетов.

Расчет распределения интенсивности, подаваемого на вход VT-модели, осуществляется в рамках скалярного приближения теории дифракции с использованием интегральной формулировки Аббе. Модель оптики предусматривает случайное семплирование точечных источников в пространстве частот, что обеспечивает управляемое соотношение между точностью вычислений и временем расчета. Данный подход, верифицированный для проектных норм от 180 до 65 нм, выбран в качестве вычислительного ядра для подачи входных данных на модель резиста. Научно-практическая значимость работы сосредоточена именно на VT-модели резиста, поскольку ее параметризация в значительной степени определяет конечную точность предсказания CD.

Разработанный программный комплекс представляет собой законченный симуляционный движок, интегрирующий оптический модуль на основе подхода Аббе и модуль резиста с вариативным порогом. Архитектура комплекса предусматривает гибкое задание литографического рецепта, включающего как оптические параметры, так и параметры модели резиста. Проведенные вычислительные эксперименты демонстрируют возможность моделирования фрагментов реального дизайна размером 30×30 мкм с разрешением 10 нм/пиксель без разбиения на подобласти за время менее одной секунды, что обеспечивает существенное ускорение по сравнению с доступными открытыми реализациями при сохранении сопоставимого уровня точности. Предложенное решение ориентировано на внедрение в промышленные маршруты проектирования в качестве интегрируемого компонента OPC-пайплайнов, обеспечивая оптимальный баланс между физической достоверностью модели резиста и вычислительной эффективностью, требуемой для многовариантных оптимизационных процедур.

Литература

1. Mack C. Fundamental principles of optical lithography: the science of microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.
2. Granik Y., Cobb N., Do T. Universal process modeling with VTRE for OPC // Optical Microlithography XV / Proceedings of SPIE, 2002. Vol. 4691. P. 377–394.

УДК 004.032.26

Анализ чувствительности топологии паттернов к вариациям параметров литографии с помощью динамических нейронных операторов Фурье

Вологжанин Н. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Институт системной и программной инженерии и информационных технологий (СПИНТех)
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
vologzhanin.nik@mail.ru

В работе предложен динамический Fourier Neural Operator (FNO) для моделирования литографических процессов в EUV-узлах полупроводникового производства. Разработана параметрически обусловленная рекуррентная архитектура, которая интегрирует вариации дозы экспозиции, дефокуса, толщины фоторезиста и числовой апертуры как временные входы. Это позволяет предсказывать эволюцию литографических паттернов (критический размер, ошибку размещения края, топологические дефекты) и вычислять аналитические градиенты чувствительности параметров. Предложенный подход обеспечивает стохастически-ориентированное предсказание выхода годных изделий с учетом случайных вариаций.

Ключевые слова: Fourier Neural Operator; динамический FNO; EUV-литография; анализ чувствительности; robust OPC; Монте-Карло; критический размер (CD); ошибка размещения края (EPE); yield prediction; стохастические эффекты.

Sensitivity analysis of pattern topology to variations of lithography parameters using dynamic neural Fourier operators

Vologzhanin N. A.
National Research University of Electronic Technology (MIET), Institute of System and Software Engineering and Information Technologies (SPINTech)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
vologzhanin.nik@mail.ru

This paper proposes a dynamic Fourier Neural Operator (FNO) for modeling lithography processes in EUV nodes of semiconductor manufacturing. A parametrically conditioned recurrent architecture is developed, which integrates variations in exposure dose, defocus, resist thickness, and numerical aperture as temporal inputs. This enables prediction of lithographic pattern evolution (critical dimension, edge placement error, topological defects) and computation of analytical sensitivity gradients with respect to the parameters. The proposed approach provides stochastic-aware yield prediction accounting for random variations.

Keywords: Fourier Neural Operator; dynamic FNO; EUV lithography; sensitivity analysis; robust OPC; Monte Carlo; critical dimension (CD); edge placement error (EPE); yield prediction; stochastic effects.

В полупроводниковой промышленности переход к технологическим узлам ниже 10 нм сопровождается усилением стохастических эффектов в экстремальной ультрафиолетовой (EUV) литографии (шероховатость линий, локальные вариации критических размеров), которые снижают выход годных изделий. Традиционные методы моделирования, такие как симуляции Монте-Карло, требуют часов или дней расчетов на один сценарий, что делает их непригодными для промышленного анализа окон процесса и оптимизации оптического эффекта близости(OPC) [4].

В работе представлен динамический нейронный оператор Фурье (FNO) [1] — модификация стандартного FNO, в котором параметры процесса (доза, дефокус, толщина резиста, числовая апертура) интегрированы как временные или пространственные входы. Архитектура базируется на многосеточном FNO (MgFNO) [3], обеспечивающем стабильное долгосрочное предсказание эволюции паттернов при непрерывном изменении параметров. Для задачи оптимизации масок предложенный динамический FNO интегрируется в контур robust OPC (устойчивая OPC) [2], где минимизируется дисперсия ошибки размещения края под действием случайных вариаций.

Разработанная модель дает возможность вычислить аналитические градиенты чувствительности критического размера и ошибки размещения края по всем параметрам за один прямой и обратный проход [1], что на порядки быстрее традиционных конечно-разностных схем. В отличие от сверточных нейронных сетей, FNO работает в частотной области и эффективно захватывает глобальные зависимости, что критично для моделирования дифракции и размытия в EUV-литографии [5].

Экспериментальная постановка включает генерацию траекторий параметров (вариации дозы 0,8–1,2×, дефокуса ±100 нм и т.д.) и сравнение с эталонным симулятором. Показано, что динамический FNO обеспечивает ускорение вычислений по сравнению с традиционными методами [4] при сопоставимой точности предсказания CD и EPE. Дальнейшие исследования направлены на расширение модели на другие технологические вариации (температура PEB, неоднородности резиста) с использованием многосеточных архитектур [3].

Литература

1. Li Z., Kovachki N., Azizzadenesheli K., Liu B., Bhattacharya K., Stuart A., Anandkumar A. Fourier Neural Operator for Parametric Partial Differential Equations // International Conference on Learning Representations (ICLR), 2021. URL: https://arxiv.org/abs/2010.08895.
2. Yang H., Li Z., Sastry K., Mukhopadhyay S., Anandkumar A., Khailany B., Singh V., Ren H. Large Scale Mask Optimization Via Convolutional Fourier Neural Operator and Litho-Guided Self Training // arXiv preprint arXiv:2207.04056, 2022.
3. Guo Z.-H., Li H.-B. MgFNO: Multi-grid Architecture Fourier Neural Operator for Parametric Partial Differential Equations // arXiv preprint arXiv:2407.08615, 2024.
4. He H., Wang Z., Wang J., Wu T., He X., Yu B., Yu J., Geng H. LithoSim: A Large, Holistic Lithography Simulation Benchmark for AI-Driven Semiconductor Manufacturing // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2025.
5. Es'kin V.A., Egor V.Ivanov. Physics-informed neural networks and neural operators for a study of EUV electromagnetic wave diffraction from a lithography mask // arXiv preprint arXiv:2507.04153, 2025.

УДК 004.94

Алгоритм многоуровневой ILT-SRAF-оптимизации с регуляризацией и блочной аппроксимацией

Павлов И. С.[1,2], Федоров И. Ю.[2], Белоусов С. А.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] ПАО «Сбербанк»
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
IvSePavlov@sberbank.ru

Multi-Level ILT-SRAF Optimization Algorithm with Regularization and Block Approximation

Pavlov I. S.[1,2], Fedorov I. Yu.2, Ph.D, Belousov S. A.2
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] Sberbank, PJSC
19 Vavilova St., Moscow, 117312, Russia
IvSePavlov@sberbank.ru

With decreasing dimensions of layout elements formed on silicon wafers by photolithography, diffraction and interference increasingly affect the printed geometry. This work presents a modified two-stage ILT-SRAF algorithm for photomask optimization. At the first stage, multi-level iterative optimization is used to generate a Continuous Transmission Mask (CTM). The objective function accounts for geometric accuracy, dose and focus variations, and regularization that drives mask values toward binary levels and suppresses the formation of SRAF elements far from the main pattern. At the second stage, the CTM is post-processed using Coding Tree Unit (CTU) block approximation, which simplifies the photomask geometry and reduces the number of electron-beam shots required for fabrication. The algorithm was evaluated on binary masks generated from the Chinese MNIST dataset and compared with a classical ILT implementation. The proposed approach improves printing accuracy and process-variation robustness. The algorithm was verified for a 365 nm lithography process and is intended for further integration into a layer-processing pipeline and experimental validation on real layouts.

Keywords: inverse lithography technology; sub-resolution assist features; continuous transmission mask; multi-level optimization; photomask; computational lithography.

С уменьшением размеров элементов топологий, формируемых на кремниевой пластине посредством литографии, все более заметное влияние на итоговую геометрию и размеры этих топологий оказывают оптические эффекты, такие как дифракция и интерференция. Для компенсации этих искажений применяются специальные методы повышения разрешения (resolution enhancement techniques –RET), в числе которых фазосдвигающие маски (phase-shifted mask –PSM), внеосевое освещение (off-axis illumination), технологии оптической коррекции близости (OPC), SRAF-элементы (sub-resolution assist features) и методы инверсной литографии

(ILT). Технология ILT позволяет, таким образом, оптимизировать чертеж слоя на фотошаблоне (ФШ), чтобы расширить диапазон проектных норм на имеющемся оборудовании и добиться большей устойчивости к вариациям процесса (PV) литографии [1]. Последующее изготовление ФШ предполагает его экспонирование короткими импульсами (shots) на электронно-лучевом генераторе по оптимизированному ILT-чертежу. Эта процедура не позволяет создавать слишком мелкие детали на поверхности ФШ из-за ограничений минимального размера элементов ILT и увеличения длительности процесса облучения, что, как следствие, приводит к его удорожанию. В этой связи актуальными являются выбор и адаптация алгоритмов ILT под конкретный технологический процесс, в частности под одну из наиболее распространенных в России технологий с длиной волны 365 нм. Предложенный ранее в [1] алгоритм контролируемой деформации *ILT Deform* предполагал многократное моделирование проекции изображения маски через симулятор литографа и вычисление компенсирующей деформации чертежа ФШ. Недостатком метода является зависимость времени сходимости от сложности оптимизируемых структур, т. е. «сложные» структуры обрабатываются дольше, чем «простые». Алгоритм требует задания параметра регуляризации физического размера, уменьшающего искажение исходной маски, и не предусматривает возможность размещения SRAF-элементов. В свою очередь, *ILT Ornament* может добавлять SRAF, используя методы безградиентной оптимизации, однако он не учитывает PV и не использует критерии технологичности изготовления.

Данная работа является продолжением исследований [1] в области разработки и внедрения технологии оптимизации ФШ. В рамках этих исследований нами предложен модифицированный алгоритм ILT-SRAF, состоящий из двух этапов. На первом этапе выполняется многоуровневая (multi-level ILT [2]) итерационная оптимизация, результатом которой является изображение непрерывной маски CTM (continuous transmission mask) [3]. Целью оптимизации на этом этапе является нахождение такого набора «серых» пикселей CTM, который даст наилучшее совпадение с целевой топологией на пластине. Основная сложность здесь в том, что теоретический чертеж CTM нельзя изготовить по причине дискретности генератора ФШ и нелинейных процессов фотохимии. Поэтому на втором этапе проводится постобработка CTM, обеспечивающая ее технологичность и возможность изготовления на ФШ.

Для реализации данного алгоритма была проведена доработка симулятора литографических процессов, разработанного в Сбере (см. подробнее в [1]), в который была добавлена возможность обратного распространения ошибки через модели оптики и резиста. Центральным элементом этапа оптимизации является минимизация целевой функции $L(M)$ (loss-function), используемой для расчета градиента оптимизируемой маски M. Было предложено улучшение $L(M)$ за счет добавления к классическому члену L_{GEOM}, отвечающему за геометрическую точность, двух дополнительных слагаемых L_{DV} и L_{REG}. Слагаемое L_{DV} минимизирует разброс результатов симуляций при изменении дозы и фокуса, что повышает устойчивость ФШ к вариациям процесса. L_{REG} минимизирует отклонения изображения маски от идеальных (бинарных) значений, а также выполняет роль фильтра, препятствующего формированию SRAF-элементов на большом удалении от основного паттерна. Целевая функция в математическом представлении обозначается как

$$L(M) = L_{GEOM} + L_{DV} + L_{REG}, \quad (1)$$

$$L_{GEOM} = \|Z - M\|_2^2, \quad (2)$$

$$L_{DV} = \|Z_+ - Z_-\|_2^2, \quad (3)$$

$$L_{REG} = \|W(M)^2(1 - W(M))^2\|_2^2, \quad (4)$$

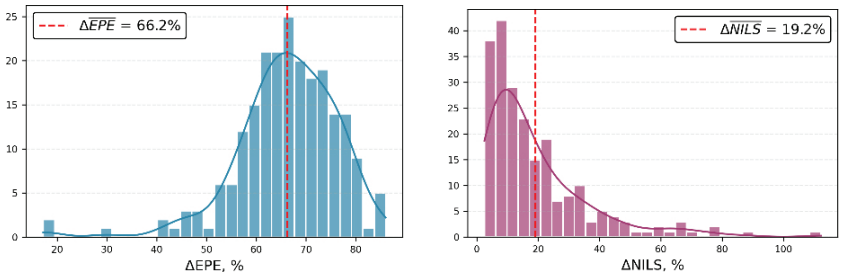
где M — изображение оптимизируемой маски; Z –симуляция M; Z_+, Z_- — симуляции M выполненные при отклонении дозы/фокуса на $\pm\alpha\,\%$ (где $\alpha \in [0, 10]$). Служебная функция W(M) определяется следующим образом:

$$W(M) = \frac{1+e^{-b}}{1-e^{-b}}\left[2\sigma(bM) - 1\right], \quad (5)$$

где $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ –сигмоидная функция; b –обучаемый параметр, характеризующий крутизну регуляризации целевой функции. Важной особенностью алгоритма является вычислительная инерционность: каждый шаг оптимизации требует своей симуляции и операции сравнения, что в составе конвейера ILT становится ресурсоемкой операцией. Для уменьшения времени итераций при генерации СТМ в алгоритм введена многоуровневая оптимизация, представляющая собой кратное уменьшение линейных размеров M в k раз. При значениях $k \in [2, 8]$ время генерации СТМ сокращается в k^2 раз. На этапе постобработки в алгоритме реализована блочная аппроксимация СТМ с помощью алгоритма CTU (coding tree unit) [4]. CTU разбивает криволинейную СТМ на иерархические блоки с рекурсивным бинарным делением до достижения минимально допустимого размера для печати ФШ. Это позволяет упростить геометрию ФШ и понизить число shots, необходимых для его изготовления.

Для проверки работоспособности алгоритма была проведена оптимизация изображений из набора данных Chinese MNIST [5]. Изображения были преобразованы в бинарные маски 2048×2048 пикселей. В результате показано, что $\overline{EPE}$ для оптимизированных изображений снизилась на 66,2 % по сравнению с исходными изображениями (см. рис. 1*а*). Было проведено сравнение разработанного алгоритма ILT-SRAF с классическим ILT, который был реализован без многоуровневой оптимизации и использовал целевую функцию $L'(M) = L_{GEOM}$. Учет вариабельности дозы/фокуса L_{DV}, введение регуляризации L_{REG} и многоуровневая оптимизация позволили улучшить $\overline{NILS}$ [6] на 19,2 %.

Таким образом, в работе был представлен алгоритм многоуровневой оптимизации элементов топологий ILT-SRAF, который позволяет повысить геометрическую точность печати чертежа слоя микроэлектронного компонента на пластине и устойчив к вариациям литографического процесса. Алгоритм верифицирован на техпроцессе с длиной волны 365 нм. Его эффективность подтверждена на репрезентативных наборах синтетических тестовых структур. В дальнейшем предполагаются внедрение алгоритма в конвейер обработки слоя и экспериментальная проверка на реальных топологиях.



а *б*

Рис. 1. Показатели работы алгоритма ILT-SRAF для оптимизированных изображений Chinese MNIST: *а*) снижение $\overline{EPE}$ относительно неоптимизированных изображений; *б*) улучшение $\overline{NILS}$ относительно классического ILT

Литература

1. Белокрыс-Федотов А. И., Гаранжа В. А., Капорин И. Е., Кудрявцева Л. Н., Седунов С. М., Ступников В. В., Федонин М. П., Фёдоров И. Ю. Алгоритмы оптимизации фотошаблона для коррекции эффекта оптической близости на фотолитографии // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов, 2025. — Вып. 2. — С. 51–66.
2. Sun S., Yang F., Yu B., Shang L., Zeng X. Efficient ILT via multi-level lithography simulation // 2023 60th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC): conference proceedings. San Francisco, CA, 2023. P. 1–6.
3. Yu Z., Liao P., Ma Y., Yu B., Wong M. CTM-SRAF: continuous transmission mask-based constraint-aware subresolution assist feature generation // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2023. Vol. 42. P. 3402–3411.
4. Sullivan G. J., Ohm J.-R., Han W.-J., Wiegand T. Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012. Vol. 22. № 12. P. 1649–1668. DOI: 10.1109/TCSVT.2012.2221191.
5. Preda G. Chinese MNIST: Handwritten Chinese Numbers Dataset [Электронный ресурс] // Kaggle, 2021. URL: https://www.kaggle.com/datasets/gpreda/chinese-mnist (дата обращения: 22.04.2026).
6. Mack C. A. Using the Normalized Image Log-Slope // The Lithography Expert, 2001. Winter. Austin, Texas: FINLE Technologies, A Division of KLA-Tencor.

УДК 004.896

Агентно-ориентированный подход к диагностике оптической системы литографического оборудования: архитектура и результаты анализа аберраций волнового фронта

Первунецких А. А.[1,2], Фёдоров И. Ю.[1], к. ф.-м. н.
[1] ПАО «Сбербанк России»
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
IYUFedorov@sberbank.ru
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Pervunetskikh.aa@phystech.edu

Важной проблемой изготовления оптической системы (ОС) литографа является комплексная задача минимизации отклонений ее параметров от проектных. Эти отклонения влияют не только на разрешение, но и на качество процесса литографии, что требует автоматизированного анализа состояния ОС. Для решения данной проблемы был предложен агентно-ориентированный подход диагностики на основе восстановления волнового фронта по SEM-изображениям с градиентной оптимизацией коэффициентов Цернике.
Ключевые слова: полиномы Цернике; агенты; литография; диагностика оптических систем.

An Agent-Based Approach to the Diagnostics of the Optical System of Lithographic Equipment: Architecture and Wavefront Aberration Analysis Results

Pervunetskikh A. A.[1,2], Fedorov I. Yu.1
[1] Sberbank of Russia, PJSC
19 Vavilova St., Moscow, 117312, Russia
IYUFedorov@sberbank.ru
[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
Pervunetskikh.aa@phystech.edu

A significant challenge in manufacturing the optical system (OS) of a lithography stepper is the complex task of minimizing deviations of its parameters from the design specifications. These deviations affect not only the resolution but also the quality of the lithography process, which necessitates an automated analysis of the OS state. To address this problem, an agent-based diagnostic approach was proposed, based on wavefront reconstruction from SEM images with gradient optimization of Zernike coefficients.
Keywords: Zernike polynomials; agents; lithography; optical system diagnostics.

Оптическая система (ОС), или объектив-проектор, является одним из самых сложных компонентов в литографе. При ее конструировании и изготовлении неизбежно возникают аберрации, которые напрямую влияют на разрешающую способность и технологическое окно процесса в целом [1]. После монтирования изготовленных

оптических элементов в единую ОС степень волновых искажений может заметно отличаться от проектных по причине качества и точности сборки, возможного несоответствия параметров линз, допусков материалов и т. д. Это требует отдельной процедуры измерения и анализа ОС, а также последующих доработок конструкторской документации инженером-конструктором и перенастройки изготовленного объектива. В связи с этим актуальной задачей является создание помощника конструктора (технолога), который мог бы осуществлять автоматизированную диагностику состояния оптики и давать рекомендации о ее возможной модификации или настройке уже изготовленной ОС.

Существующие методы анализа волнового фронта и, в частности, аберраций используют интерферометрические сенсоры. Однако использование этих приборов сопряжено со значительными тратами и требует вмешательства в конструкцию литографа, поэтому возникает задача непрямого анализа искажений волнового фронта с помощью автоматизированного помощника. Современным подходом к созданию такого помощника является разработка интеллектуального агента, способного к «косвенному» анализу аберраций ОС в составе литографа на основе SEM-изображений.

В работе предложен агентно-ориентированный метод диагностики, основанный на восстановлении волнового фронта по изображениям зарегистрированных на пластине контрольных структур с использованием разложения фазовой составляющей функции линзы по базису полиномов Цернике и градиентной оптимизации коэффициентов аберраций [2]. Для этого была разработана дифференцируемая дифракционно-ограниченная модель формирования изображения, позволяющая решать обратную задачу градиентной оптимизации параметров за счет минимизации расхождения между полученным с изображения SEM контуром контрольной структуры и сформированным моделью. Особое внимание уделено обеспечению устойчивости оптимизации в условиях нелинейности и плохой обусловленности задачи, что характерно для восстановления фазы волнового фронта [3].

Ключевым элементом подхода является интеграция интеллектуального агента в контур решения обратной задачи. Агент выполняет обработку входных данных, настройку и запуск процедуры оптимизации, а также анализ полученных коэффициентов с точки зрения их физической интерпретации. При выявлении признаков нестабильной сходимости или «нефизичных» решений агент инициирует повторную оптимизацию с измененными параметрами, реализуя принципы адаптивного управления в диагностических системах [4]. Валидация подхода выполнена путем сравнения результатов модели ОС с аберрациями с альтернативной моделью формирования изображений на основе трассировки лучей [5].

На выходе агентно-ориентированная система формирует интерпретируемую диагностику состояния оптики, включая визуализацию волнового фронта и вклад отдельных аберраций. Проведенный анализ показал, что предложенный подход обеспечивает повышение устойчивости и достоверности восстановления параметров, а также упрощает интерпретацию результатов для инженера-конструктора. Это позволяет рассматривать разработанный метод как основу для создания интеллектуальных систем мониторинга и анализа оптических систем литографии.

Литература

1. Brunner T. A. Impact of Lens Aberrations on Optical Lithography // IBM journal of research and development, 1997. 41 (1–2). P. 57–67.
2. Haffert S. Y. et al. Into nonlinearity and beyond for Zernike-like wavefront sensors // Astronomy & Astrophysics. January 10, 2024. DOI: 2401.08090.
3. Ma S. et al. Comparison of different phase retrieval algorithms based on ENZ theory // Optics Communication March 2025. 583 (06):131735. DOI: 10.1016/j.optcom.2025.131735.
4. Strackeljan J., Lahdelma S. Smart adaptive monitoring and diagnostic systems // Conference: 2nd International Seminar on Maintenance, Condition Monitoring and Diagnostics September 2005, Oulu, Finland. P. 47–61.
5. Born M., Wolf E., Bhatia A. B. (2019). Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference, and diffraction of light (Seventh (expanded) anniversary edition, 60th anniversary edition). Cambridge University Press.

УДК 004.94

Аппроксимация электромагнитного отклика PSM в составе цифрового двойника литографа

Баянов И. В.[1,2], Фёдоров И. Ю.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
baianov.iv@phystech.edu
[2] ПАО «Сбербанк России»
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
iyufedorov@sberbank.ru

Разработан цифровой двойник литографа для оценки предельных возможностей оборудования при использовании фазосдвигающих масок (AttPSM). Реализованный модуль PLRC FDTD учитывает векторную природу ЭМ-поля.
Ключевые слова: FDTD; уравнения Максвелла; ближнее поле; оптическая литография.

Modeling the Electromagnetic Response of Phase-Shift Masks in a Lithography Digital Twin

Baianov I. V.[1,2], Fedorov I. Y.2, Ph.D
[1] Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutsky Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
baianov.iv@phystech.edu
[2] Sberbank of Russia, PJSC
19 Vavilova St., Moscow, 117312, Russia
iyufedorov@sberbank.ru

A lithography digital twin has been developed to evaluate the performance limits of equipment when attenuated phase-shift masks (AttPSM) are used. The implemented PLRC-FDTD module accounts for the vector nature of the electromagnetic field.
Keywords: FDTD; Maxwell's equations; near field; optical lithography.

В микроэлектронике имеет место постоянный процесс уменьшения проектных норм. Это приводит к необходимости уменьшения k_1 в формуле Рэлея, описывающего достижимую точность литографического оборудования. При $k_1 = 0{,}5$ фотолитография может быть выполнена посредством традиционных бинарных фотошаблонов (ФШ). При дальнейшем уменьшении k_1 требуемое разрешение достигается с использованием технологии ILT и/или фазосдвигающих фотошаблонов (PSM) [1]. PSM представляют собой полутоновые ФШ, применяемые для повышения резкости воздушного изображения при обеспечении заданного фазового сдвига топологического рисунка. Это позволяет получать более четкое изображение на кремниевой пластине при уменьшении размера структур ниже дифракционного предела. При использовании PSM возникают паразитные элементы на границах фазовых областей, обусловленные интерференционными эффектами на границе раздела фаз [2], возникающими в зонах перехода между областями с разными оптическими

свойствами. Эти зоны перехода являются точками соприкосновения, где возникает переворачивание фазы. Проблема проявляется особенно остро на сложных топологиях, где трудно определить границы фазосдвигающего слоя.

Одна из существующих стратегий использования PSM в России предполагает их изготовление на сторонних производствах и последующее применение на имеющихся технологических линиях производства полупроводников. В этом случае существенными рисками являются ограничение разрешения степера и сложность топологии, приводящие к ошибкам в расчетах.

Соответственно, необходимо ПО, которое поможет найти предельные возможности имеющегося оборудования, определить, до каких норм можно опуститься, расширяя номенклатуру типов ФШ, а также симулировать получаемое воздушное изображение непосредственно до изготовления ФШ в целях предварительной проверки и последующей оптимизации техпроцесса путем комбинирования PSM с ILT-SRAF.

В рамках данной задачи был модифицирован цифровой двойник литографа (ЦД) [3] путем введения в него модели искажений, выходящей за границы применимости приближения «тонкой» маски и учитывающей векторную природу электромагнитного (ЭМ) поля [4]. Разработанный ЦД реализует сквозной цикл вычислений, объединяя расчет ЭМ-отклика на рисунок топологии в оптическом окне с заданными физическими размерами в виде нормальной составляющей вектора Пойнтинга (маски Пойнтинга) с оптической системой на базе частично-когерентной модели Хопкинса [5]. При задании маски Пойнтинга в качестве исходного теста был использован метод конечных разностей во временной области (FDTD) [6] с алгоритмом кусочно-линейных рекурсивных сверток (PLRC) [7]. Результатом работы ЦД является симулированное воздушное изображение, полученное для топологий, размещенных на PSM.

На разработанном ЦД был проведен эксперимент по сравнению формирования воздушного изображения для бинарных фотошаблонов и AttPSM. А именно: в процессе моделирования для ФШ с различными размерами структур топологий был получен набор воздушных изображений для измерения характерных параметров различных типов ФШ. Сравнение результатов измерений подтвердило, что использование PSM позволяет расширить окно процесса путем снижения критического размера (CD) относительно оборудования с бинарным ФШ.

Литература

1. Аваков С. М. Применение оборудования для автоматического контроля планарных структур в производстве оригиналов топологии интегральных схем на фотошаблонах // Наука и техника, 2007. — № 6. — С. 64–70.
2. Гаранжа В. А. и др. Алгоритмы оптимизации фотошаблона для коррекции эффекта оптической близости на фотолитографе // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов, 2025. — № 2. — С. 34–56.
3. Kahng A. B., Pati Y. C. Subwavelength lithography and its potential impact on design and EDA // Proceedings of the 36th annual ACM/IEEE Design Automation Conference, 1999.
4. Erdmann A. Optical and EUV Lithography: A Modeling Perspective. –Bellingham: SPIE Press, 2021. –564 p.

5. Wong A. K., Neureuther A. R. Rigorous three-dimensional time-domain finite-difference electromagnetic simulation for photolithographic applications // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1995. Vol. 8. № 4. P. 419–431.
6. Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transactions on antennas and propagation, 1966. Vol. 14. № 3. P. 302–307.
7. Kelley D. F., Luebbers R. J. Piecewise linear recursive convolution for dispersive media using FDTD // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002. Vol. 44. № 6. P. 792–797.

УДК 004.896

Сравнительный анализ методов классификации литографических паттернов

Соловьёва В. Д.[1,2], Метельников А. А.[1], Кошлаков А. В.[1,2]
[1] ПАО «Сбербанк России»,
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Soloveva.vd@phystech.edu

Сегодня при анализе технологичности чертежей интегральных схем применяются алгоритмы вычислительной литографии. Однако рост числа элементов топологии (далее –литографические паттерны) приводит к увеличению вычислительных ресурсов, требуемых для их применения. Для решения этой проблемы и сокращения объемов вычислений используются алгоритмы классификации литографических паттернов, основанные на их геометрии. В работе рассмотрены алгоритмы классификации литографических паттернов и проведен их сравнительный анализ.
Ключевые слова: литографические паттерны; алгоритмы классификации.

A comparative analysis of methods for the classification of lithographic patterns

Soloveva V. D.[1,2], Metelnikov A. A.1, Koshlakov A. V.[1,2]
[1] Sberbank of Russia, PJSC
19 Vavilova St., Moscow, 117312, Russia
iyufedorov@sberbank.ru
[2] Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutsky Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
Soloveva.vd@phystech.edu

Computational lithography algorithms are currently employed to analyze the manufacturability of integrated circuit layouts. However, as the number of layout elements (lithographic patterns) increases, so does the computational cost of these algorithms. To mitigate this, classification algorithms that rely on geometric analysis of lithographic patterns are used. This work examines such classification algorithms and presents a comparative study of their performance.
Keywords: lithographic patterns; classification algorithms.

Сегодня вычислительная литография играет ключевую роль в развитии полупроводниковых технологий [1]. По мере приближения отрасли к пределам закона Мура рост числа топологических паттернов приводит к тому, что применение алгоритмов вычислительной литографии требует все больше вычислительных ресурсов. Как отмечается в работе [2], на текущих технологиях количество уникальных топологий достигает десятков миллионов. Это создает серьезные вычислительные трудности для задачи вычислительной литографии –поиска горячих точек (HSD).

Классификация паттернов становится не просто вспомогательной операцией, а необходимым этапом для сокращения объемов вычислений. Существующие методы детекции горячих точек можно разделить на несколько групп. Наиболее точными считаются методы, основанные на физической симуляции процесса литографии [3]. Однако их применение для анализа всего чертежа топологии может потребовать больших вычислительных ресурсов. Поэтому на практике чаще используются геометрические методы, которые можно разделить на две подгруппы: методы, основанные на сравнении с эталонами (pattern matching), и методы, использующие машинное обучение.

Как отмечается в обзоре [4], методы, базирующиеся на принципе сопоставления с образцом, обладают способностью обнаруживать уже выявленные горячие точки, но являются менее эффективными при классификации не встречавшихся ранее паттернов. С другой стороны, методы машинного обучения могут быть лучше по точности предсказания —они способны правильно распознавать неизвестные ранее горячие точки. Однако эти методы часто страдают от проблемы ложных срабатываний: безопасные паттерны ошибочно идентифицируются как горячие точки [4].

В данной работе планируется провести сравнительный анализ описанных подгрупп методов в рамках задачи обнаружения горячих точек. Обучение и тестирование будут выполнены на открытом наборе данных ICCAD-2012, содержащем пять размеченных подвыборок паттернов для задачи бинарной классификации горячих точек (hotspot/non-hotspot). Произведен разведочный анализ данных, позволяющий интерпретировать результаты сравнения с учетом особенностей той или иной выборки.

Полученные результаты планируется использовать при разработке гибридного метода классификации горячих точек, сочетающего сильные стороны обеих подгрупп: отсутствие ложных срабатываний метода сопоставления с образцом (pattern matching) и преимущество методов машинного обучения распознавать не встречавшиеся ранее паттерны.

Литература

1. Zheng S., Zhao W., Sun S., Yang F., Yu B., Wong M. D. F. Streamlining Computational Lithography with Efficient Pattern Database // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2025. Vol. 44. Issue 11. DOI: 10.1109/TCAD.2025.3562158.
2. Jason P. Cain, Moutaz Fakhry, Piyush Pathak, Jason Sweis, Frank E. Gennari, Ya-Chieh Lai Pattern-based analytics to estimate and track yield risk of designs down to 7 nm // Proceedings Volume 10148, Design-Process-Technology Co-optimization for Manufacturability, 2017. Vol. XI; 1014805. DOI: 10.1117/12.2262363.
3. Zhifeng Lin, Zhenghua Gu, Zhipeng Huang, Xiqiong Bai, Lixuan Luo, Geng Lin Hotspot Detection with Machine Learning Based on Pixel-Based Feature Extraction. DOI: 10.1155/2022/7803329.
4. Wan-Yu Wen, Jin-Cheng Li, Sheng-Yuan Lin, Jing-Yi Chen, and Shih-Chieh Chang A Fuzzy-Matching Model with Grid Reduction for Lithography Hotspot Detection // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. November 2014. Vol. 33. Issue 11. DOI: 10.1109/TCAD.2014.2351273.

УДК 09.2

Теоретическая оценка разрешения оптической системы на основе составных киноформных линз для задач рентгеновской литографии

Глаголев П. Ю., Корнеев В. И., Дюжев Н. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
glagolev@ckp-miet.ru

В работе рассматривается возможность применения составных преломляющих линз [1–2] в качестве рентгеновской оптики в мягком рентгеновском диапазоне (0,5–10 нм) для формирования топологического рисунка на рентгенорезисте. С помощью математического моделирования, учитывающего технологические ограничения изготовления составных киноформных линз, на их основе выполнена теоретическая оценка разрешающей способности оптической системы применительно к задачам рентгеновской литографии. Выбраны перспективные материалы (Si, Be, алмаз), обладающие высокой прозрачностью и преломлением в мягком рентгеновском диапазоне. Результаты моделирования показывают, что с учетом реальных технологических факторов предельное разрешение такой системы достигает значений суб-3 нм.
Ключевые слова: рентгеновская нанолитография; мягкое рентгеновское излучение; составная преломляющая линза; киноформные линзы; разрешающая способность; числовая апертура.

Theoretical evaluation of the resolution of an optical system based on compound kinoform lenses for X-ray lithography tasks

Glagolev P. Yu., Korneev V. I., Djuzhev N. A.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
glagolev@ckp-miet.ru

This work examines the possibility of using compound refractive lenses as X-ray optics in the soft X-ray wavelength range (0.5–10 nm) for forming topological patterns on X-ray resists. Using mathematical modeling that accounts for the technological constraints of manufacturing compound kinoform lenses, a theoretical estimate of the resolution of such an optical system for X-ray lithography applications is performed. Promising materials (Si, Be, diamond) with high transparency and refraction in the soft X-ray range are selected. The modeling results show that, considering real technological factors, the limiting resolution of such a system reaches values sub-3 nm.
Keywords: X-ray nanolithography; Soft X-ray radiation; compound refractive lens; kinoform lens; resolution; numerical aperture.

Литература

1. Snigirev A., Kohn V., Snigireva I. et al. // Nature, 1996. Vol. 384. № 604. P. 49–51.
2. Kohn V., Snigireva I., Snigirev A. // Optics Communications, 2003. Vol. 216. № 4–6. P. 247–260.

УДК 533.9

Динамика отрицательных ионов в импульсном емкостном разряде в O_2 с разным материалом электродов

Глотов А. В., Лопаев Д. В., Богданова М. А., Шибанов Д. Р., Зиганшин И. И., Рахимов А. Т.
НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова
119234, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

Исследована динамика электроотрицательности, плотности ионов O^- и O_2^- в импульсной низкотемпературной плазме O_2 симметричного емкостного разряда 81 МГц с электродами из Al и Ni методом лазерного фотоотлипания с регистрацией фотоэлектронов СВЧ-зондом.
Ключевые слова: диагностика плазмы; зондовая СВЧ-диагностика; электронная плотность плазмы; электроотрицательность плазмы.

Dynamics of negative ions in a pulsed capacitive discharge in O_2 with different electrode material

Glotov A. V., Lopaev D. V., Bogdanova M. A., Shibanov D. R., Ziganshin I. I., Rakhimov A. T.
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie gory, Bldn. 2, Moscow, 119234, Russia

The dynamics of electronegativity and density of O^- and O_2^- ions in pulsed low-temperature O_2 plasma of 81 MHz symmetric capacitive discharge with Al and Ni electrodes was studied using laser photo-detachment with photoelectron registration by a microwave probe.
Keywords: plasma diagnostics; microwave probe diagnostics; plasma electron density; plasma electronegativity.

В индустриальных плазменных реакторах современной кремниевой технологии широко используется плазма электроотрицательных газов CF_4, C_2F_6, C_3F_8, SF_6, Cl_2 и O_2 [1]. Важными параметрами такой плазмы являются состав и концентрация отрицательных ионов. Отрицательные ионы участвуют в химических реакциях и существенно влияют на баланс заряда, электрическое поле и функцию распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). Обычно электроотрицательную плазму определяют условием

$$\frac{N_i^-}{n_e} > 1,$$

где n_e — плотность электронов; N_i^- — плотность отрицательных ионов. В условиях квазинейтральности

$$N_i^- = N_i^+ - n_e.$$

В импульсной плазме переход от электрон-ионной к ион-ионной $\left(\frac{N_i^-}{n_e} \gg 1\right)$ плазме определяется химией и динамикой отрицательных ионов [2], поэтому исследование их кинетики представляет фундаментальный и прикладной интерес.

Одним из методов диагностики отрицательных ионов является метод лазерного фотоотлипания, когда происходит фотоионизация ионов при поглощении фотонов:

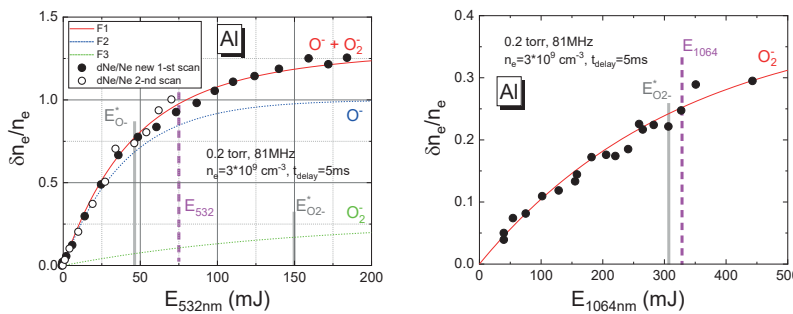
$$O^- + h\nu \rightarrow O + e^-,$$

$$O_2^- + h\nu \rightarrow O_2 + e^-.$$

Фотоотлипание происходит, если энергия фотона превышает сродство к электрону: для атомарного кислорода O 1,461 эВ ($\lambda < 848$ нм), для O_2 0,44 эВ ($\lambda < 2820$ нм). В данной работе использовался Nd:YAG-лазер на первой (1064 нм — фотоотлипание от O_2^-) и второй (532 нм — от O^- и O_2^-) гармониках. Фотоотлипшие электроны δn_e регистрировались время-разрешенным СВЧ-зондом по смещению резонансной частоты антенны зонда.

Исследования проводились в импульсном симметричном емкостном разряде в чистом O_2 в кварцевой камере со сменными электродами из Al и Ni. В условиях кислородной плазмы происходило окисление алюминия с образованием диэлектрического слоя Al_2O_3 на поверхности, с Ni такого не наблюдалось. Параметры разряда: диапазон давления 0,2–1,5 мТорр, при этом концентрация электронов была фиксированной $3 \cdot 10^9$ см$^{-3}$ и поддерживалась в каждом режиме изменением мощности ВЧ-генератора на частоте 81 МГц. В импульсном режиме длительность импульсов составляла 150 мс при частоте следования 3 Гц.

Для абсолютной калибровки плотности отрицательных ионов O^- и O_2^- измерялись зависимости δn_e от энергии лазерного импульса и площади лазерного пучка. Так как для излучения 532 нм фотоотлипание происходит от обоих ионов O^- и O_2^-, то отношения O^-/n_e и O_2^-/n_e определялись из двухэкспоненциальной аппроксимации данных на рис. 1*а*. При этом отношение O_2^-/n_e также определялось из экспоненциальной аппроксимации для излучения 1064 нм.



а *б*

Рис. 1. Отношение плотности фотоотлипших электронов к n_e в плазме с Al-электродами в зависимости от энергии лазерного импульса: *а*) 532, *б*) 1064 нм

Характеристические энергии E^*_{O2-}, E^*_{O-} и E^*_{1064}, полученные из аппроксимации, связаны с сечениями фотоотлипания по формуле $\sigma = S \cdot h\nu / E^*$:

$$\sigma_{532}(O_2^-) = (1{,}5 \pm 0{,}1) \cdot 10^{-18} \text{ см}^2,$$

$$\sigma_{532}(O^-) = (5{,}8 \pm 0{,}2) \cdot 10^{-18} \text{ см}^2,$$

$$\sigma_{1064}(O_2^-) = (3 \pm 0{,}2) \cdot 10^{-19} \text{ см}^2.$$

Полученные значения сечений фотоотлипания в пределах ошибки хорошо соответствуют литературным данным. Вертикальные розовые пунктирные линии на графиках указывают параметры, использованные для динамических измерений.

Концентрации отрицательных ионов O^- и O_2^- определялись из амплитуд сигналов СВЧ-зонда на разных длинах волн $A_{532} = \delta n_e^{532}/n_e$ и $A_{1064} = \delta n_e^{1064}/n_e$ как

$$(O^- + O_2^-) = A_{532} \cdot n_e \cdot K_{532}^{sat}(E_{las}) \cdot K_{532}^{sat}(S_{las}),$$

$$O_2^- = A_{532} \cdot n_e \cdot K_{532}^{sat}(E_{las}) \cdot K_{532}^{sat}(S_{las}),$$

где $K_{532}^{sat}(E_{las}) \cdot K_{532}^{sat}(S_{las})$ и $K_{532}^{sat}(E_{las}) \cdot K_{532}^{sat}(S_{las})$ — коэффициенты, определенные из кривых насыщения сигнала от энергии импульса и площади пучка лазера: $K_{532}^{sat}(E_{las}) = 1{,}36$ и $K_{532}^{sat}(S_{las}) = 1{,}56$, $K_{1064}^{sat}(E_{las}) = 1{,}59$ и $K_{1064}^{sat}(S_{las}) = 1{,}56$.

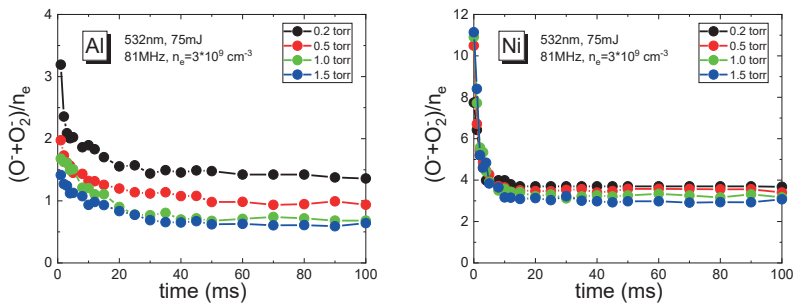
На рис. 2 и 3 представлена динамика отношений $(O^- + O_2^-)/n_e$ и O_2^-/n_e в течение импульса емкостного разряда. Видно, что в исследованных условиях кислородной плазмы низкого давления основным отрицательным ионом является O^-. Также наблюдается зависимость плотности отрицательных ионов от материала электродов. Основным каналом образования O^- является диссоциативное прилипание:

$$O_2 + e^- \rightarrow O^- + O.$$

А каналами гибели являются реакции ассоциативного прилипания к активным частицам, атомам кислорода O и метастабильным молекулам $O_2(a)$:

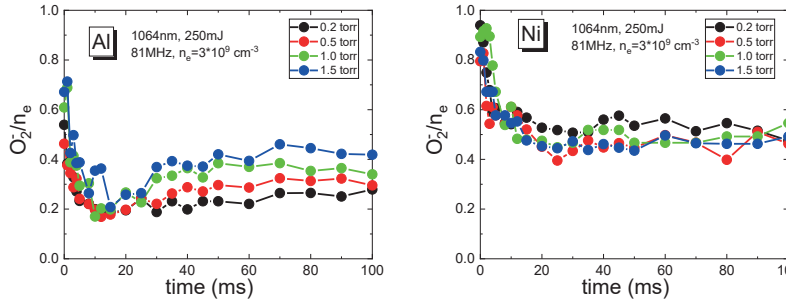
$$O^- + O \rightarrow O_2 + e^-,$$

$$O^- + O_2(a) \rightarrow O_3 + e^-.$$



а *б*

Рис. 2. Динамика отношения $(O^- + O_2^-)/n_e$ в течение импульса O_2 81 МГц емкостного разряда: *а*) Al-электроды; *б*) Ni-электроды



а *б*

Рис. 3. Динамика отношения O_2^-/n_e в течение импульса 81 МГц емкостного разряда в O_2: *а*) Al-электроды; *б*) Ni-электроды

В импульсном разряде низкого давления динамика концентраций O и $O_2(a)$ зависит от скорости их гибели на поверхности, в данном случае на поверхности электродов Al_2O_3 и Ni. Так как вероятности гибели O и $O_2(a)$ на Ni примерно на два порядка выше, чем на Al_2O_3, то концентрации O и $O_2(a)$ выше, а динамика медленнее в разряде с электродами из Al_2O_3. Следовательно, концентрация ионов O^- оказывается больше в разряде с электродами из Ni, а динамика быстрее, что наблюдается в эксперименте. Благодаря использованию математической модели наблюдаемая динамика позволяет определить константы скорости наблюдаемых элементарных процессов.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- использование метода лазерного фотоотлипания совместно с время-разрешенной зондовой СВЧ-диагностикой для изучения динамики состава и концентрации отрицательных ионов в импульсном емкостном ВЧ-разряде в кислороде;
- показана зависимость плотности отрицательных ионов от материала электродов;
- показано изменение динамики плотности отрицательных ионов от концентрации активных частиц в плазме (атомов кислорода и метастабильных молекул), которые зависят от материала электрода.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова.

Литература

1. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 757 p.
2. Belostotsky S.G., Economou D.J., Lopaev D.V., Rakhimova T.V. Negative ion destruction by $O(^3P)$ atoms and $O_2(a^1\Delta g)$ molecules in an oxygen plasma. Plasma Sources Science and Technology, 2005. Vol. 14. № 3. P. 532–542.

УДК 533.924, 533.915, 621.382.3

Оптимизация цикла атомно-слоевого травления SiO2 на основе анализа состояния поверхности

Ковалёв А. Н.[1,2], Шибанов Д. Р.[3], Лопаев Д. В.[3], Раводина А. М.[1,2], Резванов А. А.[1,2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
alkovalev@niime.ru

В работе представлено исследование влияния плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления (PEALE) в ICP-реакторе на поверхности пленок SiO_2. Проведена оптимизация ключевых параметров процесса: мощностей верхнего и нижнего ВЧ-генераторов, температуры подложки, давления, а также состава газовой смеси (C_4F_8/Ar или CH_2F_2/Ar). Получены режимы, при которых формирование фторуглеродного полимерного слоя и его последующее удаление в O_2/Ar-плазме позволяют достичь самонасыщаемого цикла ALE с низкой шероховатостью поверхности и отсутствием остаточного полимерного слоя на поверхности и в объеме диэлектрика.
Ключевые слова: атомно-слоевое травление; диэлектрические слои; КМОП-технология; микроэлектроника.

Optimization of the Atomic Layer Etching cycle for SiO_2 based on surface state analysis

Kovalev A. N.[1,2], Shibanov D. R.[3], Lopaev D. V.[3], Ravodina A. M.[1,2], Rezvanov A. A.1[2]
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[2] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[3] Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
alkovalev@niime.ru

This paper presents an investigation of plasma-enhanced atomic layer etching (PEALE) of SiO_2 films in an ICP reactor. The key process parameters were optimized, including the power of the upper and lower RF generators, substrate temperature, pressure, and gas mixture composition (C_4F_8/Ar or CH_2F_2/Ar). Regimes were identified in which the formation of a fluorocarbon polymer layer and its subsequent removal in an O_2/Ar plasma enable a self-limiting ALE cycle characterized by low surface roughness and the absence of residual dielectric modification.

Keywords: atomic layer etching; dielectric layers; CMOS technology; microelectronics.

Плазменно-стимулированное атомно-слоевое травление (PEALE) диэлектриков является перспективным для КМОП-технологии методом прецизионной обработки. В отличие от традиционно используемого плазмохимического травления, приводящего к росту шероховатости и дефектности поверхностного слоя, циклический PEALE обеспечивает насыщение в каждом цикле и позволяет контролировать травление с точностью до толщины атомарных монослоев [1]. Однако достижение воспроизводимого и высококачественного результата требует детального понимания физико-химических процессов, протекающих в поверхностном слое материала на различных стадиях цикла: осаждение фторуглеродной полимерной пленки, продувка и очистка поверхности. Ключевую роль играют состав и толщина полимерного слоя, энергия ионов, а также термические условия, определяющие адсорбцию, десорбцию и диффузию реагирующих частиц [2, 3].

В настоящей работе представлено исследование атомно-слоевого травления пленок SiO_2 в ICP-реакторе «Плазма ТМ-200-04». Были использованы пленки с аморфным диоксидом кремния толщиной 500–700 нм на кремниевых подложках диаметром 200 мм. Цикл атомно-слоевого травления состоял из четырех последовательных стадий:

1) продувка Ar;

2) осаждение полимерной пленки C_x-F_y из C_4F_8/Ar или CH_2F_2/Ar;

3) продувка Ar;

4) очистка поверхности O_2/Ar [4].

Основное внимание уделяется анализу поверхностной химии с помощью ИК-Фурье-спектроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на разных этапах цикла ALE [4]. Проведена оптимизация ключевых технологических параметров: температуры подложки (в диапазоне от −20 до 60 °C), мощности верхнего ВЧ-генератора (100–600 Вт) и мощности нижнего генератора смещения (0–20 Вт). Дополнительно исследовано влияние длительности стадии O_2/Ar-очистки на повторяемость циклов. Состояние поверхности на разных этапах цикла PEALE контролировалось методом измерения краевого угла смачивания водой. Целью работы является установление корреляций между параметрами цикла ALE, химическим состоянием поверхности и качеством получаемого слоя для разработки промышленно-ориентированного процесса атомно-слоевого травления с высокой селективностью и минимальными дефектами.

В ходе выполнения работы были исследованы химические превращения на поверхности пленок SiO_2 на ключевых стадиях цикла PEALE. Анализ смачивания поверхности пленки показал, что контактный угол возрастает, подтверждая формирование гидрофобного слоя C_xF_y на стадии осаждения C_4F_8/Ar или CH_2F_2/Ar. В то же время после полного цикла ALE контактный угол становится значительно ниже, чем у исходной пленки SiO_2. Это может объясняться активацией поверхности в кислородной плазме, приводящей к росту концентрации полярных силанольных групп (Si–OH) и повышению гидрофильности. Обработка в O_2/Ar обеспечивает удаление полимерного слоя с поверхности, при этом полностью C-F-связи перестают быть видны только после полного цикла травления. Также в конце оптимизированного цикла на XPS видно исчезновение всех связей, образуемых атомами полимерной пленки, за исключением связей Si-F на поверхности. В результате

определены технологические окна, обеспечивающие стабильное протекание самонасыщаемого цикла ALE с низкой шероховатостью поверхности и отсутствием остаточной модификации объема вещества. Полученные результаты позволяют оптимизировать процесс PEALE для прецизионного травления диэлектриков в микроэлектронике.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-91-06002, https://rscf.ru/project/23-91-06002.

Литература

1. D. Hong, Y. Kim, H. Chae Atomic Layer Etching of SiO_2 for Nanoscale Semiconductor Devices: A Review // Applied Science and Convergence Technology, 2024. Vol. 33. P. 1–6.
2. Y. Kim, S. Lee, Y. Cho, S. Kim, and H. Chae Plasma atomic layer etching of SiO_2 and Si_3N_4 with heptafluoropropyl methyl ether // J. Vac. Sci. Technol., 2020. A38. P. 022606.
3. X. Wang et al. Scaling of atomic layer etching of SiO_2 in fluorocarbon plasmas: Transient etching and surface roughness // Journal of Vacuum Science and Technology A, 2021. Vol. 39. № 3. DOI: 10.1116/6.0000941.
4. Lopaev D. V., Shibanov D. R., Rakhimova T. V., Bogdanova M. A., Glotov A. V., Maslakov K. I., Rezvanov A. A., Rakhimov A. T. Fluorocarbon (C4F8) assisted plasma-enhanced atomic layer etching (PEALE) of SiO_2 with high repeatability of cycles in industrial ICP reactor. I. experiment. // Journal of Vacuum Science & Technology A, 2026. Vol. 44. № 2. DOI: 10.1116/6.0005123.

УДК 66.088

Селективное травление SiOx к SiNx для МОЭМС-применений

Дятлов В. Д.[1], Жуков И. А.[1], Соловьев А. А.[1,2], Иванова О. К.[1,2], Платонов Д. Д.[1,2]
[1] ООО «МАППЕР»
109316, г. Москва, Волгоградский пр-т, 42, корп. 5, пом. 1Н
vladimir.dyatlov@mapperllc.ru, ilya.zhukov@mapperllc.ru, anatoly.solovyov@mapperllc.ru, olga.ivanova@mapperllc.ru, danil.platonov@mapperllc.ru
[2] НИТУ «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1

Исследовано влияние O_2, Ar, CF_4 в смеси $CHF_3/Ar/O_2$ на реактивно-ионное травление SiO_x и SiN_x. Добавление O_2 повышает селективность SiO_x к SiN_x с 0,5 до 2,4, оптимизация потока Ar снижает неравномерность на 100 мм на кремниевой пластине до 2,8 %. Введение CF_4 улучшает профиль травления и равномерность для обоих материалов. Режимы применимы для МОЭМС на основе SiN_x.

Ключевые слова: МОЭМС; селективное травление; нитрид кремния; оксид кремния; реактивно-ионное травление; плазмохимическое травление; емкостно-связанная плазма; фторуглеродная плазма.

Selective etching of SiO_x to SiN_x for MOEMS applications

Dyatlov V. D.[1], Zhukov I. A.[1], Solovyev A. A.[1,2], Ivanova O. K.[1,2], Platonov D. D.[1,2]
[1] LLC "MAPPER"
42, k. 5, room 1H, Volgogradsky Ave., Moscow, 109316, Russia
vladimir.dyatlov@mapperllc.ru, ilya.zhukov@mapperllc.ru, anatoly.solovyov@mapperllc.ru, olga.ivanova@mapperllc.ru, danil.platonov@mapperllc.ru
[2] NUST "MISIS"
4, Bldg. 1 Leninskiy Ave., Moscow, 119049, Russia

The influence of O_2, Ar, and CF_4 in a $CHF_3/Ar/O_2$ gas mixture on reactive ion etching (RIE) of SiO_x and SiN_x was investigated. The addition of O_2 increases the selectivity of SiO_x to SiN_x from 0.5 to 2.4, while optimization of the Ar flow reduces process non-uniformity across a 100-mm silicon wafer to 2.8 %. The introduction of CF_4 improves the etch profile and uniformity for both materials. These process conditions are applicable for SiN_x based MOEMS device fabrication.

Keywords: MOEMS; selective etching; silicon nitride; silicon oxide; reactive ion etching; plasma etching; capacitively coupled plasma.

Нитрид кремния (SiN_x) является перспективным функциональным материалом для микроопто-электромеханических устройств (МОЭМС) благодаря низким оптическим потерям (<1 дБ/м) и широкому диапазону прозрачности 400–2350 нм [1–3]. В устройствах на основе SiN_x существует необходимость селективного травления функционального слоя SiN_x при сохранении маски из оксида кремния (SiO_x). Недостаточная селективность процесса приводит к деградации SiO_x-маски, т. е. к потере

контроля над профилем травления и ухудшению оптических и механических характеристик устройств [2].

Селективность рассматриваемого процесса реактивно-ионного травления в значительной степени определяется концентрацией атомарного водорода (H) в плазме. Экспериментально установлена зависимость между интенсивностью эмиссии H (656,5 нм) в спектре плазмы и скоростью травления слоя SiN_x. Подобная закономерность обусловлена взаимодействием атомарного водорода с CN-группами, формирующимися в ходе травления SiN_x, что приводит к образованию летучих соединений HCN и, как следствие, уменьшению толщины полимерного покрытия на поверхности. Дополнительно атомарный водород участвует в удалении атомов азота из структуры подложки, способствуя повышению скорости травления SiN_x. Одним из подходов достижения высокой селективности травления SiN_x является применение гидрофторуглеродных плазмообразующих газов (CHF_3, CH_2F_2, CH_3F) с добавлением кислорода (O_2) [4]. В частности, показано, что введение O_2 в плазму 1,1,2-трифторэтана ($C_2H_3F_3$) способствует образованию CHF_2-радикалов посредством реакций с возбужденными атомами кислорода, что повышает эффективность травления [5].

В рамках данной работы для реализации селективного травления SiN_x относительно SiO_x рассматривается влияние концентрации газов, состоящих из CHF_3/Ar с добавлением O_2, для реактивно-ионного травления с емкостно-связанной плазмой. В качестве подложек использовались кремниевые пластины толщиной ±460 мкм, на которые методом плазменно-химического осаждения из газовой фазы (ПХОГФ) был нанесён слой SiN_x или SiO_x толщиной 950±10 нм, а затем выполнена литография. В ходе экспериментов варьировались потоки O_2 и Ar при постоянном расходе CHF_3.

Результаты показывают, что с ростом потока O_2 селективность травления SiN_x к SiO_x резко возрастает и достигает значения 2,41:1, а угол профиля SiN_x увеличивается. Уменьшение потока Ar обеспечивает баланс между физическим и химическим механизмами травления, снижая неравномерность процесса до 2,8% по площади пластины. На втором этапе исследований в рецепт было введено малое количество CF_4, что привело к улучшению профиля травления и равномерности для обоих материалов при незначительном снижении селективности.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для применения плазмохимического травления SiN_x по отношению к SiO_x в МОЭМС-устройствах.

Литература

1. Solgaard O. et al. Optical MEMS: From micromirrors to complex systems // Journal of Microelectromechanical systems, 2014. Vol. 23. № 3. P. 517–538.
2. Lamontagne B. et al. Review of microshutters for switchable glass // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2019. Vol. 18. № 4. P. 040901–040901.
3. Blumenthal D. J. et al. Silicon nitride in silicon photonics // Proceedings of the IEEE, 2018. Vol. 106 (12). P. 2209–2231.
4. Chen L. et al. Mechanism of selective SiNx etching over SiO_{x2} in hydrogen-containing fluorocarbon plasma // Microelectronic engineering, 2009. Vol. 86. № 11. P. 2354–2357.
5. Hsiao S. N. et al. Selective etching of SiN_x against SiO_{x2} and poly-Si films in hydrofluoroethane chemistry with a mixture of CH_2FCHF_2, O_2, and Ar // Applied Surface Science, 2021. Vol. 541. P. 148439.

УДК 533.924

Однородность по пластине плазменных процессов в ИСП-установке

Кузьменко В. О., к. ф.-м. н., Халилуллин Р. Р., Мяконьких А. В., д. ф.-м. н.
НИЦ «Курчатовский институт» — ОФТИ им. К. А. Валиева
117218, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36, корп. 1
kuzmenko@ftian.ru

Исследованы однородности осаждения фторуглеродной пленки, скорости распыления ионами Ar и атомно-слоевого травления (АСТ) HfO_2 в установке с реактором с индуктивно-связанной плазмой (ИСП). Однородность процесса АСТ HfO_2, селективного по отношению к TiN, выше, чем однородность распыления ионами Ar, за счет ионно-стимулированной реакции на поверхности.
Ключевые слова: плазменное травление; распыление; атомно-слоевое травление; индуктивно-связанная плазма.

Uniformity of plasma processes across the wafer in an ICP tool

Kuzmenko V. O., Ph.D, Khalilullin R. R., Myakonkikh A. V., Sc.D
NRC "Kurchatov Institute" — Valiev Institute of Physics and Technology
36k1, Nakhimovsky Ave., Bldg. 1, Moscow, 117218, Russia
kuzmenko@ftian.ru

The uniformity of fluorocarbon film deposition, Ar ion sputtering rates, and atomic layer etching (ALE) of HfO2 were studied in a setup with an inductively coupled plasma (ICP) reactor. The uniformity of the HfO2 ALE process, selective for TiN, is higher than that of Ar ion sputtering due to the ion-stimulated reaction on the surface.
Keywords: Plasma etching; sputtering; atomic layer etching; inductively coupled plasma

С уменьшением технологических норм растут требования к точности процессов травления и применению новых материалов. Одним из материалов являются диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью. В полевых транзисторах УБИС начиная с проектных норм технологического производства интегральных схем до 45 нм и меньше вместо оксида кремния в качестве подзатворного диэлектрика используют слой HfO_2 толщиной несколько нанометров [1]. Другим актуальным в современной микроэлектронике применением тонких слоев оксида гафния являются кросс-бар-массивы мемристоров нейроморфных интегральных систем. Одним из подходов к реализации таких систем являются структуры, в которых нижние электроды, выполненные из нитрида титана, покрываются слоем оксида гафния толщиной в несколько нанометров, на котором формируется верхний электрод [2]. Структурирование тонких слоев HfO_2 для создания устройств требует высокой точности и низкой дефектности травления, что увеличивает актуальность процессов АСТ HfO_2.

Процесс АСТ заключается в циклическом проведении двух самонасыщающихся шагов –модификации поверхности и активации реакции на поверхности. В настоящей работе был исследован предложенный ранее [3] селективный по отношению к TiN процесс АСТ HfO_2, в котором модификация поверхности осуществляется в ИСП-смеси газов $Ar + CF_4 + H_2$, а активация реакции происходит за счет

бомбардировки ионами из ИСП Ar. При этом распыление, которое может происходить при этой бомбардировке, является паразитным процессом, нарушающим самонасыщение шага. В промышленном процессе производства интегральных схем технологические операции производятся на кремниевых пластинах диаметром до 300 мм, в результате чего одновременно изготавливаются сотни чипов ИС. В таких условия однородность травления HfO_2 на всей поверхности пластины имеет большое значение для обеспечения высокого выхода годных.

В данной работе измерены однородности осаждения фторуглеродной пленки и распыления HfO_2 ионами из плазмы Ar, а также зависимости однородности скорости АСТ от параметров процесса на пластине диаметром 100 мм. Толщины пленок были измерены до и после процессов в 79 точках на пластине. Обнаружена низкая однородность процесса распыления HfO_2 плазмой Ar, составляющая 60 %. В процессе АСТ, где травление происходит во время бомбардировки ионами из плазмы Ar, скорость травления больше, а однородность по пластине лучше, чем в процессе распыления, и достигает 85 %. Это происходит за счет основного вклада ионно-стимулированной реакции в механизм травления. Неоднородность АСТ вызвана паразитным распылением, вклад которого возрастает на краю пластины.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. High-κ dielectric breakdown in nanoscale logic devices –Scientific insight and technology impact / Raghavan N., Pey K. L., Shubhakar K. // Microelectronics Reliability, 2014. Vol. 54. P. 847–860.
2. Uniform and robust TiN/HfO_2/Pt memristor through interfacial Al-doping engineering / Zhu Y.-L., Xue K.-H., Cheng X.-M., Qiao C., Yuan J.-H. et al. // Applied Surface Science, 2021. Vol. 550. P. 149274.
3. Selective atomic layer etching of Al_2O3, AlN_x and HfO_2 in conventional ICP etching tool / Kuzmenko V., Lebedinskij Y., Miakonkikh A., Rudenko K. // Vacuum, 2023. Vol. 207. P. 111585.

УДК 621.382

Изучение технологии формирования электропроводящих пленок TiN для кремниевых кантилеверов ЭСМ

Сорвачев В. А.[1,2], Новак А. В.[1,2], к. т. н.
[1] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] *АО «Ангстрем»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 3

Исследована технология изготовления электропроводящих пленок на основе нитрида титана TiN для кантилеверов ЭСМ методом реактивного магнетронного распыления, а также показаны процессы изготовления и испытания кантилеверов со сформированным покрытием TiN.
Ключевые слова: электросиловая микроскопия (ЭСМ); кантилеверы; пленки TiN; реактивное магнетронное распыление.

Study of the technology of forming electrically conductive TiN films for silicon ESM cantilevers

Sorvachev V. A.[1,2], Novak A. V.[1,2], Ph.D
[1] *National Research University of Electronic Technology (MIET)*
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[2] *"Angstrem" JSC*
3 Shokina Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

The technology of manufacturing electrically conductive films based on titanium nitride TiN for ESM cantilevers by the reactive magnetron sputtering method is investigated, and the processes of manufacturing and testing cantilevers with a molded TiN coating are shown.
Keywords: Electric force microscopy (EFM); cantilevers; TiN films; reactive magnetron sputtering.

Для изучения и картирования электрофизических свойств поверхности микро- и наноразмерных объектов в электросиловой микроскопии (ЭСМ) применяют Si- или SiN-зонды-кантилеверы со сформированными проводящими пленками на рабочей поверхности. Пленки из TiN представляют интерес в качестве проводящих покрытий кантилеверов благодаря большой износостойкости, высокой химической стабильности, а также относительно низкому удельному сопротивлению (260 мкОм·см) [1–5]. В опубликованных работах технологические особенности формирования проводящего покрытия на основе TiN для кантилеверов ЭСМ недостаточно изучены и отработаны.

Целью работы являются исследование и разработка технологии получения электропроводящих пленок нитрида титана TiN методом реактивного магнетронного распыления для кремниевых кантилеверов ЭСМ.

В настоящей работе исследовался процесс формирования электропроводящих пленок TiN для кантилеверов ЭСМ, получаемых на основе методов реактивного магнетронного распыления и отжига в атмосфере азота. Показано, что пленки TiN

толщиной 50 нм, сформированные на кантилеверах, имели удельное сопротивление 208–291 мкОм·см. Установлено, что радиус острия игл кантилеверов, покрытых пленкой TiN, составил приблизительно 30 нм (рис. 1).

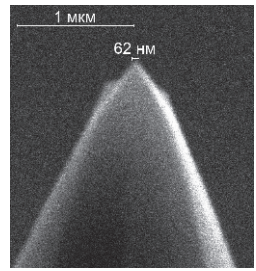


Рис. 1. РЭМ-изображения общего вида острия иглы кантилевера с проводящей пленкой TiN

Проведено тестирование кремниевых кантилеверов с пленками TiN и удельным сопротивлением 208 мкОм·см на атомно-силовом микроскопе. Кантилеверы с проводящим покрытием из TiN сохраняли проводимость во всем диапазоне прикладываемого напряжения от −100 до 100 мВ, а электрический ток между иглой и образцом пиролитического графита возникал уже при значении напряжения от нескольких милливольт (рис. 2).

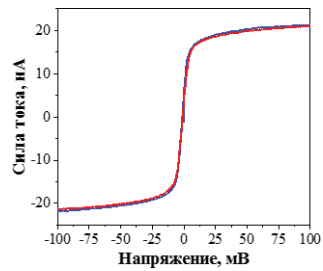


Рис. 2. Типичная ВАХ для кантилевера, покрытого TiN толщиной 50 нм и отожженного в атмосфере азота

Также в ходе тестирования продемонстрировано применение кантилеверов с пленками TiN в сканирующей емкостной микроскопии (СЕМ), а именно получены топографическое АСМ-изображение (рис. 3*а*) и СЕМ-изображения тестовой кремниевой решетки с областями *p*- и *n*-типа проводимости при различном напряжении между зондом и решеткой (рис. 3*б*, *в*).

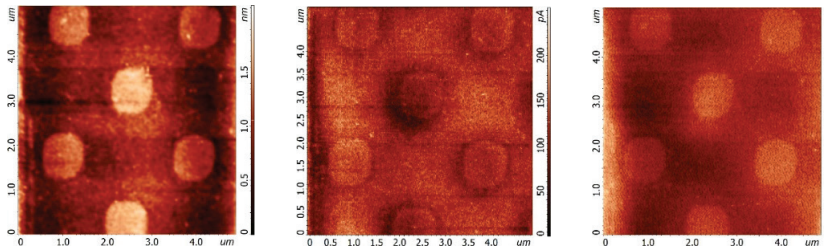


Рис. 3. Изображения одного и того же участка поверхности кремниевой решетки, содержащей области с различным типом проводимости: *а*) топографическое АСМ-изображение; *б*) СЕМ-изображение при напряжении между зондом и решеткой Ubias = – 3 В; *в*) СЕМ-изображение при напряжении между зондом и решеткой Ubias = + 2 В

Литература

1. Liu M., Zhu Y., Zhao J., Wang L., Yang J., Yang F. Batch Fabrication of Wear-Resistant and Conductive Probe with PtSi Tip // Micromachines, 2021. Vol. 12. №11. P. 1326.
2. Meng L.-J., dos Santos M. P. Characterization of titanium nitride films prepared by d.c. reactive magnetron sputtering at different nitrogen pressures // Surface and Coatings Technology, 1997. Vol.60. P. 64–70.
3. Kröger R., Eizenberg M., Marcadal C., Chen L. Plasma induced microstructural, compositional, and resistivity changes in ultrathin chemical vapor deposited titanium nitride films // Journal of Applied Physics, 2002.
4. Su P. J., Liu B. H. Ion-beam-sputter deposited titanium nitride thin films for conductive atomic force microscope probes // Thin Solid Films, 2013. Vol. 529. P. 317–321.
5. Новак А. В., Соколов А. М. Тестирование кремниевых кантилеверов для атомно-силовой микроскопии компании «Ангстрем» // Электронные компоненты, 2023. — Т. 3. — С. 1–84.

УДК 621.382

Формирование трапециевидных микроструктур на поверхности монокристаллического кремния методом лазерной микрообработки для применения в микроразъемных соединениях

Соловьёв И. А., Гаврилова А. А., Миронов Г. В., Кочергин М. Д., Вертянов Д. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
ilya.a.solovyov@gmail.com

Рассмотрены варианты применения микроразъемных соединений в микросборках. Разработан метод формирования трапециевидных микроструктур на поверхности кремния при помощи волоконного лазера. Предложены подходы к уменьшению дефектообразования и снижению шероховатости поверхности микроструктур.
Ключевые слова: лазерная микрообработка; трапециевидные микроструктуры; шероховатость; 3D-интеграция; микросборки.

Forming trapezoidal microstructures on monocrystalline silicon surface by laser micromachining for microconnector applications

Solovyov I. A., Gavrilova A. A., Mironov G. V., Kochergin M. D., Vertyanov D. V.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
ilya.a.solovyov@gmail.com

The application of microconnector interconnections in microsystems is considered. A method for forming trapezoidal microstructures on a silicon surface using a fiber laser is developed. Approaches to reducing defect formation and surface roughness of microstructures are proposed.
Keywords: laser micromachining; trapezoidal microstructures; surface roughness; 3D integration; microsystems.

Одним из ключевых направлений развития современных микроэлектронных систем является переход к трехмерной интеграции и технологиям «система в корпусе», что требует создания высокоплотных межсоединений [1]. Перспективным решением данной задачи является применение микроразъемных соединений, обеспечивающих высокую плотность коммутации и возможность модульной интеграции функциональных элементов. Микроразъемное соединение состоит из сопрягаемых элементов типа «гнездо –штекер», формируемых на подложках из монокристаллического кремния. Конструктивно такие соединения имеют выступы и углубления, на поверхности которых формируются диэлектрические и проводящие слои.

Реализация микроразъемных соединений предъявляет повышенные требования к геометрии сопрягаемых элементов, в частности к формированию микроструктур с заданным профилем и низкой шероховатостью поверхности. Одной

из более подходящих форм основы контактной группы является трапециевидный профиль, обеспечивающий самовыравнивание. Несмотря на известность методов формирования микроструктур при помощи лазерной абляции [2], их применение для создания элементов микроразъемных соединений ограничено недостаточным качеством поверхности и сложностью обеспечения требуемой геометрической точности при последующем формировании диэлектрических и проводящих слоев. Это определяет необходимость разработки специализированных технологических подходов.

В работе рассмотрены подходы к формированию трапециевидных микроструктур на поверхности кремния, предназначенных для последующего формирования диэлектрических и проводящих слоев и использования в качестве контактных элементов микроразъемных соединений трехмерных микросборок. В качестве технологического метода использована лазерная микрообработка с применением иттербиевого импульсного волоконного лазера с длиной волны 1064 нм.

Проведен анализ влияния параметров лазерной обработки, включая мощность излучения, частоту следования импульсов, скорость сканирования и количество линий на миллиметр, на геометрические характеристики формируемых микроструктур. Показано, что увеличение мощности излучения способствует скорости достижения необходимой формы микроструктур, однако сопровождается увеличением шероховатости поверхности и дефектообразованию вследствие процессов плавления и разбрызгивания кремния, что критично для последующего нанесения функциональных слоев. Это ограничивает применение одностадийной обработки при формировании элементов микроразъемных соединений.

В рамках работы рассмотрены технологические подходы к уменьшению шероховатости поверхности трапециевидных микроструктур, в том числе основанные на применении дополнительной лазерной обработки при пониженной мощности и повышенной частоте импульсов, на использовании реактивного ионного травления и на применении жидкостного травления кремния.

Полученные результаты формируют основу для разработки технологических процессов формирования объемных микроструктур, ориентированных на создание микроразъемных соединений с высокой плотностью коммутации. Предложенные технологические подходы могут быть интегрированы в существующие маршруты микроэлектронного производства при разработке трехмерных микросборок и «систем в корпусе».

Работа выполнена при финансовой поддержке программы развития МИЭТ до 2030 года.

Литература

1. Solovyov I. A., Titov A. Y., Vertyanov D. V. Design and Analysis of a Stacked Silicon Wafer-Based Technology for Multilayer Multi-Chip Modules // 2026 ElCon Conference of Young Researchers in Micro and Nanoelectronics, Electrical Engineering Materials, Plasmas and Fields, Photonics and Electro-Optics (ElCon-MN), Saint Petersburg, Russian Federation, 2026. P. 67–70.
2. Вейко В. П., Скворцов А. М., Ту Х. К., Петров А. А. Лазерная абляция монокристаллического кремния под действием импульсно-частотного излучения волоконного лазера/ // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2015. — Т. 15. — № 3. — С. 426–434.

УДК 621.3.049.77, 537.533.35

Влияние диэлектрического слоя SiO2 на точность формирования структуры кроссбара мемристоров при электронно-лучевой литографии

Фетисенкова К. А.[1,2], Татаринцев А. А.[2,3], Рогожин А. Е.[2], Иешкин А. Е.[3], Буруто М. Д.[3]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] НИЦ «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, площадь академика Курчатова, 1
[3] МГУ имени М. В. Ломоносова, физический факультет
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Экспериментально исследовано влияние толщины диэлектрического слоя SiO_2 (0–1,5 мкм) на точность электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) при формировании наноразмерных элементов кроссбара мемристоров. При толщине SiO_2 1,4 мкм ошибка в размерах составляет 8 нм. Обнаруженный эффект объясняется изменением баланса между обратно рассеянными и вторичными электронами, а также зарядкой диэлектрика.

Ключевые слова: электронно-лучевая литография; кроссбар мемристоров; диэлектрическая подложка; зарядка диэлектрика; вторичная электронная эмиссия.

Influence of the SiO_2 dielectric underlayer on the patterning accuracy of memristor crossbar structures by electron-beam lithography

Fetisenkova K. A.[1,2], Tatariantsev A. A.[2,3], Rogozhin A. E.[2], Ieshkin A. E.[3], Buruto M. D.[3]

[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] National Research Centre "Kurchatov Institute"
1 Akademika Kurchatova Sq., Moscow, 123182, Russia
[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

The effect of the SiO_2 dielectric layer thickness (0–1.5 μm) on the accuracy of electron-beam lithography (EBL) for the formation of nanoscale memristor crossbar elements was experimentally studied. At a SiO_2 thickness of 1.4 μm, the dimensional error reaches 8 nm. The observed effect is explained by a change in the balance between backscattered and secondary electrons, as well as by dielectric charging.

Keywords: electron-beam lithography; memristor crossbar; dielectric substrate; dielectric charging; secondary electron emission.

Одним из вариантов размещения кроссбара мемристоров в интегральных схемах комплементарной структуры металл –оксид –полупроводник (КМОП) является

их интеграция между верхними уровнями металлизации [1] в межслойном диэлектрике толщиной от 300 нм до 1,5 мкм [2]. При этом нижние дорожки кроссбара (word lines) формируются непосредственно на диэлектрическом слое.

При изготовлении прототипов вычислительных систем на основе мемристоров широко используется электронно-лучевая литография (ЭЛЛ). Однако при проведении ЭЛЛ на диэлектрических подложках из-за накопления заряда снижается разрешение литографии [3]. Стандартная процедура коррекции эффекта близости, ориентированная на проводящую подложку, в этих условиях не работает. Вследствие этого фактические размеры устройств отклоняются от проектных, что может приводить к увеличению вариабельности характеристик мемристоров.

Наблюдается существенное уменьшение пороговой дозы проявления при увеличении толщины слоя SiO_2 (табл. 1).

Таблица 1. Пороговая доза проявления для разных толщин слоя SiO_2

Толщина SiO_2, нм	0	763	1108	1419
Доза проявления, мкКл/см^2	310	280	250	250

Максимальное наблюдаемое значение уширения линии относительно структур, полученных на чистом кремнии, составило 5 нм при толщине диэлектрика 760–1110 нм и 8 нм при толщине диэлектрика 1420 нм. Для исследования влияния толщины оксида были проведены исследования эмиссионных свойств пленок SiO_2 с указанными толщинами на Si. На рис. 2 представлены снимки РЭМ для линий с дозой экспонирования 5000 мкКл/см^2.

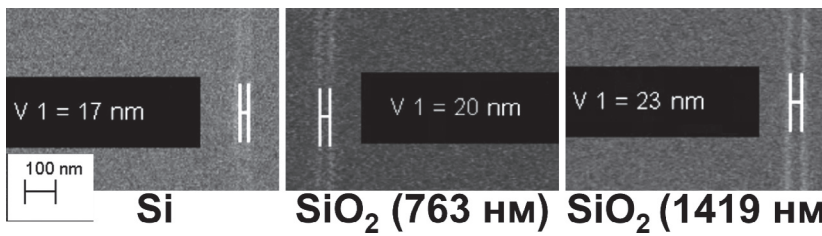


Рис. 2. Снимки РЭМ для линий с дозой экспонирования 5000 мкКл/см^2

Искажение топологии при ЭЛЛ на диэлектрической подложке зависит от толщины диэлектрика. Результаты позволяют вводить поправочные коэффициенты для литографии на многослойных подложках, обеспечивая однородность кроссбара мемристоров.

Экспонирование проводилось на электронно-лучевом литографе *Raith-150* (*Raith, Inc.,* США) при энергии электронов 30 кэВ и токе пучка 150 пА. Были сформированы массивы линий длиной 1 мм, доза экспонирования которых варьировалась от 5000 до 20000 с шагом 250 мкКл/см^2; квадраты шириной 50 мкм имели различные дозы экспонирования от 50 до 350 мкКл/см^2. Измерения толщины остаточного резиста на квадратах проводились с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Изображения структур получены с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. El Mesoudy A. et al. Fully CMOS-compatible passive TiO_2-based memristor crossbars for in-memory computing // Microelectronic Engineering, 2022. Vol. 255. P. 111706.
2. Teng Q. et al. Reliability challenges in CMOS technology: A manufacturing process perspective // Microelectronic Engineering, 2023. Vol. 281. P. 112086.
3. Cui Z. Electron beam lithography // Nanofabrication: principles, capabilities and limits. Cham.: Springer International Publishing, 2024. P. 83–139.

УДК 621.382.27

Особенности формирования тонкопленочного $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ на двумерном MoS_2 для FeFET-транзисторов нового поколения

Коробкин Е. Н., Колинько К. С., Маркеев А. М., д. т. н., Черникова А. Г., к. ф.-м. н.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
korobkin.en@phystech.edu

Рассматривается технология формирования сегнетоэлектрического полевого транзистора памяти на основе тонкопленочного сегнетоэлектрика $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ и полупроводникового канала из 2d-MoS_2. Особое внимание уделяется решению проблемы роста сегнетоэлектрика методом АСО на двумерном полупроводнике.

Ключевые слова: двумерные полупроводники; сегнетоэлектрики; оксид гафния-циркония; дисульфид молибдена; атомно-слоевое осаждение; РФЭС; FeFET.

Specific Features of Thin-Film $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ Formation on Two-Dimensional MoS_2 for Next-Generation FeFETs

Korobkin E. N., Kolinko K. S., Markeev A. M., Sc.D, Chernikova A. G., Ph.D
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
korobkin.en@phystech.edu

The technology for fabricating a ferroelectric field-effect memory transistor based on a thin-film $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ ferroelectric and a 2D-Mo_2 semiconductor channel is considered. Particular attention is paid to addressing the challenges associated with the atomic layer deposition (ALD) growth of the ferroelectric layer on a two-dimensional semiconductor.

Keywords: two-dimensional semiconductors; ferroelectrics; hafnium–zirconium oxide; molybdenum disulfide; atomic layer deposition; X-ray photoelectron spectroscopy (XPS); FeFET.

В последнее время все большую актуальность приобретает концепция вычислений в памяти (in-memory computing), лишенная основных недостатков архитектуры фон Неймана. Одним из наиболее перспективных устройств для ее реализации является сегнетоэлектрический полевой транзистор (ferroelectric field-effect transistor, FeFET) на основе $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ (HZO).

К настоящему времени уже продемонстрированы массивы FeFET на основе HZO и кремния [1], однако они реализованы при технологических нормах более 10 нм. Применение техпроцессов менее 7 нм для КМОП-устройств на основе кремния существенно затруднено вследствие выраженных короткоканальных эффектов и резкого снижения подвижности носителей при уменьшении характерных размеров до единиц нанометров [2].

Одним из подходов для преодоления описанных ограничений является замена кремния на альтернативные материалы, такие как двумерные дихалькогениды переходных металлов, прежде всего дисульфид молибдена (MoS_2). В литературе представлено несколько работ по созданию FeFET на основе MoS_2 и HZO [3], однако в них реализованы устройства с нижним затвором, в которых на заранее сформированный сегнетоэлектрик переносится слой MoS_2. Такая архитектура в перспективе не может обеспечить локальное управление элементами массива. Целью данной работы являлось создание FeFET с верхним затвором. Однако при этом проявляется серьезная проблема — невозможность формирования высококачественного сегнетоэлектрического слоя HZO непосредственно на поверхности двумерного материала традиционно используемым методом атомно-слоевого осаждения (АСО) [1, 4]. Это связано с тем, что поверхность MoS_2 практически не содержит активных центров, необходимых для эффективного связывания прекурсоров на начальных этапах АСО, в результате чего рост происходит преимущественно на границах зерен MoS_2, что препятствует формированию сплошного тонкого (~10 нм) сегнетоэлектрического слоя.

Для решения данной проблемы предлагаются различные подходы: напыление тонких (~1–2 нм) подслоев диэлектриков (Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, HfO_2) методами, отличными от АСО (магнетронное или электронно-лучевое напыление), а также модификация стандартного режима АСО. В работе с помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии изучена граница раздела MoS_2 с различными подслоями, установлено их влияние на сохраняемость двумерной подложки и свойства получаемого диэлектрика, проведены детальные исследования электрофизических свойств и элементного состава сегнетоэлектрических пленок, получаемых с применением различных подходов. На основании полученных результатов разработана оптимальная для роста тонких пленок HZO на двумерных подложках технология и показана ее применимость для формирования FeFET.

Варьирование подслоев проводилось за счет гранта Российского научного фонда, проект № 23-19-00227-П. Эксперименты выполнены в центре коллективного пользования уникальным научным оборудованием в области нанотехнологий МФТИ.

Литература

1. Mulaosmanovic H. et al. Ferroelectric field-effect transistors based on HfO2: a review // Nanotechnology, 2021. Vol. 32. № 50. P. 502002.
2. Claeys C., Simoen E. (2017) Fundamentals of Advanced Semiconductor Devices / Kuhn K. J. et al. // IEEE IEDM, 2010. P. 8.1.1–8.1.4
3. Shen P. C. et al. Ferroelectric memory field-effect transistors using CVD monolayer MoS_2 as resistive switching channel // Applied Physics Letters, 2020. Vol. 116. № 3.
4. George S. M. Atomic layer deposition: an overview // Chemical reviews, 2010. Vol. 110. № 1. P. 111–131.

УДК 539.23

Метод получения тонких пленок Al:Ta2O5 и исследование их свойств для применения в мемристорах

Шулаев Н. А.[1], Бобылёв А. Н.[1], Кассеинов Р.[1], Волкова С. С.[2], Удовиченко С. Ю.[1]

[1] Лаборатория мемристорных материалов, школа естественных наук, Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
[2] Школа естественных наук, Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
shulaev_2000@mail.ru

Проведено исследование влияния примеси алюминия с концентрацией от 0 до 13,96 ат.% (по металлической решетке) в тонких пленках оксида тантала, полученных методом совместного реактивного магнетронного распыления. Изучены особенности режимов напыления, морфологические и физические свойства пленок.

Ключевые слова: тонкие пленки; магнетронное напыление; оксид тантала; ширина запрещенной зоны; легирование.

Method for producing thin Al:Ta_2O_5 films and studying their properties for use in memristors

Shulaev N. A.[1], Bobylev A. N.[1]

Kasseinov R.[1], Volkova S. S.[2]

Udovichenko S. Yu.[1]

[1] Laboratory of Memristor Materials, School of Natural Sciences, University of Tyumen
6 Volodarskogo St., Tyumen, 625003, Russia
[2] School of Natural Sciences, University of Tyumen
6 Volodarskogo St., Tyumen, 625003, Russia
shulaev_2000@mail.ru

A study of the influence of aluminum impurity with concentrations ranging from 0 to 13.96 at. % (calculated with respect to the metal matrix) on tantalum oxide thin films prepared by reactive co-sputtering has been carried out. The peculiarities of the sputtering regimes, as well as the morphological and physical properties of the films, were studied.

Keywords: thin films; magnetron sputtering; tantalum oxide; band gap; doping.

Мемристоры вызывают исследовательский интерес благодаря перспективной эффективности, простоте изготовления и совместимости с КМОП-технологией. Однако серийное производство отсутствует из-за недостаточной надежности устройств. Явление резистивного переключения остается недостаточно изученным с точки зрения влияния структурных и физических свойств материала активного слоя на лежащие в его основе физические процессы.

Оксид тантала (TaO_x) уже давно считается одним из перспективных материалов благодаря высокому быстродействию и энергоэффективности [1]. Существует ряд работ, посвященных легированию TaO_x в целях улучшения свойств за счет создания условий для формирования кислородных вакансий. В свою очередь легирование алюминием позволяет уменьшить потери при обучении и повысить точность классификации искусственных нейронных сетей на основе мемристоров [6]. В указанных исследованиях преимущественно анализируются электрические характеристики, материаловедческие аспекты и технологические особенности рассматриваются поверхностно [3]. Комплексного изучения влияния концентрации допанта на физические свойства активного слоя до настоящей работы не проводилось.

В данной работе исследовано влияние концентрации легирующей примеси на физические свойства Al:Ta_2O_5 и определены условия получения тонких пленок методом совместного реактивного магнетронного распыления на установке *AcademVac NanoFab-100*.

Синтез пленок проводился совместным распылением мишеней Ta (ВЧ-магнетрон) и Al (импульсный магнетрон) в среде Ar + O_2. Анализ состава выполнен методом EDS (СЭМ *Tescan MIRA3*), морфологии — АСМ (*NT-MDT Ntegra*), ширины запрещенной зоны — по спектрам оптического поглощения (*Shimadzu UV-2450*, графики Тауца), структуры — РФА (*Tongda Td-3500*).

Получены пленки девяти составов с концентрацией Al 0–13,96 ат.% в металлической матрице. Для варьирования состава изменялась мощность распыления примесного материала с импульсного магнетрона в диапазоне 0–94 Вт, при этом мощность на ВЧ-магнетроне не менялась и составляла 250 Вт, исходя из исследования условия формирования стехиометрического оксида методом реактивного магнетронного распыления. Давление в камере –0,2 Па, расход кислорода –20 $ссм^3$/м. Все пленки имели толщину 250 нм и являлись аморфными, что подтверждается результатами РФА. Средняя шероховатость поверхности, по данным АСМ, не превышает 0,22 нм и не зависит от концентрации легирующей примеси. Ширина запрещенной зоны монотонно увеличивается от чистого Ta_2O_5 с E_g в диапазоне от 4,45 до 4,537 эВ (табл. 1).

Таблица 1. Свойства и составы пленок Al:HfO_2

Мощность распыления на импульсном магнетроне	Концентрация алюминия, %	Ширина запрещенной зоны, эВ	Средняя шероховатость, нм
0	0,00	4,449	0,22
10	1,57	4,475	0,21
11	1,70	4,482	0,19
15	2,65	4,487	0,19
26	4,68	4,504	0,21
30	5,18	4,501	0,22
50	7,79	4,509	0,19
70	11,63	4,525	0,20
94	13,96	4,537	0,21

Таким образом, определены условия получения аморфных пленок легированного оксида тантала. Легирование алюминием позволяет тонко управлять шириной запрещенной зоны аморфных пленок Al:Ta_2O_5 при сохранении высокой морфологической однородности, что открывает перспективы для оптимизации характеристик мемристоров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Тюменскому государственному университету (проект FEWZ-2024-0020).

Литература

1. Torrezan A. C., Strachan J. P., Medeiros-Ribeiro G., Williams R. S. Sub-nanosecond switching of a tantalum oxide memristor // Nanotechnology, 2011. Vol. 22. № 48. Art. 485203. DOI: 10.1088/0957-4484/22/48/485203.
2. Song Y.-W., Kim S.-H., Lee S.-Y., Kim T.-H., Kim D.-H., Park B.-G. Linear Conductance Modulation in Aluminum Doped Resistive Switching Memories for Neuromorphic Computing // Electron. Mater. Lett., 2024. Vol. 20. № 6. P. 725–732. DOI: 10.1007/s13391-024-00516-w.
3. Kim S., Choi S., Lee J., Lu W. D. Tuning Resistive Switching Characteristics of Tantalum Oxide Memristors through Si Doping // ACS Nano, 2014. Vol. 8. № 10. P. 10262–10269. DOI: 10.1021/nn503464q.

УДК 539.216.2

Синтез углеродных пленок методом импульсного лазерного осаждения

Шкапина А. С., Крюков Р. Н., к. ф.-м. н., Лесников В. П., Вихрова О. В., к. ф.-м. н., Здоровейщев А. В., к. ф.-м. н., Данилов Ю. А., к. ф.-м. н., Балуева А. А.
ННГУ им. Н. И. Лобачевского
603950, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, 23/3
alenashkapina@yandex.ru

Рассмотрена возможность синтеза углеродных пленок методом импульсно-лазерного осаждения в вакууме. Оценено влияние высокотемпературного отжига на гибридизацию в пленках. По итогам работы можно выявить оптимальные параметры эксперимента для синтеза углеродных пленок, подходящих под различные задачи.
Ключевые слова: углеродные слои; импульсное лазерное нанесение; рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия; гибридизация; быстрый термический отжиг.

Synthesis of carbon thin films by pulsed laser deposition

Shkapina A. S., Kryukov R. N., Ph.D, Lesnikov V. P., Vikhrova O. V., Ph.D, Zdoroveyshchev A. V., Ph.D, Danilov Yu. A., Ph.D, Balueva A. A.
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
23/3 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603950, Russia
alenashkapina@yandex.ru

The possibility of synthesizing carbon films using pulsed laser deposition in vacuum is examined. The effect of high-temperature annealing on hybridization in films is assessed. Based on the results of this study, optimal experimental parameters can be identified for synthesizing carbon films suitable for various applications.
Keywords: carbon layers; pulsed laser deposition; X-ray photoelectron spectroscopy; hybridization; rapid thermal annealing.

Особое место в современной науке занимают углеродные структуры. Благодаря своим выдающимся характеристикам они могут подходить под множество задач: создание защитных покрытий, барьерных слоев или активных элементов [1]. Открытым остается вопрос о наилучшем методе получения. Одним из подходящих методов синтеза может стать импульсное лазерное осаждение (ИЛО), которое обладает высокой производительностью и воспроизводимостью результатов, что делает его особо привлекательным для использования.

В текущей работе предлагается выращивание углеродных слоев на подложке германия. Данный выбор обусловлен возможностью дальнейшего применения готовых структур в области фотоники [2]. Формирование слоев происходило в вакуумной установке для ИЛО. Температура подложки поддерживалась постоянной и равной 500 °C, распыляемое вещество –пиролитический графит, а длительность процесса –20 и 60 секунд. После осаждения структуры делились надвое, одна часть

была подвергнута быстрому термическому отжигу (БТО) в атмосфере аргона в течение 15 секунд при температуре 800 °C, вторая же часть оставалась нетронутой. Для простоты в дальнейшем образцы будут обозначены численными значениями. Для исследования использовались следующие методы: растровая электронная микроскопия (РЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ) и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) [3].

Анализ РЭМ-изображений показал однородную структуру пленок без поверхностных включений. АСМ-изображения показывают наличие на поверхностях образцов включений различной высоты, которые не были различимы на электронном микроскопе. Включения вероятнее всего соответствуют скоплениям атомов.

Анализ фотоэлектронных спектров позволил выявить наличие кислорода на поверхности образцов, что связано с окислительными процессами, т. к. процесс роста и анализа осуществлялся в разных установках. Дальнейшее изучение профилей распределения позволило оценить реальные толщины, которые оказались сопоставимыми с технологически заложенными. Для численных расчетов использовался профиль фотоэлектронной линии C 1*s*. Удалось установить, что атомы углерода в слоях находятся в состояниях с sp^2- и sp^3-гибридизацией. Соотношение концентраций по глубине этих сортов атомов изменяется. Так, максимальное количество атомов sp^3-C наблюдается на гетерогранице C/Ge. Проведение БТО во всем углеродном слое приводит к значительному увеличению sp^3-гибридизированных атомов углерода. На рис. 1 представлена зависимость соотношения концентраций сортов атомов углерода по глубине для пленки 60-0 и 60-1.

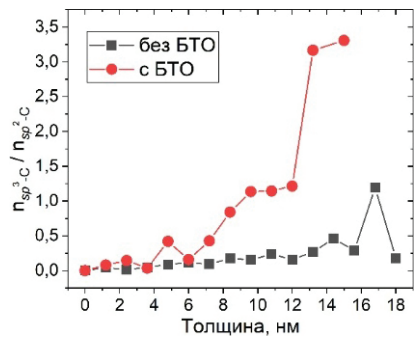


Рис. 1. Доля sp^3-гибридизации для образцов 60-0 и 60-1

Таким образом, полученные результаты показывают, что БТО обеспечивает возможность корректировки состава углеродных слоев. Изменение соотношения концентраций атомов углерода с разной гибридизацией указывает на возможность изменения структуры углеродных пленок, полученных методом ИЛО.

Работа выполнена при поддержке программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

1. Yazdi G. R., Iakimov T., Yakimova R. // Materials, 2016. Vol. 9. № 5. P. 347.
2. Kwon M. G., Kim C., Chang K. E. et al. // APL Photon, 2022. Vol. 7. P. 026101.
3. Boryakov A. V., Surodin S. I. et al. // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 2018. Vol. 229. P. 132–140.

УДК 621.383

Оптимизация процесса получения пленочных структур на основе ККТ HgTe для фотосенсоров ИК-диапазона

Хакимов К. Т.[1], Королева Т. В.[1], Сапцова О. А.[1], Яковлев В. О.[1], Асначёв Д. Д.[1], Чемакина Я. А.[1], Медведев А. Г.[1], к. х. н., Попов В. С.[1,2], к. х. н.
[1] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Karim.Khakimov@gmail.com
[2] ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

Коллоидные квантовые точки (ККТ) — это новый уникальный материал, свойства которого позволяют использовать ККТ в качестве основы фотодетекторов. Одним из шагов получения такого фотодетектора является синтез ККТ HgTe и их нанесение на проводящую подложку методом печати, после чего ККТ начинают подвергаться активному воздействию окружающей среды, что со временем будет значительно ухудшать оптические и электрические свойства полученного фоторезистора. В данном исследовании предлагается после получения пленочной структуры покрывать ее пленкой из полиметилметакрилата, которая будет препятствовать воздействию окисления кислородом воздуха и пыли.
Ключевые слова: коллоидные квантовые точки; теллурид ртути; замена лигандов; послойная замена лигандов; формирование пленки; полиметилметакрилат; вольт-амперная характеристика.

Process optimization for producing HgTe CQDs film structures for IR photosensors

Khakimov K. T.[1], Koroleva T. V.[1], Saptsova O. A.[1], Yakovlev V. O.[1], Asnachev D. D.[1], Chemakina Ya. A.[1], Medvedev A. G.[1], Ph.D, Popov V. S.[1,2], Ph.D
[1] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
Karim.Khakimov@gmail.com
[2] Orion R&P Association Inc.
9 Kosinskaya St., Moscow, 111538, Russia

Colloidal quantum dots (CQDs) are a new, unique material whose properties make them suitable for use as the basis for photodetectors. One step in producing such a photodetector is synthesizing HgTe CQDs and printing them onto a conductive substrate. Afterward, the CQDs are exposed to environment, which over time will significantly degrade the optical and electrical properties of the resulting photoresistor. This study proposes coating CQD film structure with a polymethyl methacrylate film, which will prevent oxidation by atmospheric oxygen and dust exposure.
Keywords: colloidal quantum dots; mercury telluride; ligand exchange; layer-by-layer ligand exchange; film formation; polymethylmethacrylate; current-voltage characteristic.

Коллоидные квантовые точки (ККТ) — это новый уникальный материал, свойства которого позволяют использовать его в качестве генератора, поглотителя и преобразователя излучения. Одним из перспективных направлений применения ККТ является фотосенсорика. Правильно подбирая материал и размер квантовых точек, можно создавать фоточувствительные устройства, работающие в различных частях инфракрасного спектра. Коммерческие приборы на основе ККТ уже существуют и способны регистрировать коротковолновое инфракрасное излучение. Однако исследования по созданию устройств, способных работать в средних и дальних инфракрасных областях, все еще продолжаются [1]. На сегодняшний день существует несколько материалов, которые потенциально могут быть использованы в MWIR-фотодетекторах: HgTe, HgSe, HgS и Ag_2Se [2].

Главная проблема MWIR- и LWIR-фотодетекторов (например на CdHgTe или InSb) — необходимость глубокого охлаждения (до 77 К или даже ниже), требующегося для подавления теплового шума, весьма значительного на этих длинах волн [3]. Квантовые точки HgTe отличаются тем, что благодаря своей структуре энергетических зон, менее чувствительной к тепловым возбуждениям, могут работать при комнатной температуре. Для LWIR-диапазона существуют альтернативы — квантово-каскадные детекторы (QCD) и детекторы на квантовых ямах (QWIP). Однако они кардинально уступают HgTe КТ, так как нечувствительны к нормально падающему свету (требуют сложной оптики и дифракционных решеток) [4]. КТ HgTe, напротив, поглощают свет при нормальном падении, как обычные фотодиоды. Это упрощает оптическую схему и увеличивает эффективность использования светового потока.

Одним из шагов получения такого фотодетектора является синтез ККТ HgTe и их нанесение на проводящую подложку методом печати. В процессе нанесения можно менять такие параметры, как вязкость раствора и тип замены лигандов. Но результатом всегда будет пленочная структура, подвергающаяся воздействию окружающей среды, что со временем будет значительно ухудшать оптические и электрические свойства полученного фоторезистора. Предлагается после получения пленочной структуры покрывать ее пленкой из полиметилметакрилата, которая будет препятствовать воздействию окисления кислородом воздуха и пыли. В данном исследовании рассмотрено влияние пленки из полиметилметакрилата на оптические и электрофизические свойства фоторезистора.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FSMG-2025-0024.

Литература

1. Пономаренко В. П. Фотосенсоры на основе коллоидных квантовых точек / В. П. Пономаренко, В. С. Попов, И. А. Шуклов, В. В. Иванов, В. Ф. Разумов // Успехи химии, 2024. — Т. 93. — № 4. P. RCR5113. — DOI: 10.59761/RCR5113.
2. Пономаренко В. П., Попов В. С. Нульмерная сенсорика. Квантовые точки. — М.: Техносфера, 2025. –268 с. –ISBN 978-5-94836-733-0.
3. Xue X. et al. High-operating-temperature mid-infrared photodetectors via quantum dot gradient homojunction // Light: Science & Applications, 2023. Vol. 12:2. DOI: 10.1038/s41377-022-01014-0.
4. Mid-infrared quantum cascade detectors for applications in spectroscopy and pyrometry / D. Hofstetter et al. // Applied Physics B, 2010. Vol. 100. P. 313–320. DOI: 10.1007/s00340-010-3965-2.

УДК 53.089.6, 620.19

Улучшенный метод нанесения латексных микросфер на кремниевые пластины для калибровки анализаторов частиц

Корякова Е. Е.[1,2], Козлов А. К.[1,2], Строкачук А. Н.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
ekoryakova@niime.ru, akozlov@niime.ru, astrokachuk@niime.ru

Проведен сравнительный анализ существующих методов формирования калибровочных пластин (центрифугирование и жидкостное нанесение) для анализаторов частиц. Предложен улучшенный метод, включающий предварительную экспозицию подложки УФ-излучением. Установлено, что гидрофилизация поверхности озоном позволяет исключить потерю и слипание частиц, обеспечивая при этом высокую равномерность нанесения по площади.
Ключевые слова: латексные сферы; центрифугирование; гидрофилизация поверхности; УФ-озонация; дефектность.

Improved method of applying latex microspheres to silicon wafers for calibration of particle analyzers

Koryakova E. E.[1,2], Kozlov A. K.[1,2], Strokachuk A. N.2
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

A comparative analysis of the existing methods of forming calibration plates (centrifugation and liquid deposition) for particle analyzers has been carried out. An improved method is proposed, including preliminary exposure of the substrate to UV radiation. It has been found that surface hydrophilization with ozone makes it possible to eliminate the loss and clumping of particles, while ensuring high uniformity of application over the area.
Keywords: latex spheres; centrifugation; surface hydrophilization; UV ozonation; defectiveness.

В современном производстве микроэлектроники одним из ключевых показателей рентабельности является выход годных кристаллов [1]. Данный параметр напрямую зависит от уровня дефектности, привносимой при проведении технологических операций. Тенденция к уменьшению топологических норм интегральных схем ужесточает требования к контролю механической дефектности. Превышение допустимого уровня последней требует оперативного выявление источника загрязнений, в частности на основе классификации обнаруживаемых частиц по их оптическому размеру.

Для калибровки сканирующих лазерных анализаторов частиц чаще всего используются эталонные кремниевые пластины с предварительно нанесенными монодисперсными латексными сферами [2]. Качество калибровки и адекватность последующих измерений зависят от равномерности нанесения и монодисперсности (однородности по размеру) латексных частиц. В литературе описаны два базовых метода нанесения латексных частиц из соответствующих суспензий: центрифугирование и статическое жидкостное осаждение. К сожалению, оба этих метода обладают критическими недостатками, не позволяющими осуществлять надежную калибровку по количеству и размеру частиц. Целью данной работы являлись разработка и исследование возможностей улучшенного метода, лишенного недостатков традиционных подходов.

Объектом исследования служили кремниевые пластины, на которые наносилась водная суспензия монодисперсных латексных сфер ГЭТ 163-2020. Сравнивались три технологических подхода:

а) центрифугирование (дозированная подача суспензии на вращающуюся кремниевую пластину);
б) статическое нанесение (дозированная подача и высыхание капли суспензии на неподвижной кремниевой пластине);
в) модифицированное статическое осаждение. В последнем случае поверхность пластины предварительно обрабатывали в УФ-озонаторе для удаления органических загрязнений и гидрофилизации поверхности [3].

Установлено, что оба традиционных метода неэффективны для задач высокоточной калибровки. В частности, при центрифугировании центробежные силы сбрасывают основной объем суспензии за пределы подложки, что ведет к неконтролируемой потере эталонного раствора. Статическое осаждение исключает потерю латексных сфер, но вызывает их массовую агломерацию из-за малого растекания капли на исходной поверхности. При высыхании капиллярные потоки стягивают сферы в плотные кластеры (эффект «кофейного кольца»), которые генерируют широкий спектр рассеяния и искажают калибровочный сигнал. Показано, что УФ-озонация поверхности кремния переводит ее в гидрофильное состояние, что способствует снижению сил поверхностного натяжения в жидкости, обеспечивает растекание капли по всей поверхности пластины и подавляет капиллярную агрегацию при высыхании. В результате на поверхности образуется равномерная пленка с известным количеством частиц. Дисперсия оптического отклика от образцов, полученных этим методом, характеризуется узким и симметричным профилем, что подтверждает формирование монослоя изолированных частиц. Таким образом, предложенный метод успешно решает обе проблемы: обеспечивает корреляцию как по размерам, так и по количеству частиц. Это существенно повышает метрологическую достоверность калибровочных пластин, обеспечивает возможность точной настройки лазерных анализаторов и в итоге способствует повышению выхода годных изделий.

Литература

1. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 13–19.

2. Dagata J. A. et al. Method for measuring the diameter of polystyrene latex reference spheres by atomic force microscopy. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2016. 26 p. (NIST SP 260-185).
3. Раводина А. М., Зюзин С. С., Резванов А. А. Исследование влияния параметров образцов, полученных атомно-слоевым осаждением, на фазовый состав слоев оксидов металлов. — М.: Техносфера, 2025. — С. 1142–1143.

УДК 621.794.6:621.359:621.385.64

Синтез тонкопленочного люминофорного покрытия методом реактивного магнетронного сораспыления

Рунц А. А.[1,2], Блейхер Г. А.[1], д. ф.-м. н.
[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30
[2] Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40
aar74@tpu.ru

Разработан двухстадийный метод синтеза тонкопленочных люминофоров YAG:Ce/Tb, включающий высокоскоростное реактивное магнетронное сораспыление металлических мишеней (Y, Al, Ce/Tb) и контролируемый отжиг. Установлено, что послойная архитектура позволяет эффективно подавлять трещинообразование, обеспечивая высокую интенсивность катодолюминесценции.
Ключевые слова: YAG:Ce; YAG:Tb; люминофорные покрытия; реактивное магнетронное распыление; многослойные покрытия; катодолюминесценция; тонкие пленки.

Synthesis of thin-film phosphor coating by reactive magnetron co-sputtering

Runts A. A.[1,2], Bleikher G. A.[1], Doctor of Physical and Mathematical Sciences
[1] National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia
[2] Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia

A two-stage method for the synthesis of YAG:Ce/Tb thin-film phosphors has been developed, including high-rate reactive magnetron co-sputtering of metallic targets (Y, Al, Ce/Tb) and controlled annealing. It was found that the layered architecture effectively suppresses cracking, providing high cathodoluminescence intensity.
Keywords: YAG:Ce; YAG:Tb; phosphor coatings; reactive magnetron sputtering; multilayer coatings; cathodoluminescence; thin films.

Люминофорные покрытия на основе иттрий-алюминиевого граната ($Y_3Al_5O_{12}$), активированного ионами Ce^{3+} и Tb^{3+}, широко востребованы в электронно-оптических преобразователях благодаря высокой химической стабильности и эффективной люминесценции. Традиционные методы получения тонкопленочных YAG:Re имеют существенные ограничения: высокочастотное распыление керамической мишени обеспечивает крайне низкую скорость осаждения (<0,2 нм/с), а последующий высокотемпературный отжиг приводит к образованию микротрещин и отслоений из-за термомеханических напряжений.

Разработка высокопроизводительного двухстадийного метода синтеза люминофорных покрытий YAG:Ce/Tb включает скоростное осаждение прекурсора

методом реактивного магнетронного сораспыления металлических мишеней и оптимизированный отжиг, а также исследование влияния послойной архитектуры на подавление дефектообразования.

Осаждение прекурсора (Y-Al-O):Ce/Tb проводили с использованием трех среднечастотных магнетронов (100 кГц) с металлическими мишенями Y, Al и Ce/Tb в атмосфере Ar/O_2. Для диссоциации и ионизации кислорода применяли плазменный ВЧ-генератор (13,56 МГц). Работа реализована в переходном режиме распыления, что обеспечило высокую скорость осаждения. Отжиг проводили на воздухе при 1200 °C (6 ч) с контролируемой скоростью нагрева. Для подавления дефектов применена послойная архитектура – циклическое осаждение тонкого слоя (400–500 нм) с его последующим отжигом. Структуру и свойства исследовали методами РФА, СЭМ, ЭДС, фотолюминесценции и катодолюминесценции.

Установлено, что переходной режим с ВЧ-активацией кислорода обеспечивает скорость осаждения 0,85 нм/с, что более чем в 30 раз превышает производительность ВЧ-распыления керамической мишени. Элементный анализ показал, что отжиг повышает содержание кислорода до стехиометрического (58–63 ат.%). Выявлено критическое влияние скорости нагрева/охлаждения: медленный нагрев (2 °C/мин) формирует однофазную структуру YAG (100 %) с шероховатостью R_a ~ 0,12 мкм, тогда как быстрый нагрев (7 °C/мин) приводит к окислению подложки, образованию нежелательной фазы SiO_2 и росту R_a до 2,5 мкм. Предложенная послойная архитектура позволила практически полностью подавить трещинообразование и отслоения, характерные для монолитного покрытия той же толщины. СЭМ-изображения поперечного сечения подтвердили формирование плотной структуры без сквозных дефектов.

Разработан высокопроизводительный метод синтеза люминофорных покрытий YAG:Ce/Tb. Доказано, что послойная архитектура в сочетании с контролируемым режимом нагрева (2 °C/мин) является эффективной стратегией подавления дефектов, возникающих при кристаллизации. Полученные покрытия обладают высокой интенсивностью катодолюминесценции и перспективны для использования в качестве экранов в электронно-оптических преобразователях нового поколения.

Литература

1. Runts A., Bleykher G., Stepanov S., Valiev D. Reactive magnetron deposition of YAG:Ce phosphor coatings in the metallic mode // Optical Materials, 2024. Vol. 156. P. 115946.
2. Runts A., Bleykher G., Baboshko D. et al. Effect of high-temperature annealing parameters on the structure and properties of YAG:Ce phosphor coatings deposited via mid-frequency magnetron sputtering // Optical Materials, 2026. Vol. 174. P. 117965.

УДК 621.3.049.772.1.002

Исследование влияния кремнийсодержащих слоев на механические свойства диэлектрической мембраны, применяемой в технологии матричного МЭМС-преобразователя состава газа

Николаева А. В.[1], Поломошнов С. А.[1], Амеличев В. В.[1], Кривецкий В. В.[1,2]
[1] Научно-производственный комплекс «Технологический центр»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7, комната 7237
[2] МГУ имени М. В. Ломоносова, химический факультет
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 3

В работе представлены результаты исследования влияния кремнийсодержащих слоев на механические свойства диэлектрической мембраны, применяемой в технологии матричного МЭМС-преобразователя состава газа. Сравнительный анализ влияния состава слоев диэлектрических мембран позволил улучшить механические свойства мембран в части снижения механических напряжений и повышения их прочности.
Ключевые слова: микроэлектромеханические системы; диэлектрическая мембрана; механические напряжения; газовые сенсоры.

Effect of silicon-containing layers on the mechanical properties of a dielectric membrane in a MEMS gas sensor array

Nikolaeva A. V.[1], Polomoshnov S. A.[1], Amelichev V. V.[1], Krivetskiy V. V.[1,2]
[1] Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre"
off. 7237, 1 Shokin Sq., Bldg. 7, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[2] Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry
1 Leninskie Gory, Bldg. 3, GSP-1, Moscow, 119991, Russia

This paper reports the results of an investigation into the effect of silicon-containing layers on the mechanical behavior of a dielectric membrane used in the manufacturing technology of a MEMS Gas Sensor Array. A comparative analysis of the influence of the dielectric membrane layer composition allowed for an improvement in the membrane mechanical properties, specifically through the reduction of mechanical stress and an increase in mechanical strength.
Keywords: microelectromechanical systems; dielectric membrane; initial stress; gas sensors.

Одним из ключевых элементов матричного МЭМС-преобразователя состава газа резистивного типа является диэлектрическая мембрана, которая выполняет три критически важные функции: электрическую изоляцию микронагревателя и токоведущих дорожек, механическую поддержку газчувствительного слоя и тепловую изоляцию микронагревателя от кремниевого кристалла [1]. Основными требованиями, предъявляемыми к диэлектрической мембране, являются низкая теплопроводность, высокая механическая прочность, минимальные внутренние напряжения и долговременная стабильность в условиях циклического нагрева до 600 °C [2, 3].

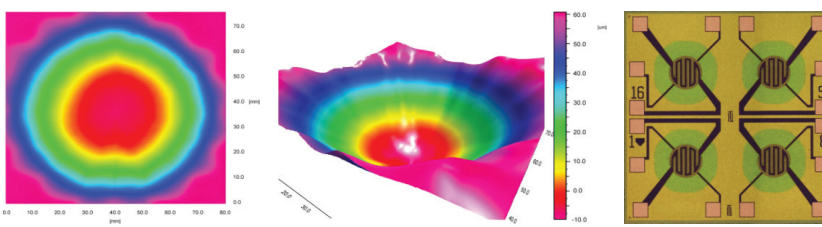
Целью данной работы является представление новых результатов исследования механических напряжений кремнийсодержащих слоев, применяемых в технологии изготовления многослойных диэлектрических мембран для конструкции кремниевого кристалла МЭМС-преобразователя состава газа.

Исследования проводились на кремниевых подложках КЭФ-4,5 толщиной 420±10 мкм, диаметром 100 мм путем последовательного формирования двух основных кремнийсодержащих слоев SiO_2 и Si_3N_4. В первой структуре была сформирована комбинация термического слоя SiO_2 и осажденного слоя Si_3N_4. Во второй структуре была сформирована комбинация осажденного из газовой фазы слоя SiO_2 (ТЭОС) и осажденного слоя Si_3N_4. Анализ внутренних механических напряжений в экспериментальных диэлектрических структурах проводился на оптическом профилометре *FRT MicroProf 100* (*FRT*, Германия). С помощью профилометра формировалась 3D-визуализация прогиба подложек с экспериментальными диэлектрическими структурами (рис. 1*а*, *б*). На основании полученных результатов и с учетом толщин слоев, сформированных на поверхности кремниевых подложек, определялся уровень механических напряжений в итоговой структуре. Оценка механических напряжений в подложке до и после процесса формирования диэлектрической структуры позволила оценить уровень механических напряжений непосредственно в исследуемых комбинациях слоев SiO_2 и Si_3N_4.

В целях упрочнения формируемой структуры диэлектрической мембраны полученные комбинации слоев SiO_2 и Si_3N_4, были дополнены слоем низкотемпературного слоя оксида кремния, сформированного методом PECVD.

В результате исследования механических напряжений в упрочненных трехслойных структурах было установлено, что комбинация из слоев осажденного SiO_2 (ТЭОС), осажденного слоя Si_3N_4 и слоя низкотемпературного SiO_2 (PECVD) обладает минимальными внутренними механическими.

На основе полученной низконапряженной трехслойной диэлектрической структуры осажденного SiO_2 (ТЭОС), осажденного слоя Si_3N_4 и низкотемпературного SiO_2 (PECVD) сформированы диэлектрические мембраны для матричного МЭМС-преобразователя состава газа (рис. 1*в*). Высвобождение мембраны с обратной стороны от кремния производилось посредством сухого глубокого анизотропного плазмохимического травления (Bosch-процесса).



а *б* *в*

Рис. 1. 3D-визуализация подложки с исследуемыми пленками (*а, б*); фотография кристалла с диэлектрическими мембранами для матричного МЭМС-преобразователя состава газа (*в*)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-19-00703-П. Работа проводилась с использованием оборудования центра коллективного пользования «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр».

Литература

1. Wei G., Wang P., Li M., Lin Z., Nai C. Simulation and Optimization of a Planar-Type Micro-Hotplate with Si_3N4-SiO_2 Transverse Composite Dielectric Layer and Annular Heater // Micromachines, 2022. Vol. 13 (4). P. 601. URL: https://doi.org/10.3390/mi13040601.
2. Григорьев Д. М., Никифоров С. В., Кривецкий В. В., Ameличев В. В., Генералов С. С. Конечно-элементное моделирование механических напряжений в многослойной диэлектрической мембране для МЭМС-структуры газочувствительного преобразователя // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-2 (119). — С. 316–323. — URL: https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.9s.316.323.
3. Zong B., Wu S., Yang Y., Li Q. et al. Recent Advances in Resistive Gas Sensors: Fundamentals, Material and Device Design, and Intelligent Applications // Nano-Micro Letters, 2024. Vol. 17. 32 p. URL: https://doi.org/10.1007/s40820-024-01543-w.

УДК 621.3.049.76

Покрытия Ni(P), полученные методом химического осаждения, как альтернативный способ формирования барьерных/затравочных слоев в TSV-технологии

Соколова Д. Д., Буйлов Н. С., к. ф.-м. н., Ильина Е. А., Голощапов Д. Л., к. ф.-м. н., Середин П. В., д. ф.-м. н.
Воронежский государственный университет
394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1
darya-sokolova2005@yandex.ru, buylov@phys.vsu.ru

Установлено, что покрытия Ni(P) с содержанием фосфора 10 мас.%, сформированные методом химического осаждения на кремниевой подложке, обладают высоким потенциалом для применения в качестве барьерных/затравочных слоев в TSV-технологии.
Ключевые слова: 3D-интеграция; TSV-технология; барьерные/затравочные слои; химическое осаждение покрытий никель-фосфор; электрохимическое осаждение меди.

Electroless Ni(P) coatings as an alternative method for forming barrier/seed layers in TSV technology

Sokolova D. D., Ph.D Buylov N. S., Ilina E. A., Ph.D Goloshchapov D. L.[1], Sc.D Seredin P. V.
Voronezh State University
Voronezh, 394018, Russia
darya-sokolova2005@yandex.ru, buylov@phys.vsu.ru

Ni(P) coatings with a phosphorus content of 10 wt.%, formed by chemical vapor deposition on a silicon substrate, have been found to have high potential for use as barrier/seed layers in TSV technology.
Keywords: 3D integration; TSV technology; barrier/seed layers; chemical vapor deposition of nickel–phosphorus coatings; electroless copper deposition.

Технология гетерогенной 3D-интеграции рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений развития традиционной кремниевой технологии. Ее применение позволяет существенно уменьшить форм-фактор современных электронных устройств при одновременном повышении их энергоэффективности и производительности [1]. Высокая плотность межсоединений вдоль оси z между различными уровнями 3D-сборки достигается за счет формирования в кремниевой пластине TSV-межсоединений [2]. Формирование TSV-межсоединений осуществляется методом электрохимического осаждения меди, что требует предварительного нанесения на кремниевую подложку барьерного и затравочного слоев. Наиболее часто такие слои получают методом физического осаждения из газовой фазы (PVD). Однако при увеличении аспектного отношения структур (AR > 10) достижение непрерывности и равномерности слоев становится затруднительным [3]. В связи с этим в настоящей работе исследованы покрытия Ni(P), полученные методом химического осаждения на кремниевой подложке, как перспективная альтернатива барьерным/затравочным слоям в TSV-технологии.

Образцы барьерных/затравочных слоев Ni(P) с содержанием фосфора 10 мас.% были получены методом химического осаждения на планарных подложках монокристаллического кремния с ориентацией (100), а также на кремниевых подложках с TSV-структурами глубиной 100 мкм и шириной 10, 30 и 80 мкм. После этого на поверхность исследуемых покрытий медь осаждали электрохимическим способом.

Согласно данным энергодисперсионного картирования наклонного среза образца, полученного на планарной подложке (рис. 1), перемешивания слоев никеля, меди и кремниевой подложки не наблюдается, что свидетельствует о наличии у покрытия Ni(P) барьерных свойств.

Электрохимическое заполнение TSV-колодцев медью осуществляли на разработанной в Воронежском государственном университете гальванической установке с использованием режимов вращения катода и конвекции электролита. Осаждение проводили при постоянном токе в ступенчатом режиме: в течение первых двух часов при токе 20 мА, что обеспечивало формирование корректного профиля заполнения, затем в течение одного часа при токе 40 мА для финального заполнения колодца. На рис. 2 представлены SEM-изображения TSV-колодца с барьерным/затравочным слоем Ni(P), а также результат его заполнения медью.

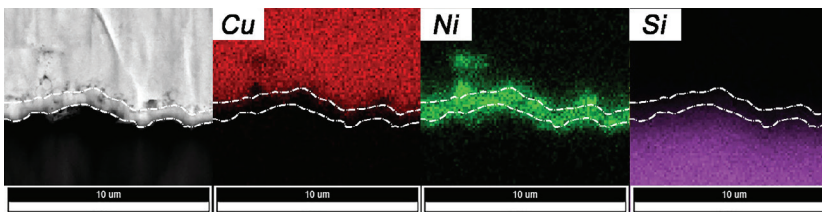


Рис. 1. Результаты энергодисперсионного картирования наклонного среза образца

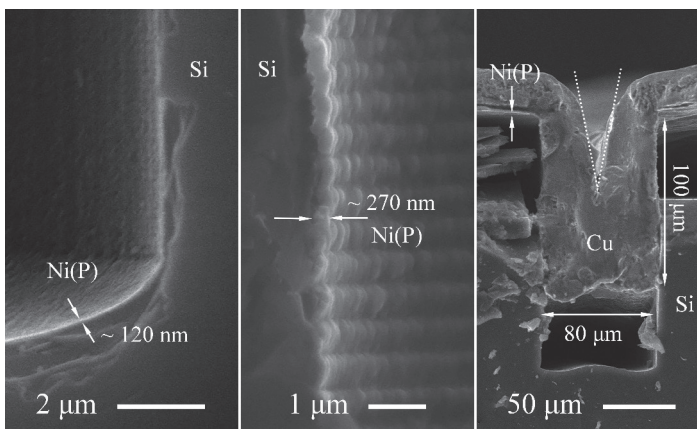


Рис. 2. SEM-изображения дна и боковой стенки TSV-колодца размером 80×100 мкм с затравочным слоем Ni(P), а также результат заполнения колодца медью

Работа поддержана Министерством образования и науки (грант № FZGU-2026-0014, грант № FZGU-2026-0009).

Литература

1. Wang Z., Dong R., Ye R., Singh S. S. K., Wu S., Chen C. A review of thermal performance of 3D stacked chips // Int. J. Heat Mass Transfer, 2024. Vol. 235. P. 126212.
2. Abdullah M. F., Lee H. W. Technology review of CNTs TSV in 3D IC and 2.5D packaging: Progress and challenges from an electrical viewpoint // Microelectron. Eng., 2024. Vol. 290. P. 112189.
3. Armini S. Cu Electrodeposition on Resistive Substrates in Alkaline Chemistry: Effect of Current Density and Wafer RPM // J. Electrochem. Soc., 2011. Vol. 158. P. P390.

УДК 620.3

Получение и управление морфологией наночастиц титана для формирования геттеров сухой аэрозольной печатью

Долгов В. А., Свирелкин Г. М., Корнюшин Д. В., Борисов В. И., Иванов М. С., Алешина М. Ю., Ворошилова В. А., Вершинина О. В., Иванов В. В.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследован процесс синтеза наночастиц титана в искровом разряде. Исследована термическая и лазерная модификация наночастиц для достижения требуемой морфологии. Выявлена зависимость размеров наночастиц от температуры и энергии импульса излучения. Получены наночастицы, обеспечивающие стабильное нанесение в среде динамического вакуума.
Ключевые слова: сухая аэрозольная печать; наночастицы титана; геттеры; импульсный газовый разряд.

Obtaining and controlling the morphology of titanium nanoparticles for the formation of getters by dry aerosol printing

Dolgov V. A., Svirelkin G. M., Kornyshin D. V., Borisov V. I., Ivanov M. S., Alyoshina M. Yu., Voroshilova V. A., Vershinina O. V., Ivanov V. V.
Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

The process of synthesis of titanium nanoparticles in a spark discharge was studied. Thermal and laser modification of nanoparticles has been studied to achieve the required morphology. The dependence of the nanoparticle sizes on the temperature and energy of the radiation pulse has been revealed. Nanoparticles have been obtained that provide stable deposition in a dynamic vacuum environment.
Keywords: dry aerosol printing; titanium nanoparticles; getters; pulsed gas discharge.

В настоящее время в микроэлектронике широкое распространение находит технология флип-чип-бондирования, обеспечивающая ряд преимуществ перед технологией разварки проволокой, в том числе в корпусировании микроэлектромеханических схем (МЭМС). Применение данной технологии для МЭМС создает необходимость изготовления газопоглощающих структур (геттеров), обеспечивающих требуемую степень вакуума в корпусируемом объеме [1]. Наиболее распространенной технологией формирования таких структур является магнетронное нанесение пленок титана и циркония микронной толщины. Тем не менее метод нанесения геттеров посредством сухой аэрозольной печати демонстрирует ряд преимуществ как перед магнетронным напылением, так и перед формированием слоев наночастиц печатью функциональными чернилами. Сферическая или дендритопободная морфология наночастиц обеспечивает возможность формирования структуры значительно меньшего объема при той же площади поверхности, определяющей возможности газопоглощения. В сравнении с методами чернильной

печати отсутствует необходимость очистки получаемых структур от вспомогательных компонентов чернил. Таким образом, сухая аэрозольная печать –перспективный метод для формирования геттеров в флип-чип-бондировании.

В рамках настоящей работы исследовались синтез и модификация наночастиц титана высокой чистоты для формирования геттеров. Синтез наночастиц осуществлялся в газоразрядной ячейке (рис. 1) принтера сухой аэрозольной печати в импульсном газовом разряде. Применялась конфигурация из двух соосных трубчатых электродов диаметром 8 мм и толщиной стенки 1 мм. Разряд осуществлялся в среде высокочистого (99,9999 %) аргона, также выполнявшего функцию транспорта наночастиц.

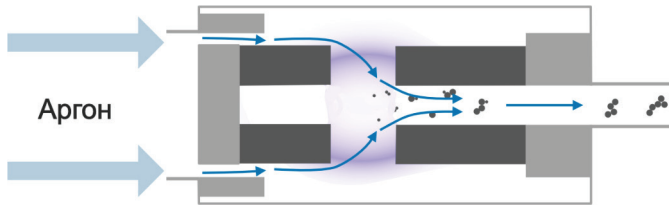


Рис. 1. Газоразрядная ячейка

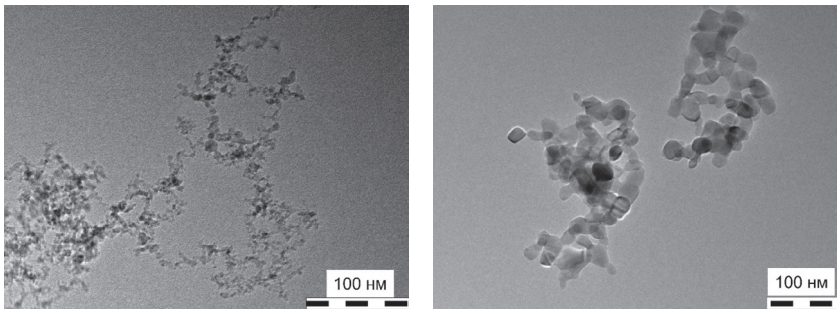
Первичные наночастицы размером 5–20 нм образуют вследствие высокой температуры несущего газа агломераты дендритоподобной формы, имеющие размер 150–400 нм и более. Для получения квазисферических наночастиц или дендритоподобных наночастиц меньшего размера применялся процесс модификации. В случае термической модификации наночастиц применялась трубчатая газоплотная печь с длиной горячей зоны 300 мм и внутренним диаметром газовой трубки 10 мм. Максимальная рабочая температура печи составляла 985 °C. Для лазерной модификации применялась система лазерного оптимизатора, состоящая из камеры, представляющей собой трубку длиной 200 мм и внутренним диаметром 3 мм, с кварцевыми окнами на торцах, а также импульсного твердотельного лазера *CNI DPS-1064* с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса порядка 3,6 нс и энергией импульса до 4 мДж при частоте 50 Гц. Вследствие высокой температуры в печи или локального разогрева наночастиц лазерным импульсом происходило частичное или полное спекание агломератов наночастиц.

Измерение размеров наночастиц осуществлялось при помощи анализатора дифференциальной электрической подвижности *TSI SMPS 3776*, а также путем сбора на медные сетки и анализа при помощи просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) *JEOL JEM-2100*. Наночастицы собирались после прохождения всего газового тракта и сопла принтера сухой аэрозольной печати для достижения наилучшей репрезентативности измерений.

Путем термической модификации получены дендритоподобные наночастицы, являющиеся стадией частичной оптимизации агломератов наночастиц (рис. 2*б*). При этом соотношение размеров агломератов и частично оптимизированных наночастиц позволяет установить протекание вторичной агломерации наночастиц.

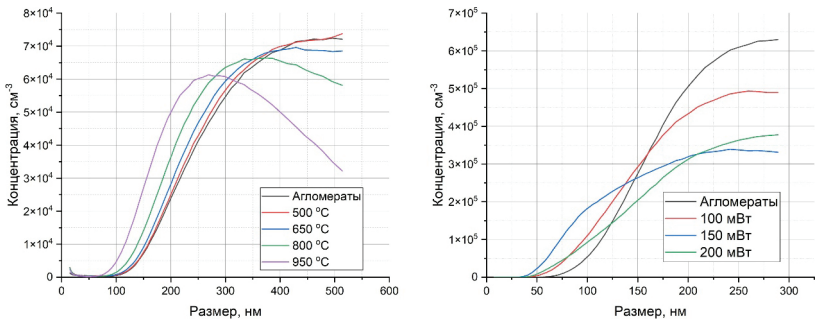
Наиболее значимыми технологическими ограничениями процесса термической модификации были как максимальная рабочая температура печи, так

и явление вторичной агломерации оптимизированных наночастиц, наблюдаемое даже на частично оптимизированной стадии. Избежать этого позволяет метод лазерной оптимизации, при котором практически не происходит разогрева несущего газа. Исследовалась морфология наночастиц при различных энергиях импульса лазерного излучения, что позволило отследить эволюционный процесс изменения морфологии наночастиц титана. Была выявлена зависимость спектра распределения концентраций по размерам наночастиц от температуры печи и энергии импульса лазерного излучения (рис. 3).



а *б*

Рис. 2. ПЭМ-снимки: *а*) агломератов наночастиц титана; *б*) частично оптимизированных наночастиц



а *б*

Рис. 3. Распределение концентраций наночастиц по размерам: *а*) в зависимости от температуры в печи; *б*) в зависимости от энергии импульса лазерного излучения

Таким образом, несмотря на простоту системы термической модификации наночастиц, процесс обработки лазерным излучением показал ряд преимуществ, определяющих выбор его в качестве основного метода модификации наночастиц. Были получены наночастицы с морфологией, подходящей для нанесения газопоглощающих структур, и подтверждена применимость метода сухой аэрозольной печати.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Разработка технологий корпусирования фотодетекторов и МЭМС-устройств») в рамках дополнительного соглашения от 07 апреля 2026 года № 075-15-2025-608/5.

Литература

1. Chuntonov K., Setina J. Reactive getters for MEMS applications // Vacuum, 2016. Vol. 123. P. 42–48. ISSN 0042-207X. URL: https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.10.012.
2. Heidary A. Moghadam et al. Development of a nanostructured Zr3Co intermetallic getter powder with enhanced pumping characteristics // Intermetallics, 2015. Vol. 57. P. 51–59. ISSN 0966-9795. URL: https://doi.org/10.1016/j.intermet.2014.10.003.

УДК 621.315.592.4, 621.315.592.9, 544.772.3

Формирование полупроводникового канала на основе оксида InGaZn методом аэрозольной печати

Торгунаков В. Г.[1,2], Масленников Д. В.[2], Егельский И. В.[2], Лабутов Д. А.[2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
torgunakov.vg@phystech.edu, maslennikov.dmitrii.v@mipt.ru, ive1996@yandex.ru, labutov.da@mipt.ru

Исследовано влияние термической постобработки (атмосфера отжига: воздух или Ar + 5% H_2; число стадий синтеза) и толщины канала на характеристики транзисторных структур с каналом из оксида InGaZn, сформированным аэрозольной чернильной печатью из истинного раствора нитратов.
Ключевые слова: аэрозольная печать; чернила на основе истинного раствора нитратов; полупроводниковый канал; транзисторная структура; гибридная печать.

Formation of an InGaZn-oxide semiconductor channel by aerosol jet printing

Torgunakov V. G.[1,2], Maslennikov D. V.[2], Egelskii I. V.[2], Labutov D. A.[2]
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[2] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
torgunakov.vg@phystech.edu, maslennikov.dmitrii.v@mipt.ru, ive1996@yandex.ru, labutov.da@mipt.ru

The effect of thermal post-treatment conditions: the annealing atmosphere (air or Ar + 5% H_2) and the amount of synthesis stages (single- and multi-stage thermal treatment) and the channel thickness influence on the characteristics of transistor structures with an InGaZn-oxide semiconductor channel formed by aerosol inkjet printing from a nitrate solution was studied. Characterization was carried out on bottom-gate structures with silver-nanoparticle source and drain electrodes deposited over the channel by dry aerosol printing. It was established that annealing in the air and a multi-stage thermal treatment provide the best characteristics: a field-effect electron mobility of up to 0.69 $cm^2/(V{\cdot}s)$ and an on/off current ratio of up to 10^4, while the channel thickness directly affects the operating mode of the structure: with increasing thickness the structure behaves as a resistor.
Keywords: aerosol jet printing; true-nitrate-solution-based ink; semiconductor channel; transistor structure; hybrid printing.

Печатная электроника открывает путь к экономичному производству гибких устройств с меньшими, чем при фотолитографии, энергозатратами и объемом отходов, а также допускает работу с широким спектром материалов, включая полупроводниковые [1]. Одним из перспективных среди них является оксид индия-галлия-цинка InGaZnO (IGZO), выделяющийся высокой подвижностью носителей (более 10 $см^2/(В·с)$), широкой запрещенной зоной (~3,0 эВ) и стабильной проводимостью *n*-типа, обусловленной кислородными вакансиями [2].

Тонкопленочные транзисторы (TFT) на основе IGZO применяются в дисплеях и сенсорах [3], однако классическая технология их формирования вакуумным нанесением несовместима с гибкими подложками, что повышает интерес к аддитивным методам. Для формирования TFT уже используется струйная печать [4], но для однородных по толщине слоев более подходит аэрозольная чернильная печать, в которой непрерывный аэрозольный поток обеспечивает равномерное покрытие в отличие от дискретных капель [5]. Дополнительным преимуществом аддитивного подхода является безмасочное формирование электродов стока и истока непосредственно поверх полупроводникового слоя в структуре *bottom-gate*, тогда как фотолитография требует изготовления масок под каждую топологию [6].

Сочетание аэрозольной чернильной печати (АЧП) и сухой аэрозольной печати (САП) перспективно для безмасочного формирования транзисторных структур, однако его реализация ограничена отсутствием отработанных режимов. В настоящей работе исследуется влияние условий термической постобработки на характеристики транзисторных структур с каналом из оксида InGaZn, сформированным методом аэрозольной чернильной печати.

Экспериментальная часть: формирование гибридных транзисторных структур

Изготовление транзисторных структур состояло из трех этапов:

1) формирование электрода затвора методом литографии;

2) аэрозольная чернильная печать полупроводникового канала IGZO;

3) сухая аэрозольная печать электродов стока и истока.

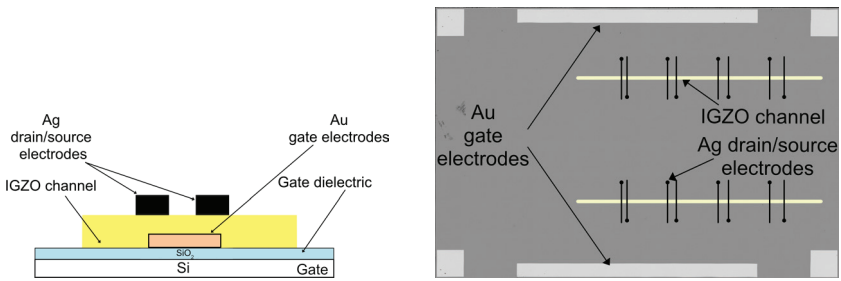
С применением технологии аэрозольной чернильной печати на поверхности слоя изолятора SiO_2 формировался полупроводниковый канал. Печать происходила с помощью аэрозольного принтера собственной разработки МФТИ, оборудованного пневматической системой генерации аэрозоля. Однородность напечатанного канала определяются совокупностью параметров аэрозольной печати: массовыми расходами аэрозоля Q_a, фокусирующего Q_{sh} и отводящего Q_e газов, температурой стола T, а также диаметром выходного отверстия сопла d, расстоянием между ним и поверхностью подложки h, относительной скоростью перемещения сопла и подложки v. Увеличение скорости приводило к уменьшению толщины наносимого слоя, а снижение –к увеличению. Оптимальные значения параметров, подобранные для печати чернилами из раствора нитратов, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Оптимизированные параметры аэрозольной чернильной печати

$Q_a/Q_e/Q_{sh}$, н. мл/мин	v, мм/мин	T, °C	d, мкм	h, мм
570/483/13	30	40	115	4

Типичная толщина канала составляла около 70 нм; варьированием скорости печати дополнительно получены слои толщиной 44 и 104 нм, что

позволило исследовать влияние толщины на режим работы структуры. В качестве чернил использовался истинный раствор нитратов индия $In(NO_3)_3 \cdot xH_2O$, галлия $Ga(NO_3)_3 \cdot xH_2O$ и цинка $Zn(NO_3)_3 \cdot xH_2O$ в соотношении, обеспечивающем состав $In_{6,5}Ga_{1,5}Zn_2O_{14}$. После нанесения проводился поверхностный синтез IGZO термическим разложением через стадии дегидратации, денитрации и окисления с выделением оксидов азота и образованием оксидной фазы (In_2O_3, Ga_2O_3, ZnO). Электроды стока и истока формировались методом сухой аэрозольной печати из наночастиц серебра непосредственно поверх полупроводникового слоя. Схематическое изображение формируемых гибридных транзисторных структур представлено на рис. 1.



а *б*

Рис. 1. Схематическое изображение формируемых транзисторных структур типа *bottom-gate*: *а*) поперечное сечение; *б*) общий вид

Для определения условий, обеспечивающих наилучшие электрофизические характеристики, варьировались атмосфера и температурный режим, при которых проводилась термическая обработка образцов. В качестве атмосферы отжига использовались воздух и восстановительная смесь Ar + 5 % H_2, что позволило оценить влияние среды отжига на свойства синтезируемого IGZO. Помимо атмосферы, исследовалось влияние режима поверхностного синтеза: сопоставлялись одноступенчатый отжиг при 400 °C и многоступенчатый, включающий предварительную сушку при 160 °C для удаления растворителя с последующим отжигом при 400 °C для более полного разложения нитратов.

Характеризация полученных структур

Все полученные структуры демонстрировали полевое управление током канала, характерное для транзисторов *n*-типа. По серии достигнуты значения отношения токов включения-выключения ION/IOFF до $1{,}5 \cdot 10^4$ и подвижности носителей заряда до 0,69 $см^2/(В \cdot с)$. На рис. 3 представлены передаточные характеристики транзисторных структур (зависимость тока стока от напряжения на затворе при напряжении сток-исток, равном 20 В), полученных при различных: *а*) атмосферах отжига, *б*) режимах термообработки, *в*) толщинах полупроводниковых каналов (44 и 104 нм).

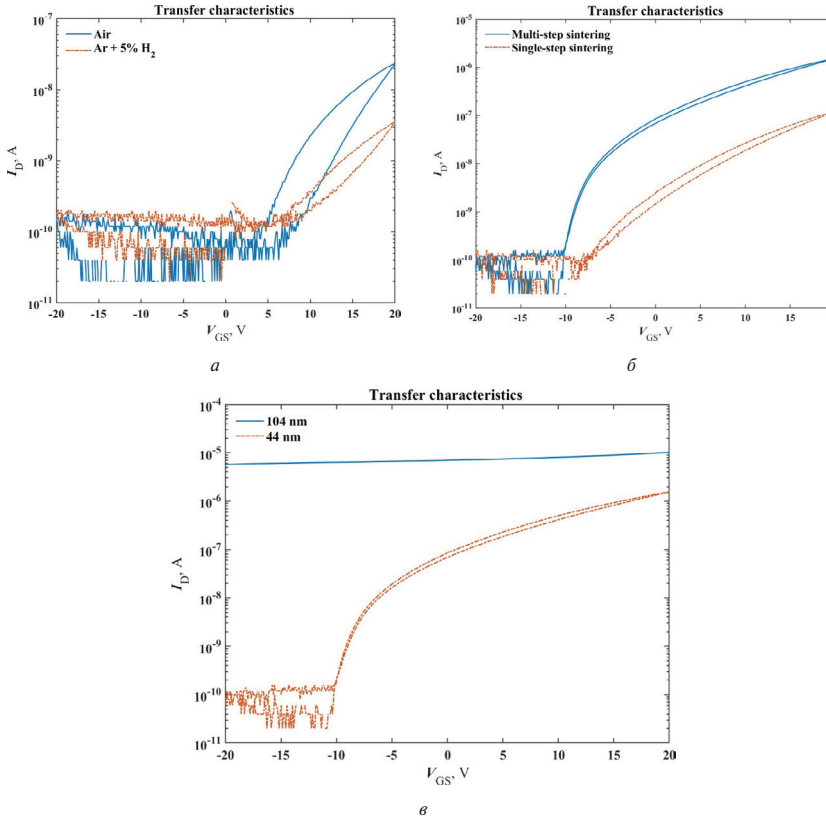


Рис. 3. Переходные характеристики полученных транзисторных структур при различных: *а*) атмосферах отжига; *б*) режимах термообработки; *в*) толщинах полупроводниковых каналов (44 и 104 нм)

Сводные характеристики исследованных транзисторных структур приведены в табл. 3.

Образцы различаются атмосферой и режимом термообработки полупроводникового слоя, а также толщиной канала, что позволяет оценить вклад каждого из этих факторов в электрофизические параметры транзисторов. Для всех образцов толщина затворного диэлектрика SiO_2 составляла 100 нм, а серебряные электроды стока и истока формировались поверх полупроводникового слоя.

Таблица 3. Характеристики исследованных гибридных транзисторных структур с каналом IGZO

№	Атмосфера отжига	Режим термообработки	I_{ON}/I_{OFF}		μ макс., $см^2/(В·с)$
			макс.	средн.	
1	Ar + 5% H_2	Одноступенчатый	$1{,}0 \cdot 10^2$	$3{,}1 \cdot 10^1$	$2{,}3 \cdot 10^{-3}$
2	воздух	Одноступенчатый	$1{,}0 \cdot 10^4$	$4{,}0 \cdot 10^3$	$5{,}9 \cdot 10^{-3}$
3	воздух	Одноступенчатый	$1{,}6 \cdot 10^3$	$1{,}2 \cdot 10^3$	$5{,}6 \cdot 10^{-2}$
4	воздух	Многоступенчатый	$1{,}0 \cdot 10^4$	$6{,}4 \cdot 10^3$	$4{,}3 \cdot 10^{-1}$
5	воздух	Многоступенчатый	$1{,}0 \cdot 10^1$	$1{,}0 \cdot 10^1$	$3{,}1 \cdot 10^{-1}$
6	воздух	Многоступенчатый	$1{,}5 \cdot 10^4$	$3{,}9 \cdot 10^3$	$6{,}9 \cdot 10^{-1}$

Выводы

Продемонстрирована возможность формирования полупроводникового канала IGZO методом аэрозольной чернильной печати из истинного раствора нитратов. На основе данного подхода получены работоспособные гибридные тонкопленочные структуры типа *bottom-gate* с электродами стока и истока из наночастиц серебра, сформированными сухой аэрозольной печатью поверх канала. Установлено, что отжиг на воздухе и многоступенчатый режим обеспечивают наилучшие электрофизические характеристики, а толщина канала определяет режим работы структуры: при 44 нм реализуется транзисторное поведение, при 104 нм канал не запирается и проявляет резисторный характер. Достигнуты отношение токов до $1{,}56 \cdot 10^4$ и подвижность носителей до 0,69 $см^2/(В·с)$. Результаты подтверждают перспективность гибридного подхода для создания элементной базы печатной микроэлектроники.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: идентификатор проекта FSMG-2025-0056 в части формирования и характеризации получаемых структур; соглашение № 075-15-2024-560 в части разработки топологии итоговых структур.

Литература

1. Горнев Е. С. Обеспечение надежности современных интегральных микросхем. Часть 1. Принципы обеспечения качества и надежности в промышленной технологии производства ИС // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2020. — № 3. — С. 52–68.
2. Kazarkin B. A., Stepanov A. A., Mukha Y. U., Zakharchenia I. I., Khakhlou Y. A., Smirnov A. G. Thin-film transistors with InGaZnO semiconductor layer for active-matrix addressing // Doklady BGUIR, 2019. Vol. 125. № 7. P. 101. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-125-7-101-106.
3. Han Y. et al. IGZO-based electronic device application: Advancements in gas sensor, logic circuit, biosensor, neuromorphic device, and photodetector technologies // Micromachines, 2025. Vol. 16. № 2. P. 118.F. DOI: https://doi.org/10.3390/mi16020118.

4. Magnarin L., Breitung B., Aghassi-Hagmann J. A Comprehensive Guide to Fully Inkjet-Printed IGZO Transistors // Advanced Electronic Materials, 2025. Vol. 11. № 4. P. 2400478. DOI: 10.1002/aelm.202400478.
5. Mahajan A., Frisbie C. D., Francis L. F. Optimization of aerosol jet printing for high-resolution, high-aspect ratio silver lines // ACS applied materials & interfaces, 2013. Vol. 5. № 11. P. 4856–4864. DOI: 10.1021/am400606y
6. Khabarov K. et al. The influence of laser sintering modes on the conductivity and microstructure of silver nanoparticle arrays formed by dry aerosol printing // Applied Sciences, 2019. Vol. 10. № 1. P. 246. DOI: 10.3390/app10010246.

УДК 621.383

Оптоэлектронные приборы мостиковой конструкции на основе соединений A^3B^5: особенности технологии создания

Пивоварова А. А., к. ф.-м. н., Куницына Е. В., к. ф.-м. н., Андреев И. А., к. ф.-м. н., Ильинская Н. Д., д. ф.-м. н., Яковлев Ю. П.
ФТИ им. А. Ф. Иоффе
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Разработана технология создания оптоэлектронных приборов мостиковой конструкции. Применение предлагаемой технологии привело к уменьшению разброса параметров приборов по пластине. Подавление металл-стимулированного травления позволяет изготавливать приборы мостиковой конструкции на любых соединениях A^3B^5 независимо от используемого материала, травителя и кристаллографической ориентации структуры.
Ключевые слова: мостиковая конструкция; металл-стимулированное травление.

Optoelectronic devices of bridge design based on A^3B^5 compounds: features of the fabrication technology

Pivovarova A. A., Ph.D, Kunitsyna E. V., Ph.D, Andreev I. A., Ph.D, Ilinskaya N. D., Ph.D, Yakovlev Yu. P.
Ioffe Institute
26 Politekhnicheskaya St., Staint Petersburg, 194021, Russia

A technology for fabricating bridge-type optoelectronic devices has been developed. The application of the proposed technology has led to a reduction in the spread of device parameters across the wafer. Suppression of metal-stimulated etching enables the fabrication of bridge-type devices on any A^3B^5 compounds, regardless of the material, etchant, or crystallographic orientation of the structure used.
Keywords: bridge-based design; metal-assisted etching.

На сегодняшний день разработка оптоэлектронных приборов на основе соединений A^3B^5 остается актуальной задачей. Так, развитие полупроводниковых лазеров в ближней и средней ИК-области спектра приводит к необходимости разработки фотодиодов, способных регистрировать когерентное излучение с пикосекундной длительностью импульса.

Одним из перспективных решений для создания оптоэлектронных приборов малых размеров (менее 100 мкм) является использование мостиковой конструкции. В данной работе представлена разработанная технология создания таких приборов на основе соединений A^3B^5 [1]. Такая конструкция представляет собой две отдельно стоящие мезаструктуры с перекинутым между ними воздушным металлическим контактом, при этом контактная площадка для сборки выведена на отдельно стоящую изолированную диэлектриком опорную мезу. Протрав под металлической балкой обеспечивает электрическую изоляцию слоев структуры между рабочей и опорной мезами. Формирование воздушного тоннеля под металлическим мостиком обеспечивается за счет латерального травления. Показано, что подавление металл-стимулированного травления позволяет изготавливать приборы мостиковой

конструкции на любых соединениях A^3B^5 независимо от используемого материала, травителя и кристаллографической ориентации структуры.

Разработанная технология создания приборов мостиковой конструкции позволяет изготавливать рабочую и опорную мезу, а также контактную площадку любых необходимых размеров. Так, для фотодиодов применение данной конструкции позволяет увеличить быстродействие за счет уменьшения площади фоточувствительной мезы и, соответственно, общей емкости прибора [2], снизить темновой ток [3], а также уменьшить разброс параметров по пластине от прибора к прибору. Также разработанная технология позволяет создавать микролазеры с квантовыми точками на подложках GaAs с дисковым резонатором [4]. Предложенный метод открывает пути для изготовления инжекционных микролазеров малого диаметра, поскольку исключает необходимость прикрепления электрического провода к верхней поверхности резонатора микролазера.

Литература

1. Ильинская Н.Д., Пивоварова А.А., Куницына Е.В., Андреев И.А., Яковлев Ю.П. Полупроводниковый фотодиод для инфракрасного излучения / Пат. № 221645, Российская Федерация, приоритет изобретения 01 сентября 2023 г.
2. Малевская А.В., Калюжный Н.А., Ильинская Н.Д., Солдатенков Ф.Ю., Пивоварова А.А. и др. Контактные системы «мостикового» типа в InGaAs/InP фотоэлектрических преобразователях // ЖТФ, 2026. — Т. 96. — № 2. — С. 345–350.
3. Пивоварова А.А., Куницына Е.В. и др. Мостиковые InAs/InAsSbP-фотодиоды: особенности технологии создания // ФТП, 2025. — Т. 59. — № 8. — С. 505–509.
4. Образцова А.А., Пивоварова А.А. и др. Микродисковые лазеры с вынесенной контактной площадкой мостиковой конструкции, сформированные жидкостным химическим травлением // ФТП, 2025. — Т. 59. — № 1. — С. 37–42.

УДК 621.793.14

Разработка режима осаждения пленок ITO методом электронно-лучевого испарения для снижения нагрева иона в высокочастотных ионных ловушках

Кузнецова А. Д., Шишкин А. В., Аббасов Т. С., Габидуллин А. Р., Денисов А. А.
Сколковский институт науки и технологий,
Центр исследовательской инфраструктуры
121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково»,
Большой б-р, 30, стр. 1
A.Kuznetsova@skoltech.ru

Исследование направлено на снижение нагрева иона в планарной ионной ловушке фотонной интегральной схемы, вызванного флуктуациями электрического поля из-за диэлектрических потерь. В работе применяется прозрачное проводящее покрытие ITO с заданными требованиями, наносимое электронно-лучевым испарением (ЭЛИ).
Ключевые слова: ионная ловушка; фотонная интегральная схема; дифракционные решетки; оксид индия-олова; электронно-лучевое испарение.

Development of an ITO film deposition mode by electron-beam evaporation for reducing ion heating in radio-frequency ion traps

Kuznetsova A. D., Shishkin A. V., Abbasov T. S., Gabidullin A. R., Denisov A. A.
Research Facilities Center,
Skolkovo Institute of Science and Technology
30 Bolshoy Blvd., Bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russia
A.Kuznetsova@skoltech.ru

This study aims to reduce ion heating in a planar ion trap of a photonic integrated circuit, induced by electric field fluctuations due to dielectric losses. A transparent conductive ITO coating meeting specified requirements is deposited by electron-beam evaporation (EBE).
Keywords: ion trap; photonic integrated circuit; diffraction gratings; indium tin oxide; electron-beam evaporation.

Современная квантовая сенсорика развивается по нескольким ключевым направлениям, среди которых могут быть выделены, например, оптические стандарты частоты, обеспечивающие значительный выигрыш в стабильности частоты [1], и квантовая гравиметрия, использующие индуцированное излучение единичного иона. Реализация таких систем стала возможной благодаря ионным ловушкам — устройствам для трехмерного удержания заряженных частиц с помощью электромагнитных полей. Классические объемные ловушки Пауля и Пеннинга обеспечивают удержание единичных ионов в сверхвысоком вакууме при лазерном охлаждении [2].

Актуальными направлениями развития ионных ловушек являются их миниатюризация и переход от громоздких объемно-оптических систем к планарному исполнению. Это стало возможным благодаря использованию ловушек с плоскими

электродами, которые обеспечивают оптический доступ к иону, удерживаемому над поверхностью [3]. Дальнейшая миниатюризация планарной ионной ловушки возможна при ее интеграции в фотонную интегральную схему (ФИС) и использовании дифракционных решеток. Опыт одной из первых успешных интеграций продемонстрировала американская лаборатория *Sandia*, осуществив захват и детектирование иона с использованием встроенных фотонных компонентов [4].

Одной из проблем, актуальных для решения при создании ионной ловушки на ФИС, остается проблема стабильного удержания иона вблизи поверхности плоских электродов. В такой конструкции часть поверхности ионной ловушки, открытая для воздействия электрического поля иона, покрыта диэлектриком (как правило, оксидом кремния). Из-за его наличия вблизи иона возникают флуктуации электрического поля, обусловленные диэлектрическими потерями, что приводит к нагреву иона и может вызвать его уход из зоны удержания [5]. Решением описанной проблемы может быть использование токопроводящего прозрачного покрытия на основе пленки оксида индия-олова (Indium tin oxide –ITO) поверх диэлектрического слоя.

Свойства пленки ITO зависят от метода осаждения, технологических параметров процесса осаждения, наличия и параметров ионного ассистирования, а также отжига [6]. Исходя из функционального назначения пленки ITO в ионных ловушках, необходимо получить как можно больший коэффициент пропускания пленки для излучения на длинах волны 369 и 935 нм. Также необходимо получить ее возможно большую проводимость.

Одним из методов формирования пленки ITO является электронно-лучевое испарение (ЭЛИ). Оптические и электрические свойства ITO, полученного методом ЭЛИ, чувствительны к параметрам осаждения [7]. В процессе испарения сложносоставного материала, такого как ITO, происходит изменение стехиометрического состава пленки по сравнению с исходным материалом из-за разной температуры испарения компонентов. С одной стороны, это затрудняет прогнозирование стехиометрии получаемой пленки, а с другой — позволяет менять ее свойства в широком диапазоне за счет варьирования технологических параметров.

В докладе представлен процесс разработки режима осаждения пленки ITO методом ЭЛИ, соответствующего сформулированным требованиям. В процессе осаждения варьировались следующие параметры: парциальное давление кислорода (необходимое для восполнения кислородных вакансий, образующихся при диссоциации оксида индия), температура подложки и мощность ионного источника. Контроль свойств пленок осуществлялся с помощью следующих методов: удельное поверхностное сопротивление измерялось четырехзондовым методом, коэффициент пропускания определялся на спектрофотометре, структура пленки исследовалась на растровом электронном микроскопе, а химический состав — на просвечивающем электронном микроскопе.

В ходе работы были сформулированы требования к пленке ITO как к прозрачному проводящему покрытию для планарных ионных ловушек, а также определен и экспериментально отработан режим ее осаждения методом ЭЛИ. Были изготовлены ионные ловушки с фокусирующими дифракционными решетками, обеспечивающими фокусировку на высоте 200–210 мкм над поверхностью чипа [8]. Дальнейшие шаги включают интеграцию полученной пленки ITO в структуру ловушки для экспериментальной оценки снижения нагрева иона.

Литература

1. Gill P. Optical frequency standards // Metrologia, 2005. Vol. 42. № 3. P. S125–S137.
2. Kluge H. J., Bollen G. Ion traps—recent applications and developments // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1992. Vol. 70. № 1-4. P. 473–481.
3. Abbasov T., Zibrov S., Sherstov I. Surface-electrode ion trap development // JETP Letters, 2023. Vol. 118. № 3. P. 215–219.
4. Kwon J., Setzer W. J., Gehl M., Karl N., Van Der Wall J., Law R., Blain M. G., Stick D., McGuinness H. J. Multi-site integrated optical addressing of trapped ions // Nature Communications, 2024. Vol. 15. № 1.
5. Teller M. et al. Heating of a trapped ion induced by dielectric materials // Physical Review Letters, 2021. Vol. 126. № 23. P. 230505.
6. Inritsapong Y., Chindaudom P., Nuntawong N., Patthanasettakul V., Horprathum M., Eiamchai P., Pokaipisit A., Limsuwan P. Post-annealing effects on the structural, optical and electrical properties of ITO films studied by spectroscopic ellipsometry // Surface Review and Letters, 2010. Vol. 17. № 5–6. P. 595–605.
7. Yamaguchi M. et al. Characteristics of indium tin oxide thin films prepared using electron beam evaporation // Thin solid films, 2004. Vol. 447. P. 115–118.
8. Abbasov T. et al. Focusing grating coupler for the generation of quantum sensors // Optics Express, 2025. Vol. 33. № 14. P. 29308–29321.

УДК [537.533.35+620.187.3]:621.923

Электронно-микроскопический анализ конструкции кристаллов силовых транзисторов SiC MOSFET

Киреев Г. С., Волков Р. Л., к. ф.-м. н., Боргардт Н. И., д. ф.-м. н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
g.s.kireev@ya.ru, r.l.volkov@org.miet.ru, borgardt@miee.ru

Продемонстрированы возможности методов растровой и просвечивающей электронной микроскопии для комплексного исследования кристаллов SiC MOSFET. Установлен оптимальный способ приготовления поперечных сечений кристаллов. В ходе изучения образца транзистора выявлены его конструктивные особенности, определены толщины слоев, визуализированы области легирования *p*- и *n*-типов.
Ключевые слова: кристаллы SiC MOSFET; диагностика микросхем; электронная микроскопия; толщины слоев; визуализация областей легирования.

Electron microscopic analysis of the crystal design of SiC MOSFET power transistors

Kireev G. S., Volkov R. L., Ph.D, Borgardt N. I., Sc.D
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
g.s.kireev@ya.ru, r.l.volkov@org.miet.ru, borgardt@miee.ru

In this study, we demonstrate the capabilities of scanning and transmission electron microscopy techniques for the complex investigation of SiC MOSFET crystal design. An optimal method for preparing crystal cross-sections was established. The study of a transistor sample revealed its design features, layer thicknesses and compositions, as well as the distribution of impurities.
Keywords: SiC MOSFET; circuit diagnostics; cross-section; electron microscopy; layer thickness; distribution of impurities.

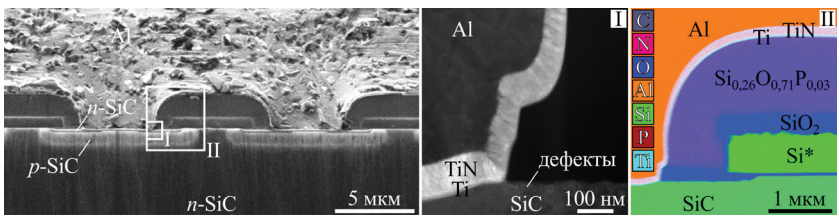
В современных силовых источниках питания, инверторах, преобразователях частоты и системах быстрой зарядки электромобилей используются высоковольтные МОП-транзисторы (MOSFET) на основе карбида кремния (SiC). Подложки такого типа обладают уникальными физическими свойствами –высокой теплопроводностью и широкой запрещенной зоной. Благодаря этому полупроводниковые приборы на основе SiC имеют ряд преимуществ перед традиционными кремниевыми аналогами: высокое напряжение пробоя, низкое сопротивление, высокие энергоэффективность и скорость переключения, а также стабильность характеристик [1].

Анализ конструкции таких приборов является важным как на этапе проектирования, так и при отладке и контроле технологического процесса. Наиболее информативными являются исследования поперечных сечений кристаллов электронно-микроскопическими методами. В настоящей работе продемонстрирован подход к проведению таких исследований на примере коммерческого образца SiC MOSFET.

На кристалле транзистора с помощью шлифовально-полировальной установки и регулируемого держателя образца (трипода) был приготовлен поперечный шлиф, который затем обрабатывался пучками ионов аргона в системе *Gatan 691 PIPS* для сглаживания наноразмерных царапин. Исследование проводилось методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и фокусированного ионного пучка (ФИП) на приборах *Axia ChemiSEM* и *Helios NanoLab 650*. Активная область кристалла изучалась более подробно методами просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ) и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (РМА) на приборе *Titan Themis 200*. Тонкая фольга для такого исследования приготавливалась при помощи ФИП методом *in situ lift-out* [2].

В работе апробированы два способа приготовления поперечных шлифов кристаллов с помощью алмазных абразивов: на ворсистых суконных и на плоских пленочных шлифовальных дисках. К недостаткам первого способа относятся скругление края кристалла на стороне подложки и искажение формы верхней границы слоя алюминия на лицевой стороне. Второй подход обеспечивает более ровную поверхность шлифа без скругления, однако он может приводить к частичному отрыву алюминия в некоторых участках, поэтому в работе конструкция кристалла исследовалась на шлифе, приготовленном первым способом. На заключительном этапе механической обработки проводилась финишная полировка на сукне с помощью суспензии кремниевого абразива.

Исследования методами РЭМ и ФИП позволили визуализировать общий вид поперечного сечения кристалла, выявить конструктивные особенности его активной области, области периферии и области контактной площадки. Измерены протяженности ячеек в активной области (рис. 1*а*), расстояния между ними и толщины их диэлектрических и металлических слоев. Методом РЭМ визуализированы области легирования *p*- и *n*-типов, определена их форма и оценены глубины залегания. Выявлено, что РЭМ-изображения, полученные при ускоряющих напряжениях до 2 кВ, оптимальны для визуализации нижней границы *p*-области в подложке SiC.



а *б* *в*

Рис. 1. РЭМ-изображение поперечного сечения кристалла в активной области с отмеченными областями I и II (*а*); ПРЭМ-изображение области I (*б*); карта распределения химических элементов в области II (*в*)

Методом ПРЭМ при ускоряющем напряжении 200 кВ получены изображения слоев ячейки в активной области кристалла с более высоким пространственным разрешением (рис. 1*б*), что позволило точнее измерить их геометрические параметры, в том числе наноразмерные вариации их толщин. Методом РМА изучено распределение химических элементов (рис. 1*в*) и количественно определен состав

слоев. Выявлено, что нижняя часть барьерного слоя состоит из титана, а верхняя – из TiN. В боковых частях ячейки обнаружены дефекты подложки, образовавшиеся, вероятно, при имплантации атомов примеси.

Таким образом, в работе на примере транзистора SiC MOSFET показан подход к комплексному анализу конструкции кристаллов в поперечных сечениях методами ФИП, РЭМ, ПРЭМ и РМА, включающий измерение геометрических параметров элементов, визуализацию областей легирования и определение состава слоев.

Литература

1. Langpoklakpam C., Liu A., Chu K. et al. Review of silicon carbide processing for power MOSFET // Crystals, 2022. Vol. 12. № 2. P. 245.
2. Tomus D., Ng H. P. In situ lift-out dedicated techniques using FIB–SEM system for TEM specimen preparation // Micron, 2013. Vol. 44. P. 115–119.

УДК 53.087.04: 621.793.1: 546.1/681

Исследование процесса карбонизации монокристаллического кремния с использованием этилена (C2H4) и монооксида углерода (CO)

Фролов Н. А.[1,3], Артюшенко М. Н.[1], Федотов С. Д.[1], Гращенко А. С.[2], Редьков А. В.[2], Кукушкин С. А.[2], Царик К. А.[1,3]
[1] АО «Эпиэл»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2
fedotov@epiel.ru
[2] Институт проблем машиноведения РАН
199178, г. Санкт-Петербург, В.О. Большой пр-т, 61
avredkov@gmail.com
[3] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
tsarik_kostya@mail.ru

В докладе отражены результаты разработки опытного процесса карбонизации монокристаллического кремния в целях получения однородного слоя кубического карбида кремния (3C-SiC). Исследование проводилось на промышленном эпитаксиальном реакторе на подложках кремния диаметром до 150 мм. Основной акцент был сделан на отработке режимов карбонизации с применением двух типов углеродных прекурсоров –этилена (C_2H_4) и монооксида углерода (CO). Полученные экспериментальные образцы гетероструктур 3C-SiC/Si могут быть использованы в качестве специальной промежуточной подложки (темплейта) для выращивания транзисторных гетероструктур Ga(Al)N/Si.
Ключевые слова: газофазная эпитаксия; ГФЭ; карбид кремния; SiC; 3C-SiC; нитрид галлия; GaN; кремний; Si; темплейт.

Research of the carbonization process of monocrystalline silicon using ethylene (C_2H_4) and carbon monoxide (CO)

Frolov N. A.[1,3], Artyushenko M. N.1, Fedotov S. D.1, Grashchenko A. S.2, Redkov A. V.2, Kukushkin S. A.2, Tsarik K. A.[1,3]
[1] Epiel, JSC
6/2 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460
fedotov@epiel.ru
[2] Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Science
61 Bolshoy Ave., V.O., St. Petersburg, 199178, Russia
avredkov@gmail.com
[3] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
tsarik_kostya@mail.ru

This paper presents the results of developing an experimental carbonization process for monocrystalline silicon aimed at obtaining a uniform layer of cubic silicon carbide (3C-SiC). The study was conducted in an industrial epitaxial reactor using silicon substrates with a diameter of up to 150 mm. The main focus was on optimizing the

carbonization conditions using two types of carbon precursors: ethylene (C_2H_4) and carbon monoxide (CO). The obtained experimental samples of 3C-SiC/Si heterostructures can be used as a special intermediate substrate (template) for growing transistor heterostructures Ga(Al)N/Si.

Keywords: vapor phase epitaxy; VPE; silicon carbide; SiC; 3C-SiC; gallium nitride; GaN; silicon; Si; template.

Применение буферного слоя карбида кремния кубического политипа (3C-SiC) в качестве промежуточного темплейта при гетероэпитаксии нитрида галлия на кремниевых подложках является одним из наиболее перспективных технологических решений для формирования высококачественных гетероструктур Ga(Al)N/Si [1–3]. К числу ключевых преимуществ данного подхода следует отнести:

- предотвращение растрескивания толстых эпитаксиальных слоев GaN при охлаждении вследствие лучшего согласования коэффициентов термического расширения (КТР GaN ≈ $5{,}6 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}, КТР 3C-SiC ≈ $4{,}5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} против КТР Si ≈ $2{,}6 \cdot 10^{-6}$ K^{-1});
- снижение плотности дефектов в эпитаксиальных слоях за счет уменьшения рассогласования параметров решеток (GaN/3C-SiC ≈ 3,4% против GaN/Si ≈ 17%);
- снижение паразитных высокочастотных потерь, характерных для кремниевых субстратов (блокирование эффекта автолегирования) [4–6].

Немаловажно, что структуры 3C-SiC/Si открывают возможность выращивания транзисторных гетероструктур на крупногабаритных подложках кремния диаметром 150–300 мм, тогда как монокристаллические подложки 4H-SiC аналогичного диаметра остаются технологически сложными и коммерчески дорогостоящими. Среди отечественных разработок выдающееся место занимают исследования коллектива ИПМаш РАН под руководством С.А. Кукушкина: ими предложен метод согласованного замещения атомов (метод Кукушкина — Осипова), позволяющий непосредственно преобразовывать приповерхностный слой монокристаллического кремния в эпитаксиальный 3C-SiC через топохимическую реакцию замещения кремния углеродом [7–8].

Основной акцент настоящего исследования сделан на оптимизации режимов стадии карбонизации –ключевого химического превращения, в ходе которого часть атомов кремниевой подложки замещается атомами углерода с формированием кубической фазы 3C-SiC. Скоординированный характер атомного замещения обеспечивает сохранение когерентности химических связей слоя и подложки (кристаллографического соответствия с подложкой). В серии экспериментов систематически варьировались температура синтеза, парциальное давление и расход углеродных прекурсоров двух типов –этилена (C_2H_4) и монооксида углерода (CO). Установлена зависимость плотности поверхностных дефектов от скорости роста наноразмерного карбидного слоя. Методами численного моделирования рассчитана зависимость скорости осаждения от соотношения C/Si в газовой фазе. Результаты моделирования были верифицированы экспериментально.

Полученные экспериментальные образцы темплейтов 3C-SiC/Si всесторонне охарактеризованы комплексом взаимодополняющих физических методов, включая эллипсометрию, профилометрию, электронографию (RHEED), оптическую микроскопию, сканирующую (СЭМ) и просвечивающую (ПЭМ) электронную

микроскопию. Выполнены измерения кривизны пластин –параметра, лимитирующего применимость темплейтов в промышленной литографии.

Литература

1. Yacoub H. et al. // Semicond. Sci. Technol., 2014. Vol. 29. P. 115012.
2. Chandrasekar H. et al. // IEEE Trans. Electron. Devices, 2019. Vol. 66. P. 1681.
3. Myronov M., Colston G. // Mater. Today Commun., 2024. Vol. 38. P. 108312.
4. Colston G. et al. // Mater. Des., 2016. Vol. 103. P. 244.
5. Jazizadeh B., Myronov M. // Sci. Rep., 2024. Vol. 14. P. 30325.
6. Berber F. et al. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 2017. 65. P. 1465 ().
7. Кукушкин С.А., Осипов А.В. // Журн. общ. химии, 2022. — Т. 92. — №4. — С. 547–577.
8. Kukushkin S.A., Osipov A.V., Redkov A.V. // Advanced Structured Materials, 2022. Vol. 18. P. 335–367.

УДК 621.3.032.1

Формирование и исследование функциональных характеристик низкотемпературных NEG-геттеров TiZrV для МЭМС-вакуумирования

Краюшкин В. П., Шайхулов Т. А., Спиридонов М. В., Коробкин Е. Н., Стариков П. А., Калмыков А. С., Коростылёв Е. В.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследованы TiZrV NEG-геттеры, полученные магнетронным осаждением для МЭМС-вакуумирования. Подобраны режимы осаждения и термоактивации; показано, что столбчатая морфология и микрорельеф подложки повышают сорбционные характеристики.
Ключевые слова: NEG-геттеры; TiZrV; МЭМС-вакуумирование; магнетронное осаждение; термоактивация; сорбционная емкость; скорость сорбции; столбчатая морфология; микрорельеф подложки; вакуумная упаковка.

Formation and Investigation of Functional Characteristics of Low-Temperature TiZrV NEG Getters for MEMS Vacuum Packaging

Krayushkin V. P., Shaykhulov T. A., Spiridonov M. V., Korobkin E. N., Starikov P. A., Kalmykov A. S., Korostylev E. V.
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

TiZrV NEG getters deposited by magnetron sputtering for MEMS vacuum packaging are investigated. Deposition and thermal activation regimes are selected; columnar morphology and substrate microrelief are shown to improve sorption characteristics.
Keywords: NEG getters; TiZrV; MEMS vacuum packaging; magnetron sputtering; thermal activation; sorption capacity; sorption rate; columnar morphology; substrate microrelief; vacuum packaging.

В данной работе проведено исследование и выполнен подбор параметров осаждения и режимов активации геттера на основе сплава TiZrV, обеспечивающих высокую скорость сорбции и сорбционную емкость. В качестве метода получения геттера использовалось магнетронное осаждение на кремниевые подложки. Исследуемыми параметрами, влияющими на характеристики геттера, являлись морфология и развитость пленки.

Неиспаряющиеся геттеры (non-evaporable getters –NEG) представляют собой твердые сорбционные материалы, связывающие остаточные газы за счет химического взаимодействия с активной поверхностью и тем самым обеспечивающие поддержание высокого вакуума [1]. Благодаря компактности и возможности интеграции непосредственно в вакуумный объем NEG-материалы широко используют как химические «насосы» в микроэлектромеханических системах (МЭМС), в том числе в технологиях вакуумной упаковки [2].

Содержание настоящей работы заключалось в установлении взаимосвязи между состоянием поверхности, режимом термоактивации и сорбционными характеристиками NEG-покрытий TiZrV. Нами исследованы и подобраны режимы термоактивации в вакууме, обеспечивающие восстановление химически активной поверхности и сорбционных свойств покрытия после контакта осажденных пленок с атмосферой. Отдельное внимание уделено выбору температур активации, совместимых с материалами и функциональными слоями МЭМС-устройств и с КМОП-технологией. Для решения этой задачи выбран нанокристаллический сплав TiZrV, представляющий особый интерес как NEG-материал с низкой температурой активации [1]. Параллельно исследовано влияние условий осаждения на морфологию покрытия, размер зерен и степень развитости поверхности, поскольку эти структурные параметры определяют доступность центров сорбции, скорость газопоглощения и сорбционную емкость пленок [1].

В ходе работы были получены TiZrV-геттеры и подобраны режимы осаждения, обеспечивающие формирование покрытий с развитой морфологией. Установлено, что сорбционные характеристики покрытий в значительной степени определяются их структурой. Наиболее высокую эффективность продемонстрировали пленки с выраженной столбчатой морфологией (рис. 1). Такая структура увеличивает доступную площадь сорбции и облегчает транспорт продуктов диссоциации газа вглубь пленки, что приводит к повышению как скорости сорбции, так и сорбционной емкости.

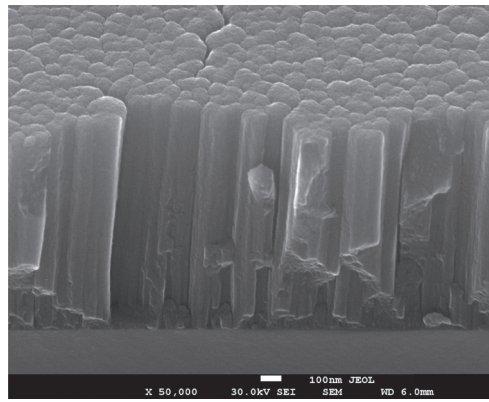


Рис. 1. Результаты РЭМ-исследования геттера TiZrV

В работе исследовано влияние предварительно сформированного микрорельефа подложки на морфологию и сорбционные характеристики геттера. Данный фактор рассматривался как один из способов повышения эффективности геттера за счет увеличения развитости поверхности и изменения условий роста пленки. Перед осаждением TiZrV на поверхности подложки был сформирован рельеф в виде периодического массива (рис. 2).

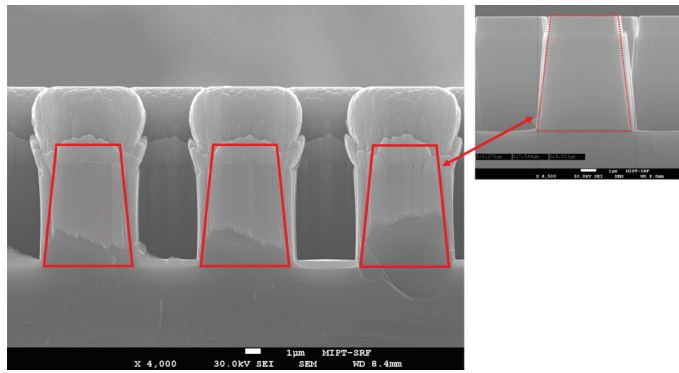


Рис. 2. РЭМ-изображение геттера, осажденного на подложке с микрорельефом. На вставке приведен увеличенный фрагмент одного элемента рельефа

Проведенные исследования показали, что сорбционные характеристики геттера существенно зависят от морфологии подложки. Установлено, что покрытие, сформированное на рельефной поверхности, демонстрирует более высокую эффективность. Таким образом, использование предварительно структурированных подложек является перспективным подходом для повышения скорости сорбции и сорбционной емкости NEG-покрытий TiZrV, предназначенных для применения в МЭМС-устройствах и технологиях вакуумной упаковки [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы создания и развития научного центра мирового уровня «Центр перспективной микроэлектроники» по соглашению о предоставлении гранта № 075-15-2025-608.

Литература

1. Benvenuti C., Chiggiato P., Costa Pinto P., Escudeiro Santana A., Hedley T., Mongelluzzo A., Ruzinov V., Wevers I. Vacuum properties of TiZrV non-evaporable getter films // Vacuum, 2001. Vol. 60. P. 57–65.
2. Kariya S., Matsumae T., Kurashima Y., Takagi H., Hayase M., Higurashi E. Bonding formation and gas absorption using Au/Pt/Ti layers for vacuum packaging // Microsystems & Nanoengineering, 2022. Vol. 8. Article 2. DOI: 10.1038/s41378-021-00339-x.

УДК 538.911

Особенности формирования атомарно-гладких гетерограниц сверхрешеток InGaAs/InAlAs в гетероструктурах квантово-каскадных лазеров, изготовленных с применением комбинированного МОГФЭ/МПЭ-метода

Папылев Д. С.[1,2], Новиков И. И.[1,2], Андрюшкин В. В.[1,2], Гладышев А. Г.[1], Дюделев В. В.[3], Карачинский Л. Я.[1,2], Бабичев А. В.[2], Няпшаев И. А.[3], Юнин П. А.[4], Егоров А. Ю.[1,3], Соколовский Г. С.[3]

[1] ООО «Коннектор Оптикс»
194292, г. Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, 16, лит. Б
innokenty.novikov@connector-optics.com, vlad.andryushkin@connector-optics.com, andrey.gladyshev@connector-optics.com, anton.egorov@connector-optics.com
[2] Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49, лит. А
dspapylev@itmo.ru, a.babichev@itmo.ru
[3] ФТИ им. А. Ф. Иоффе
194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая улица, 26
v.dudelev@mail.ru, i.nyapshaev@hevelsolar.com, gs@mail.ioffe.ru
[4] Институт физики микроструктур РАН
603087, г. Нижний Новгород, д. Афонино, ул. Академическая, 7
yunin@ipmras.ru

Исследованы технологические подходы к снижению ширины гетерограниц в гетероструктурах для квантово-каскадных лазеров. Определены толщина буферного слоя InGaAs и режим роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии, обеспечивающие атомарно-гладкие (⩽0,35 нм) гетерограницы в сверхрешетках InGaAs/InAlAs.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер; гетероструктура; ширина гетерограниц; молекулярно-пучковая эпитаксия; рентгеновская рефлектометрия.

Features of the formation of atomically smooth heterointerfaces in InGaAs/InAlAs superlattices of quantum-cascade laser heterostructures fabricated by a combined MOVPE/MBE method

Papylev D. S.[1,2], Novikov I. I.[1,2], Ph.D, Andryushkin V. V.[1,2], Ph.D, Gladyshev A. G.1, Ph.D, Dudelev V. V.3, Ph.D, Babichev A. V.2, Ph.D, Nyapshaev I. A.3, Ph.D, Yunin P. A.4, Ph.D, Egorov A. Yu.[1,3], Ph.D, Sokolovskii G. S.3, Ph.D

[1] Connector Optics LLC
16 Domostroitelnaya St., Bldg. B, Saint Petersburg, 194292, Russia
innokenty.novikov@connector-optics.com, vlad.andryushkin@connector-optics.com, andrey.gladyshev@connector-optics.com, anton.egorov@connector-optics.com
[2] ITMO University
49 Kronverksky Ave., Bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia
dspapylev@itmo.ru, a.babichev@itmo.ru

[3] *Ioffe Institute*
26 Polytekhnicheskaya St., Saint Petersburg, 194021, Russia
v.dudelev@mail.ru, i.nyapshaev@hevelsolar.com, gs@mail.ioffe.ru
[4] *Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences*
46 Ul'yanova St., Nizhnii Novgorod, 603950, Russia
yunin@ipmras.ru

Technological approaches to reducing the heterointerface width in heterostructures for quantum-cascade lasers have been investigated. The thickness of the InGaAs buffer layer and the growth conditions by molecular-beam epitaxy that provide atomically smooth (⩽0.35 nm) heterointerfaces in InGaAs/InAlAs superlattices have been determined.
Keywords: quantum-cascade laser; heterostructure; heterointerface width; molecular-beam epitaxy; X-ray reflectometry.

Активная область квантово-каскадных лазеров (ККЛ) среднего ИК-диапазона [1] состоит из повторяющихся каскадов полупроводниковых слоев наноразмерной толщины. Шероховатость и размытие профиля химического состава гетерограниц этих слоев при таких малых толщинах могут приводить к деградации характеристик ККЛ [2, 3]. Наследование шероховатости поверхности подложки эпитаксиальными слоями определяет важность выбора технологии эпитаксии и толщины буферного слоя, обеспечивающего планаризацию поверхности для дальнейшего роста каскадов ККЛ. В свою очередь, резкость гетерограниц обеспечивается подбором подходящих режимов эпитаксии.

В работе для изготовления гетероструктур ККЛ использовался комбинированный подход с применением газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) для роста толстых слоев толщиной порядка микрометра и молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) для наноразмерных слоев сверхрешетки активной области.

Исследована возможность планаризации шероховатости поверхности методом МОГФЭ с использованием двух легированных подложек InP (001), шероховатость поверхности которых по результатам измерений методом оптической дефектометрии составила 0,2 и 0,4 нм. При росте методом МОГФЭ буферного слоя InP толщиной 5000 нм, функционально составляющего обкладку волновода ККЛ, шероховатость поверхности составила значения 0,2 и 0,4 нм, соответствующие исходной шероховатости используемых подложек.

В процессе МПЭ для удаления естественных оксидов с поверхности образцов выполнялся отжиг при температуре 530±10 °C, сопутствующий увеличению шероховатости поверхности. Перед ростом сверхрешетки был выращен буферный слой $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ толщиной 50 нм, также функционально требуемый для повышения фактора модового ограничения в ККЛ за счет относительно высокого показателя преломления [4]. Далее проводился рост напряженно-компенсированной сверхрешетки активной области, состоящей из десяти каскадов слоев InGaAs/InAlAs суммарной толщиной ~500 нм.

Для уменьшения размытия гетерограниц и обеспечения однородности слоев при эпитаксии поддерживались пониженное соотношение потоков элементов A^3/B^5 порядка 1:3 и повышенная до 40 об/мин скорость вращения держателя подложек в реакторе установки при температуре подложек 490±10 °C. Размытие

и шероховатость, составляющие в совокупности ширину гетерограниц, оценивались по измерениям и последующему моделированию кривых качания малоугловой рентгеновской рефлектометрии. Повышенная с 0,2 до 0,4 нм шероховатость подложек способствовала увеличению ширины гетерограниц сверхрешеток с 0,32 до 0,55 нм соответственно, что указывает на значимый вклад исходной шероховатости в уширение профиля гетерограниц.

Для уменьшения ширины гетерограниц сверхрешеток в двух образцах, выращенных методом МПЭ на подложках с повышенной шероховатостью (0,4 нм), толщина буферного слоя InGaAs была увеличена с 50 до 100 и 500 нм. Применение такого подхода позволило достичь в обоих образцах приблизительно равных значений ширины гетерограниц, составляющих значения 0,29–0,30 и 0,33–0,35 нм для гетерограниц InGaAs/InAlAs и InAlAs/InGaAs соответственно, что сопоставимо с результатами, полученными при использовании подложки с шероховатостью 0,2 нм.

Полученные результаты подтверждают критическую роль исходного качества подложек и правильного выбора толщины буферного слоя для снижения шероховатости гетерограниц в гетероструктурах ККЛ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-30020-П, https://rscf.ru/project/21-72-30020.

Литература

1. Babichev A. V. et al. Heterostructures of Single-Wavelength and Dual-Wavelength Quantum-Cascade Lasers // Semiconductors, 2018. Vol. 52 (6). P. 745–749.
2. Krivas K. A. et al. Influence of interface roughness in quantum cascade lasers // J. Appl. Phys., 2015. Vol. 118 (11). P. 114501.
3. Wang C. A. et al. // J. Cryst. Growth, 2017. Vol. 464. № 215.
4. Novikov I. I. et al. // J. Phys.: Conf. Ser., 2017. Vol. 929. № 1. P. 012082.

УДК 621.382.002

Оптимизация процесса плазмохимического осаждения пленок нитрида кремния для применения в качестве конденсаторного и пассивационного диэлектрика в силовой и СВЧ-электронике на основе GaN

Гребенников В. А.[1,2], Желаннов А. В.[1] к. т. н., Казанцева З. С.[1], Кудрявцев А. А.[1]
[1] АО «ОКБ-Планета»
173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13А
Vasiligreb@mail.ru, Zhelannovav@okbplaneta.ru, KazantsevaZS@okbplaneta.ru, KudryavtsevAA@okbplaneta.ru
[2] Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого
173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41

В настоящей работе исследуется технология плазмохимического осаждения нитридных пленок на установке Sentech SI500. Рассмотрены основные зависимости свойств осажденных пленок от технологических параметров процесса. С применением ИК-Фурье-спектроскопии, эллипсометрии и испытаний на устойчивость к травлению в растворе плавиковой кислоты (HF) определены оптимальные режимы осаждения нитрида кремния для использования в качестве пассивирующего и конденсаторного диэлектрика в нитридной технологии. На основе оптимизированных пленок изготовлены тестовые конденсаторы, для которых проведены измерения пробивного напряжения. В качестве исходных газов использовались: смесь моносилана с гелием (SiH_4 5% + He 95%) в качестве источника кремния, аргон (Ar) в качестве инертного газа-носителя и азот (N_2). Процесс низкотемпературного осаждения осуществлялся с помощью высокоплотной индуктивно-связанной плазмы (ICP), что позволило формировать пленки с показателем преломления, близким к стехиометрическому значению.

Ключевые слова: нитрид кремния; плазмохимическое осаждение; конденсаторный диэлектрик.

Optimization of the plasma-enhanced chemical vapor deposition process for silicon nitride films for use as capacitor and passivation dielectrics in microwave and GaN-based power electronics

Grebennikov V. A.[1,2], Zhelannov A. V.[1], Ph.D, Kazantseva Z. S.[1], Kudryavtsev A. A.[1]
[1] "OKB-Planeta" JSC
13A Bolshaya Moskovskaya St., Veliky Novgorod, 173004, Russia
Vasiligreb@mail.ru, Zhelannovav@okbplaneta.ru, KazantsevaZS@okbplaneta.ru, KudryavtsevAA@okbplaneta.ru
[2] Yaroslav the Wise Novgorod State University
41 Bolshaya Sankt-Peterburgskaya St., Veliky Novgorod, 173003, Russia

This paper examines plasma-enhanced chemical vapor deposition (PEV) technology for nitride films using a Sentech SI500 system. The key relationships between the deposited film properties and process parameters are studied. Using Fourier transform IR

spectroscopy, ellipsometry, and etching resistance testing in a hydrofluoric acid (HF) solution, optimal deposition conditions for silicon nitride were determined for use as a passivating and capacitor dielectric in nitride technology. Test capacitors were fabricated using optimized films, and breakdown voltage measurements were conducted. A mixture of monosilane and helium (SiH_4 5% + He 95%) served as the silicon source, argon (Ar) as the inert carrier gas, and nitrogen (N_2). The low-temperature deposition process was carried out using high-density inductively coupled plasma (ICP), which allowed the formation of films with a refractive index close to the stoichiometric value.
Keywords: silicon nitride; plasma-enhanced chemical vapor deposition; capacitor dielectric.

Введение

Применение нитрида галлия (GaN) в силовой и СВЧ-электронике обеспечивает существенное повышение максимальной плотности мощности, что позволяет увеличить рабочие токи и напряжения приборов, а также повысить их эффективность. Однако увеличение электрических нагрузок приводит к повышению требований к электрофизическим свойствам используемых материалов. В частности, диэлектрические пленки нитрида кремния, успешно применяемые в кремниевой и арсенид-галлиевой технологиях, не всегда удовлетворяют требованиям GaN-технологии. В литературе часто упускается, что пленки нитрида кремния (Si_3N_4), получаемые методом PECVD, содержат значительное количество атомов водорода (до 30 ат.%) и фактически представляют собой состав $H_rSi_xN_yH_z$ [1]. Примесь водорода является нежелательной для микроэлектроники: она ухудшает изоляционные свойства за счет образования дефектов, снижает физические и электрические параметры диэлектрических слоев, что негативно сказывается на характеристиках приборов. При повышении температуры слабосвязанный водород способен диффундировать в соседние слои, создавая вакансии и высокие механические напряжения. Содержание водорода в пленке негативно сказывается на ее параметрах: уменьшается плотность, падает показатель преломления и пробивное напряжение [2, 3, 4]. Изменение таких параметров процесса осаждения, как температура процесса, приложенная ICP- и RF-мощность, давление, соотношение газов в смеси, может в широком диапазоне менять физические характеристики диэлектрической пленки.

В ходе эксперимента была проведена серия процессов осаждения пленок нитрида кремния толщиной 270 нм на кремниевые подложки *n*-типа с удельным сопротивлением 1 Ом·см. Процессы выполнялись на установке *ICPCVD Sentech SI500* в газовой смеси SiH_4 + He / N_2 / Ar. Для изменения свойств пленок варьировались следующие параметры: температура подложки, давление в реакторе, мощность ICP, смещение RF, расход N_2. Сравнивались методы непрерывного и импульсного осаждения. В качестве базового был использован режим осаждения диэлектрика, применяемый в арсенид-галлиевой технологии: расход N_2 — 6 sccm, Ar — 89 sccm, SiH_4 — 89 sccm, мощность ICP — 550 Вт, смещение RF — 0 В, давление — 1,33 Па, температура — 200 °C. Далее температура подложки последовательно увеличивалась от 200 до 350 °C с шагом 50 °C. Кроме температуры также менялось давление в реакторе от 0,65 до 8 Па, расход N_2 –от 4 до 60 sccm, ICP-мощность –от 350 до 1100 Вт и RF-смещение –от 0 до −12 В. После каждого процесса проводились измерения параметров пленок для определения оптимального режима осаждения.

Концентрация водорода в пленке рассчитывалась по методике, подробно описанной в [5]. На рис. 1 показан пример ИК-спектров полученных пленок.

В результате наилучшие результаты по совокупности параметров были получены на двух режимах осаждения:

1) импульсное осаждение Si_3N_4 при температуре подложки 280 °C, давлении 0,65 Па, мощности ICP 850 Вт, смещении RF −4 В; расходы газов: N_2 — 60 sccm, Ar — 89 sccm, SiH_4 — 89 sccm. Генераторы включены постоянно; рабочий газ подается импульсами по 12 секунд с перерывами в 5 секунд. Импульсная подача моносилана препятствует накоплению водорода в реакторе, что снижает его концентрацию в полученной пленке;

2) непрерывное осаждение Si_3N_4 при температуре подложки 300 °C, давлении 0,65 Па, мощности ICP 1000 Вт, смещении RF 0 В; расходы газов: N_2 — 6 sccm, Ar — 89 sccm, SiH_4 — 89 sccm.

С использованием оптимизированной пленки были изготовлены тестовые конденсаторы, для которых проведены измерения токов утечки и пробивных напряжений (рис. 2).

Как следует из графика, для оптимизированных пленок до напряжения ~100 В наблюдается незначительное превышение тока утечки по сравнению со стандартной пленкой; однако токи утечки конденсаторов с оптимизированными пленками практически не растут вплоть до 200 В, после чего пробоя не происходит, тогда как пленка по стандартной технологии непрерывно растет и пробивается уже при ~103 В. Несмотря на сходство электрических характеристик, пленка, полученная импульсным осаждением, показывает лучшую равномерность толщины по пластине и чистоту. Таким образом, оптимизация параметров процесса осаждения помогла повысить пробивные напряжения пленки нитрида кремния, что значительно уменьшает вероятность выхода GaN-прибора из строя.

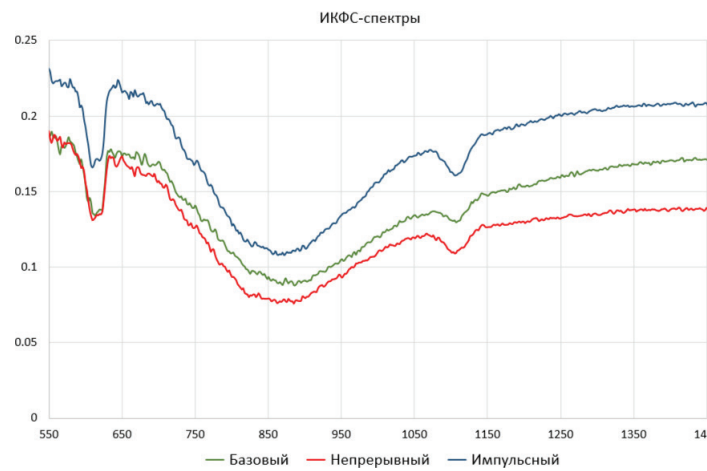


Рис. 1. Пример полученных ИК-спектров.

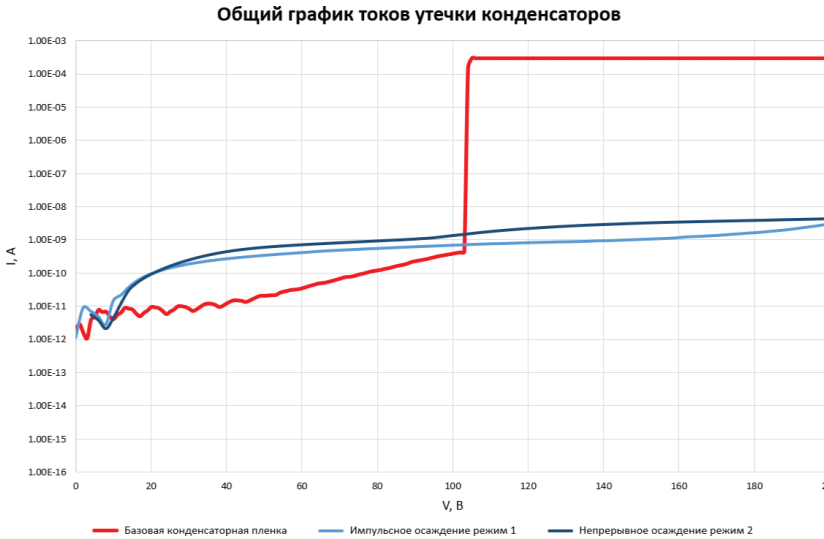


Рис. 2. Сравнение токов утечки. Красный график –базовый режим, голубой график –импульсный режим, синий график –непрерывный режим

Литература

1. Haziq M., Falina S., Manaf A. A., Kawarada H., Syamsul M. Challenges and Opportunities for High-Power and High-Frequency AlGaN/GaN High-Electron-Mobility Transistor (HEMT) Applications: A Review // Micromachines, 2022. Vol. 13.
2. Lanford W. A. The hydrogen content of plasma-deposited silicon nitride // Journal of Applied Physics, 1978; 49 (4). P. 2473.
3. Parsons G. N. Low hydrogen content stoichiometric silicon nitride films deposited by plasmaenhanced chemical vapor deposition / G. N. Parsons, J. H. Souk, J Batey Citation and // J. Appl. Phys., 1991. № 70.
4. Zhang Yudong, Tang Jiale, Hu Yongjie, Yuan Jie. Effect of hydrogen content on dielectric strength of the silicon nitride film deposited by ICP // Chinese Physics B, 2021; 30 (4).
5. Kovalchuk A., Beshkov G., Shapoval S. Dehydrogenation of low-temperatureecr-plasma silicon nitride filmsunder rapid thermal annealing // J. of Research in Physics, 2007. Vol. 31. № 1. P. 37.

УДК 621.3.049

Исследование тонких пленок $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$-Bi/Si, полученных методом импульсного лазерного напыления

Никулин Д. А.
Северо-Кавказский федеральный университет
355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1
Dmitnikul@gmail.com

Представлены результаты исследований методами атомно-силовой и растровой электронной микроскопии, а также спектроскопии комбинационного рассеяния тонких пленок $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$ с висмутом на подложках кремния, полученные методом импульсного лазерного напыления.
Ключевые слова: тонкие пленки; импульсное лазерное напыление; атомно-силовая микроскопия; растровая электронная микроскопия; спектроскопия комбинационного рассеяния.

Investigation of $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$-Bi/Si Thin Films Obtained by Pulsed Laser Deposition

Nikulin D. A.
North-Caucasus Federal University
1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russia
dmitnikul@gmail.com

This paper presents the results of studies on In1-x GaxAs1-y Py thin films with bismuth grown on silicon substrates by pulsed laser deposition, using atomic force microscopy, scanning electron microscopy, and Raman spectroscopy.
Keywords: thin films; pulsed laser deposition; atomic force microscopy; scanning electron microscopy; Raman spectroscopy.

В настоящее время одним из способов получения многокомпонентных тонких пленок на основе твердых растворов A_3B_5 с висмутом является метод импульсного лазерного напыления (ИЛН) [1]. Данный подход обладает некоторыми преимуществами: сравнительно быстрое испарение материала мишени и последующий перенос материала в пароплазменном факеле минимизируют сегрегацию фосфора и висмута [2, 3].

Проведен ряд экспериментов с получением тонких пленок $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$ с добавлением висмута на подложках кремния при варьировании температуры подложки в диапазоне 240–370 °C методом ИЛН. Использовался одноимпульсный лазер Nd^{3+}:YAG с длиной волны 532 нм, длительностью импульса 15 нс, частотой 10 Гц. Глубина вакуума обеспечивалась безмасляной системой откачки глубиной не менее $1 \cdot 10^{-4}$ Па. Полученные образцы исследовались методами спектроскопии комбинационного рассеяния, растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии.

Автор считает, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: в полученных тонких пленках достигнута концентрация висмута 1,53 % (результаты подтверждены методом энергодисперсионной спектроскопии);

висмут эффективно внедряется в решетку твердого раствора в виде тонкой пленки только при температурах более 330 °C; оптимальный диапазон температур подложки для роста тонкой пленки определен в 330–350 °C.

Температура подложки является ключевым параметром, определяющим внедрение висмута в кристаллическую решетку. При температурах ниже 300 °C наблюдается образование дефектов, уширение пиков комбинационного рассеяния и снижение интенсивности сигнала на 30–40 %, что связано с кластеризацией висмута и внутренними напряжениями. Эффективное легирование висмутом с сохранением высокой кристалличности достигается только при температурах выше 330 °C. Оптимальный диапазон составляет 330–350 °C: в этих условиях формируются узкие интенсивные пики (более 2000 событий) и сбалансированный элементный состав. При 330 °C концентрация висмута в пленке составила 0,07 ат.%, однако именно при 300 °C зафиксировано значение 1,53 ат.%. Максимальная толщина пленки составила 177 ± 1 нм при температуре подложки 370 °C (рис. 1).

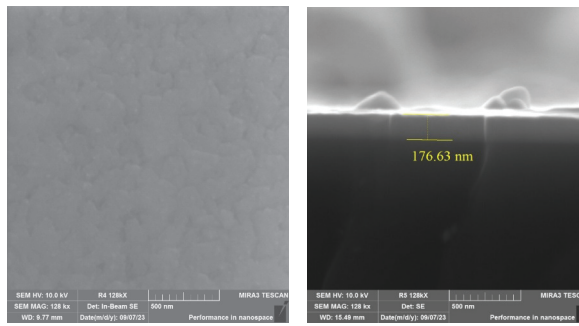


Рис. 1. Морфология поверхности и кросс-секция образца, полученного методом ИЛН при температуре подложки 370 °C

Работы проведены с использованием ресурсов центра коллективного пользования Северо-Кавказского федерального университета.

Литература

1. Epitaxial growth of GaInAsBi thin films on Si (001) substrate using pulsed laser deposition / A. S. Pashchenko, O. V. Devitsky, M. L. Lunina, E. M. Danilina, O. S. Pashchenko, B. Ber, V. I. Sakharov // Vacuum, 2024. Vol. 227. P. 113372. — DOI: 10.1016/j.vacuum.2024.113372.
2. Алфимова Д. Л. Выращивание и свойства твердых растворов GayIn1yPzAs1xzBix на подложках GaP / Д. Л. Алфимова, Л. С. Лунин, М. Л. Лунина // Неорганические материалы, 2014. — Т. 50. — № 2. — С. 127. — DOI: 10.7868/S0002337X14020018. — EDN RRJKRT.
3. InGaAsPBi grown on InP substrate by gas source molecular beam epitaxy / F. Tian, L. Ai, A. Xu et al. // Materials Research Express, 2021. Vol. 8. № 2. P. 026404. — DOI: 10.1088/2053-1591/abe430. — EDN XHYQIU.

УДК 621.793.162

Исследование процесса окисления тонких пленок нитрида кремния, нанесенных методом низкотемпературного плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения

Прищепчук Г. А.[1,2]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] *Московский физико-технический институт*
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В работе рассматривается низкотемпературный процесс роста тонких пленок Si_3N_4 методом PEALD с использованием низкотемпературного кремниевого прекурсора BDIPADS и N_2/NH_3 в качестве источника азота. Для устранения проблемы окисления пленки предлагается использовать пассивирующий слой TiN.
Ключевые слова: нитрид кремния; атомно-слоевое осаждение; окисление; прекурсор.

Investigation of the Oxidation Process of Silicon Nitride Thin Films Deposited by Low-Temperature Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition.

Prishchepchuk G. A.[1,2]
[1] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[2] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
1A/1 Kerchenskaya St., Moscow, 117303, Russia

This work considers a low-temperature process for the growth of Si3N4 thin films by PEALD using the low-temperature silicon precursor BDIPADS and N2/NH3 as the nitrogen source. To prevent film oxidation, a TiN passivation layer is proposed.
Keywords: silicon nitride; atomic layer deposition; oxidation; precursor.

Тонкие пленки нитрида кремния (Si_3N_4) находят широкое применение в полупроводниковой промышленности в качестве функциональных слоев для конденсаторов и подзатворного диэлектрика транзисторов благодаря своей более высокой диэлектрической проницаемости, а также в элементах хранения резистивной энергонезависимой памяти (ReRAM) [1]. Так как нитрид кремния является одним из основных материалов микроэлектронной промышленности, то процессы его осаждения были уже достаточно подробно изучены ранее, будь это осаждение из газовой фазы (CVD) или атомно-слоевое осаждение (ALD). Однако актуальной задачей является низкотемпературное осаждение тонких пленок SiN_x, и в этом случае процесс плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения (PEALD) является многообещающим процессом формирования тонких пленок. Использование плазмы позволяет снизить температуру процесса осаждения без ухудшения других показателей осаждения, таких как скорость роста или неравномерность толщины

пленки по поверхности полупроводниковой пластины. Тем не менее процесс низкотемпературного роста тонких пленок SiN_x методом PEALD в литературе описан нешироко [2], а работ, где использовался бы низкотемпературный прекурсор кремния, например BDIPADS в процессе PEALD, в литературе нет. Важной особенностью низкотемпературного роста тонких пленок SiN_x является то, что при контакте с атмосферой пленка начинает окисляться и по прошествии времени кислород полностью вытесняет азот, что приводит к образованию оксида кремния. Для предотвращения этого эффекта нужно выращивать пленку при температурах более 150 °C или использовать высокотемпературный отжиг сразу после нанесения. Так как прекурсор кремния BDIPADS является низкотемпературным, то при осаждении при повышенных температурах он начинает разлагаться, что делает атомно-слоевой рост пленки невозможным. В связи с этим в данной работе будет рассмотрен процесс PEALD тонких пленок нитрида кремния, выращенных при низкой температуре, и рассмотрена динамика окисления таких пленок.

В данной работе на пластины диаметром 200 мм методом PEALD наносились тонкие пленки SiNx толщиной 10–15 нм на установке ALD «Изофаз ТМ-200» [3]. В качестве источника азота выступал азот (N_2) или аммиак (NH_3), а в качестве прекурсора кремния использовался BDIPADS. Толщина осажденных пленок и их показатель преломления определялись спектральным эллипсометром. Морфология поверхности, изученная с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ), показала, что пленки SiNx сразу после нанесения имеют пористую структуру. В связи с этим предполагается, что атомы кислорода из атмосферы оседают на оборванных связях в порах, тем самым окисляя пленку. По прошествии нескольких десятков часов пленка полностью окисляется и повторные измерения поверхности показывают отсутствия пор на поверхности пленки.

Для предотвращения этого нежелательного эффекта предлагается в рамках одного технологического цикла PEALD (т. е. без разрыва вакуума) на сформированную тонкую пленку нитрида кремния нанести нитрид титана, который выступит как пассивация поверхности. С учетом того что в элементах хранения ReRAM распространены верхние электроды из TiN, в данной работе уже прямо в процессе ALD начинается формирование верхнего электрода. В дальнейшем уже сформированный элемент хранения измеряется с использованием зондовой станции и полупроводникового анализатора приборов на количество циклов переключения.

Таким образом, в этой работе изучается низкотемпературный процесс роста тонких пленок Si_3N_4 методом PEALD с использованием низкотемпературного кремниевого прекурсора BDIPADS и N_2/NH_3 в качестве источника азота. Методом атомно-силовой микроскопии изучается морфология поверхности как сразу после процесса осаждения, так и по прошествии некоторого времени. Для устранения проблемы окисления предлагается использовать пассивирующий слой TiN.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-91-06003, https://rscf.ru/project/23-91-06003.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4. — С. 60–64.

2. Han J. H. et al. Chemistry of SiN_x thin film deposited by plasma-enhanced atomic layer deposition using di-isopropylaminosilane (DIPAS) and N_2 plasma // Ceramics International, 2018. Vol. 44. № 17. P. 20890–20895.
3. Зюзин С. С. и др. Атомно-слоевое осаждение тонких пленок оксида гафния с использованием установки «Изофаз Т. 200-01» // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. № S8-2. — С. 548–552.

УДК 621.383

Исследование влияния лигандной замены на фотофизические характеристики фоторезисторов на основе коллоидных квантовых точек HgTe

Асначёв Д. Д., Хакимов К. Т., Королёва Т. В., Яковлев В. О., Сапцова О. А., Медведев А. Г., Попов В. С.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
asnachev.dd@phystech.edu

ККТ на основе халькогенидов ртути являются перспективными материалами для создания ИК-фотодетекторов нового поколения. Данное исследование посвящено синтезу ККТ HgTe, получению консолидированных слоев на их основе и установлению влияния постсинтетической лигандной замены ККТ на фотофизические характеристики фоторезисторов на их основе.
Ключевые слова: ККТ; халькогениды ртути; консолидированные слои; лигандная замена.

Study of the effect of ligand substitution on the photophysical characteristics of HgTe colloidal quantum dot-based photoresistors

Asnachev D. D., Khakimov K. T., Koroleva T. V., Yakovlev V. O., Saptsova O. A., Medvedev A. G., Popov V. S.
Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
asnachev.dd@phystech.edu

HgTe-based CCTs are promising materials for the creation of new-generation IR photodetectors. This study focuses on the synthesis of HgTe-based CCTs, the formation of consolidated layers based on them, and the effect of post-synthetic ligand substitution on the photophysical characteristics of photoresistors based on these CCTs.
Keywords: CCT; mercury chalcogenides; consolidated layers; ligand substitution.

Квантовые точки обладают уникальными физическими свойствами благодаря явлению квантового ограничения, когда размер полупроводниковой структуры сравним с длиной волны де Бройля носителей заряда. Этим обусловлено явление дискретизации энергетических уровней по сравнению с массивным полупроводником и увеличение ширины запрещенной зоны. В связи с этим фотосенсорика на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) является одним из развивающихся направлений фотоэлектроники инфракрасного диапазона [1]. При этом изменение оптических характеристик исследуемых полупроводниковых нанокристаллов возможно за счет подбора параметров синтеза, формирования слоев и лигандов без изменения при этом химического состава ККТ.

Целью работы является исследование влияния типа лиганда на фотофизические характеристики фоторезисторов на основе нанокристаллов HgTe.

Для исследования изменения свойств консолидированных слоев ККТ теллурида ртути выбран ряд наиболее эффективных и часто используемых лигандов [2]. Синтез ККТ осуществляли методом горячей инжекции. Максимум пика поглощения дисперсии ККТ по данным ИК-Фурье-спектроскопии составил 3,35 мкм. Синтезированные ККТ использовали для приготовления фоторезисторов. Замену лигандной оболочки ККТ проводили при послойном нанесении дисперсии ККТ на поверхность кремниевой подложки с Au-электродами. В качестве источников лигандов использовали растворы EDT, HgI_2, $HgCl_2$, $HgBr_2$, $Hg(SCN)_2$ в метаноле, этаноле и изопропаноле. Дополнительно слои обрабатывали этандитиолом для скрепления отдельных ККТ между собой. Толщину полученных пленок ККТ измеряли методом атомно-силовой микроскопии. Кроме того, для сравнения были изготовлены фоторезисторы из чернил, полученных при жидкофазной замене лигандов.

Измерение фотосигнала проводили при облучении лазером с длиной волны 1550 и 3400 нм. На рис. 1 и 2 представлены лучшие результаты фотофизических характеристик для имеющихся образцов. На рис. 1 представлено по два образца с твердофазной и жидкофазной заменой на лиганды $HgCl_2$, $Hg(SCN)_2$. Образцы фоторезисторов с твердофазной заменой показали себя лучше, отсюда следует, что твердофазная замена лучше в плане фотофизических характеристик. Что касается лигандов, то для образцов с жидкофазной заменой лучше себя показал $Hg(SCN)_2$. Для сравнения лигандов с твердотельной заменой был проведен еще один ряд экспериментов, который представлен на рис. 2. Для фоторезисторов на основе ККТ HgTe лучшие результаты показал EDT.

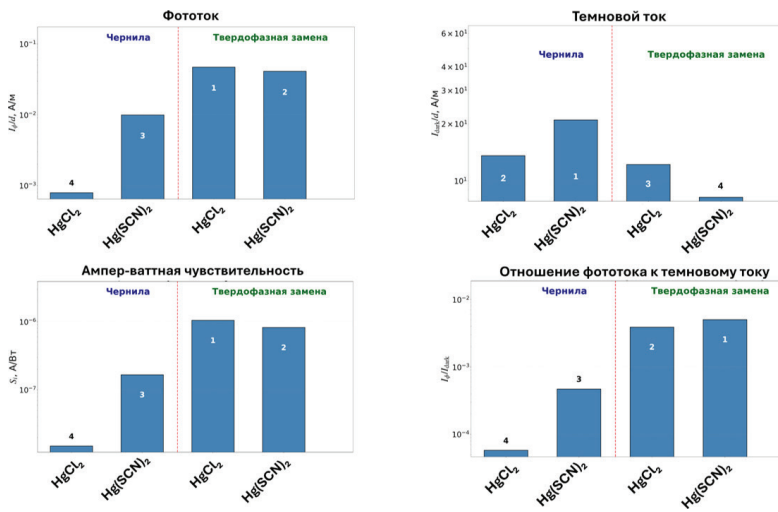


Рис. 1. Фоточувствительные характеристики образцов № 1–4

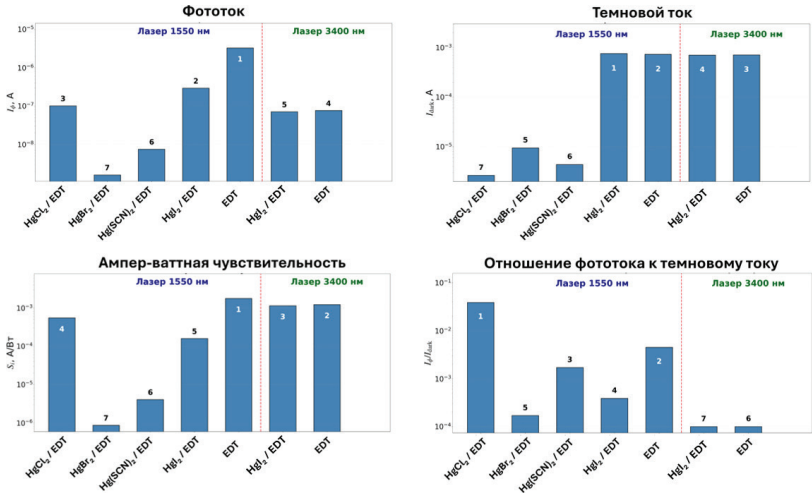


Рис. 2. Фоточувствительные характеристики образцов № 5–10

Данное исследование позволило выявить влияние обработки различными лигандами на фотофизические характеристики пленок на основе ККТ HgTe. Для фоторезисторов при послойной замене введение дополнительной обработки не приводит к заметному улучшению результатов в сравнении с заменой EDT. Однако это актуально для фоточувствительных структур иного типа, где необходимо изготовление слоев с различным типом проводимости, например фотодиодов и фототранзисторов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSMG-2025-0024).

Литература

1. Попов В. С., Пономаренко В. П. Новая фотосенсорика: 0D vs 2D: Монография / В. С. Попов, В. П. Пономаренко. — М.: МФТИ, Физтех, 2024. — 216 с.
2. Пономаренко В. П., Попов В. С., Шуклов И. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф. Фотосенсоры на основе коллоидных квантовых точек // Успехи химии, 2024. — Т. 93. — № 4. –С. RCR5113.

УДК 004.932

Метод локализации ориентационного выреза полупроводниковой пластины на основе контурного анализа и аппроксимации границы

Данилин К. Д., к. т. н., Семенищев Е. А.

МГТУ «СТАНКИН»
127055, г. Москва, ул. Вадковский пер., 3а
danilin.kirill.dmitrievich@gmail.com

Разработан метод локализации ориентационного выреза полупроводниковой пластины на основе анализа геометрии внешнего контура. Предложенный подход включает этапы выделения доминирующего контура пластины, аппроксимации границы и анализа отклонений формы для выявления области выреза. Проведена оценка устойчивости метода к шумам и вариациям освещения.
Ключевые слова: компьютерное зрение; обработка изображений; полупроводниковая пластина; контурный анализ.

Method for localization of wafer orientation notch based on contour analysis and boundary approximation

Danilin K. D., Ph.D, Semenishchev E. A.
Moscow State Technological University "STANKIN"
3a Vadkovsky Lane, Moscow, 127055, Russia
danilin.kirill.dmitrievich@gmail.com

A method for localization of the orientation notch on a semiconductor wafer based on contour geometry analysis is proposed. The approach includes extraction of the dominant wafer contour, boundary approximation, and deviation analysis for notch detection. The robustness of the method to noise and illumination variations is evaluated.
Keywords: computer vision; image processing; semiconductor wafer; contour analysis.

Задача определения ориентационного выреза полупроводниковой пластины является ключевой для систем предварительного позиционирования и загрузки пластин в технологическое оборудование. Ошибки определения ориентации приводят к нарушению угловых режимов технологических операций.

Современные решения данной задачи все чаще основаны на методах глубокого обучения. В частности, модели семейства YOLO с ориентированными ограничивающими рамками демонстрируют высокую точность детектирования за счет учета угловых характеристик объекта. Однако такие подходы требуют обучения на размеченных данных, значительных вычислительных ресурсов и сложной настройки [1–2].

В работе предлагается алгоритмический метод локализации выреза, не требующий обучения и основанный на анализе геометрии контура пластины. Метод включает предварительную обработку изображения, выделение внешнего контура и построение границы объекта. Для сглаживания границы используется

полиномиальная аппроксимация, после чего выполняется анализ отклонений между реальной и аппроксимированной формой.

Область ориентационного выреза определяется как локальный участок с превышением порогового значения отклонения и минимальной шириной.

По сравнению с нейросетевыми методами предложенный алгоритм характеризуется низкой вычислительной сложностью, отсутствием этапа обучения и высокой интерпретируемостью, что делает его применимым в системах реального времени и встраиваемых решениях.

Апробация метода проведена на зондовой станции ООО «Совтест-АТЕ». В условиях промышленной эксплуатации подтверждена устойчивость алгоритма к шумам и вариациям освещения, а также достаточная точность локализации для задач автоматического позиционирования пластин.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FSFS-2026-0009 «Разработка теоретических принципов и методов автоматизации управления многокомпонентными системами в условиях недетерминированной среды».

Литература

1. Sindhwani N. et al. Performance analysis of deep neural networks using computer vision // Machine learning, 2021. Vol. 15. № 17.
2. Jun E. S., Sim H. J., Moon S. J. Advancing YOLOv8-Based Wafer Notch-Angle Detection Using Oriented Bounding Boxes, Hyperparameter Tuning, Architecture Refinement, and Transfer Learning // Applied Sciences, 2025. Vol. 15. № 21. P. 11507.

УДК 537.523.4

Исследование зависимости сопротивления проводящих дорожек из наночастиц золота от количества слоев и температурной обработки

Санатулина А. Ф., Шляпин В. М., Лизунова А. А.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Работа посвящена исследованию проводящих свойств дорожек из наночастиц золота, полученных методом сухой аэрозольной печати на подложках из стекла, в зависимости от количества наносимых слоев и температурной обработки от 50 до 400 °C. Изучено влияние потока газа на размер синтезированных аэрозольных частиц в газовом разряде.
Ключевые слова: наночастицы золота; сухая аэрозольная печать; проводящие дорожки; газовый разряд.

A study of the dependence of the resistance of conductive gold paths on the number of layers

Sanatulina A. F., Shlyapin V. M., Lizunova A. A.
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

The conductive properties of gold nanoparticles fabricated by dry aerosol printing on substrates, depending on the number of deposited layers, were studied.
Keywords: gold nanoparticles; dry aerosol printing; conductive tracks; gas discharge.

Электрические свойства золотых наночастиц значительно отличаются от свойств металла, что открывает широкие перспективы для их применения в гибкой и печатной электронике [1]. Особый интерес представляют исследования, посвященные формированию проводящих дорожек из золотых наночастиц. Современные разработки, такие как пористые покрытия на основе органозолей золота, демонстрируют, что даже при высокой пористости структуры можно достичь проводимости, превосходящей серебряные аналоги [1]. Синтезировать золотые наночастицы можно методом импульсно-периодического газового разряда с дополнительной термической обработкой, соединенного с установкой для сухой аэрозольной печати, что позволяет быстро получать дорожки из наночастиц на твердых и гибких подложках [2]. Поэтому целью данной работы является изучение зависимости сопротивления дорожек из наночастиц золота, синтезированных в газовом разряде с дополнительной термической обработкой, от количества напечатанных слоев на дорожке.

В ходе работы был проведен синтез наночастиц с использованием газового разряда при таких условиях: поток газа от 50 до 400 мл/мин; напряжение 1,5 кВ; конденсатор 40 нФ с дальнейшей термической обработкой в трубчатой печи, нагретой до 750 °C. Затем из полученных наночастиц формировались проводящие дорожки

с использованием технологии сухой аэрозольной печати при различных параметрах на предметных стеклах. Скорость движения подложки относительно сопла составляла 100 мкм/с. Расстояние от сопла до подложки было установлено 2,5 мм. На подложку наносились дорожки, состоящие от одного до пяти слоев. На края дорожек наносилась серебряная паста в качестве электродов. Сопротивление измерялось с помощью мультиметра *Handheld LCR Meter*. Далее подложки постепенно нагревались до температуры 400 °С.

Исследована зависимость размеров агломератов наночастиц от потока газа. Было выяснено, что размер агломератов наночастиц уменьшается со 177 до 147 нм при увеличении потока газа с 50 до 400 мл/мин. Из наночастиц, синтезированных при потоке 50 мл/мин, были напечатаны дорожки, также была выявлена зависимость сопротивления дорожки от количества последовательно нанесенных слоев. При печати дорожки в один слой частицы лежат разрозненно, поэтому дорожка не является проводящей, при этом с увеличением количества слоев структура получается плотной и начинает проводить. В табл. 1 видно, что сопротивление падает от 325,6 до 11,1 Ом с увеличением площади поперечного сечения дорожки с 1164 до 4766 мкм^2. С учетом измерений трехмерной геометрии дорожек методом профилометрии с использованием оптического профилометра *Sensofar S neox* были рассчитаны удельные проводимости полученных материлов (табл. 1). Оказалось, что наилучшая удельная проводимость составляет 345 кСм/м (площадь поперечного сечения –2325 мкм^2).

Таблица 1

Поперечное сечение, мкм^2	Сопротивление, Ом	Удельная проводимость, кСм/м
1164	325,6	37
2200	20,5	324
2325	16,6	345
4766	11,1	275

Далее была исследована зависимость удельной проводимости от температурного режима. Дорожки постепенно нагревались до температуры 400 °С. Была исследована зависимость удельной проводимости дорожки от температуры отжига (рис. 1), которая показала, что удельная проводимость дорожки растет при увеличении температуры. При температуре 400 °С была достигнута удельная проводимость $1{,}7 \cdot 10^7$ См/м, что близко к табличному значению проводимости золота ($4{,}5 \cdot 10^7$ См/м).

Таким образом, методом сухой аэрозольной печати были получены дорожки из наночастиц золота шириной порядка 400 мкм и длиной 14 мм с разным количеством слоев –от одного до пяти. Выявлено, что сопротивление материала дорожек можно варьировать от 11,1 до 325,6 Ом, регулируя параметры высоты материала. При этом наилучшая удельная проводимость составляет 345 кСм/м и получена у дорожки с площадью поперечного сечения 2325 мкм^2. Также выявлено, что путем отжига дорожки также можно достичь большего значения удельной проводимости ($1{,}7 \cdot 10^7$ См/м при температуре 400 °С). Сравнение с литературными данными

показало, что достигнутые значения проводимости (как до, так и после отжига) соответствуют закономерностям для наночастиц благородных металлов, а наблюдаемые отличия объясняются размерами наночастиц и условиями спекания.

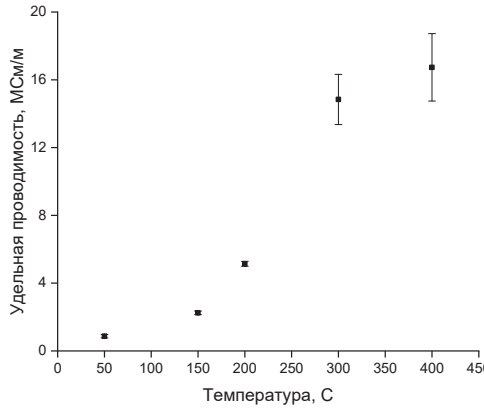


Рис. 1. Зависимость удельной проводимости дорожки от температуры отжига

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-560.

Литература

1. Popovetskiy P. S., Chubar V. S., Sulyaeva V. S. Highly conductive porous coatings based on gold organosols stabilized with the non-ionic biodegradable surfactant Ecosurf SA4 // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025. P. 138109.
2. Lizunova A. et al. Controlled synthesis and aerosol printing of size-tunable platinum nanoparticles for plasmonic applications // Nanostructures & Nano-Objects, 2025. Vol. 44. P. 101591.

УДК 533.924

Изготовление алмазных мембран методом селективного травления с улучшенной однородностью процесса

Погорелов В. А.[1,2], Голованов А. В.[1,2], Лупарев Н. В.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] НИЦ «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс ТИСНУМ
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Центральная, 7а

При помощи многослойного магнетронного распыления и литографии созданы контактные защитные маски из никеля для селективного травления алмаза на глубину более 65 мкм. С такими масками были получены образцы алмазных мембран на рамке толщиной ~30 мкм с неравномерностью толщины ~6 %.
Ключевые слова: алмаз; мембрана; реактивное ионное травление; литография; магнетронное распыление.

Fabrication of diamond membranes by selective etching with improved process uniformity

Pogorelov V. A.[1,2], Golovanov A. V.[1,2], Luparev N. V.[2]
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] NRC "Kurchatov Institute", TISNCM
7a Centralnaya St., Troitsk, Moscow, 108840, Russia

Using multilayer magnetron sputtering and lithography, contact protective nickel masks were created for selective etching of diamond to a depth of more than 65 μm. With such masks, diamond membrane samples on a frame with thickness of ~30 μm and a thickness non-uniformity of ~6 % were obtained.
Keywords: diamond; membrane; reactive ion etching; lithography; magnetron sputtering.

В последние годы высококачественный синтетический алмаз все чаще применяется в сенсорах и интегральных фотонных схемах благодаря его исключительным электрическим и оптическим свойствам. В них алмазные мембраны толщиной около 10 мкм служат в качестве подложки [1]. Из-за химической инертности, твердости и хрупкости алмаз является крайне трудным материалом для контролируемого плазменного травления [2]. Традиционные жидкофазные процессы практически неприменимы, а сухое травление требует жестких условий, при которых маски интенсивно разрушаются, а профиль и однородность формируемых микроструктур оказываются чувствительны к деталям плазмохимии и микромаскингу [3]. При этом именно реактивное ионное травление (РИТ), а также его разновидность, усиленная индукционно-связанной плазмой (ИСП РИТ, англ. ICP RIE), является самой перспективной технологией микрообработки алмаза. Для целого ряда приложений –от интегральной нанофотоники и квантовой сенсорики до высоконагруженных механических резонаторов и сенсоров давления/ускорения –требуются

глубоко протравленные структуры с высоким аспектным соотношением и тонкие мембраны с высокой однородностью толщины [4–6].

Целью данной работы является развитие результатов предыдущих опытов по созданию мембран из монокристаллического алмаза при помощи глубокого ионного травления в плазме [7, 8]. Для этого были поставлены задачи формирования контактных защитных масок толщиной более 1000 нм и точного измерения селективности травления, поиска режимов газового разряда, обеспечивающих равномерную и высокую скорость травления алмаза по всей обрабатываемой поверхности, контроля пространственного распределения скорости травления алмаза и равномерности толщины получаемой мембраны, изготовления опытных образцов мембран из монокристаллического алмаза с улучшенной равномерностью толщины. На рис. 1 представлен снимок одной из получившихся мембран на СЭМ, полученной методом глубокого селективного травления в плазме SF_6 с толстой защитной маской из никеля.

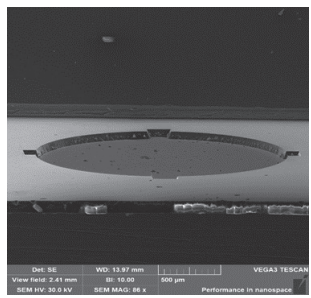


Рис. 1. Общий план мембраны

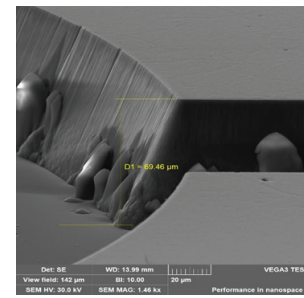


Рис. 2. Приближенный план мембраны

Литература

1. Luozhou L., Trusheim M., Gaathon O., Kisslinger K., Cheng Ch.-J., Lu M., Su D. et al. Reactive Ion Etching: Optimized Diamond Membrane Fabrication for Transmission Electron Microscopy // J. Vac. Sci. Technol. B, 2013. Vol. 31. № 6. P. 06FF01.
2. Toros A., Kiss M., Graziosi T., Sattari H., Gallo P., Quack N. Precision micro-mechanical components in single crystal diamond by deep reactive ion etching // Microsyst. Nanoeng., 2018. Jun 18. Vol. 4. № 12. DOI: 10.1038/s41378-018-0014-5. PMID: 31057900; PMCID: PMC6161503.
3. Osipov A.A., Iankevich G.A., Speshilova A.B., Osipov A.A., Endiiarova E.V., Berezenko V.I., Tyurikova I.A., Tyurikov K.S., Alexandrov S.E. High-temperature etching of SiC in SF_6/O_2 inductively coupled plasma // Sci. Rep., 2020. Vol. 10. № 1. P. 19977. DOI: 10.1038/s41598-020-77083-1.
4. Toros A., Kiss M., Graziosi T., Mi S., Berrazouane R., Naamoun M., Vukajlovic P.J., Gallo P., Quack N. Reactive ion etching of single crystal diamond by inductively coupled plasma // State of the art and catalog of recipes Diamond and Related Materials, 2020. Vol. 108. P. 107839. DOI: 10.1016/j.diamond.2020.107839.

5. Racka-Szmidt K., Stonio B., Zelazko J., Filipak M., Sochacki M. A Review: Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching of Silicon Carbide // Micromachines, 2021. Vol. 15. № 1. P. 123. DOI: 10.3390/ma15010123.
6. Bae H., Giri A., Kolawole O., Azimi A., Jackson A., Harris G. Miniature Diamond-Based Fiber Optic Pressure Sensor with Dual Polymer-Ceramic Adhesives // Sensors, 2019. Vol. 19. № 9. P. 2202. DOI: 10.3390/s19092202.
7. Голованов А. В., Юн М. И., Бондаренко М. Г., Просин А. А., Тарелкин С. А. Монокристаллические алмазные мембраны толщиной от 10 мкм, изготовленные методом плазменного травления // Изв. вузов. Химия и хим. технология, 2024. — Т. 67. — Вып. 10. — С. 55–64. — DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.1y.
8. Challier M., Sonusen S., Barfuss A., Rohner D., Riedel D., Koelbl J., Ganzhorn M., Appel P., Maletinsky P., Neu E. Advanced fabrication of single-crystal diamond membranes for quantum technologies // Micromachines, 2018. Vol. 9. № 4. P. 148.

УДК 535.511:621.315.592:548.522

Исследование особенностей роста $Cd_xHg_{1-x}Te$ на подложках GaAs(001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии с помощью *in situ* эллипсометрии

Грекова А. А.[1,2], Климов Е. А.[1], к. ф.-м. н., Виниченко А. Н.[1,2], к. ф.-м. н.
[1] ГНЦ АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
ingo.tyan2@mail.ru, klimov_evgenyi@mail.ru, vanaxel@gmail.com
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращены слои $Cd_xHg_{1-x}Te$ на гетероэпитаксиальных структурах CdTe / ZnTe / GaAs(001). Толщины CdTe и ZnTe определены с помощью спектральной эллипсометрии. Посредством *in situ* эллипсометрии устанавливались оптимальные параметры роста, мольная доля кадмия в $Cd_xHg_{1-x}Te$.
Ключевые слова: $Cd_xHg_{1-x}Te$; *in situ* одноволновая эллипсометрия; мольная доля кадмия.

A study of the growth characteristics of $Cd_xHg_{1-x}Te$ on GaAs(001) substrates grown by molecular beam epitaxy using in situ ellipsometry

Grekova A. A.[1,2], Klimov E. A.[1], Ph.D, Vinichenko A. N.[1,2], Ph.D
[1] Orion R&P Association JSC
9 Kosinskaya St., Moscow, 111538, Russia
ingo.tyan2@mail.ru, klimov_evgenyi@mail.ru, vanaxel@gmail.com
[2] National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia

$Cd_xHg_{1-x}Te$ layers were grown on CdTe/ZnTe/GaAs(001) heteroepitaxial structures using molecular beam epitaxy. Spectral ellipsometry allowed determination of the CdTe and ZnTe thicknesses. In situ ellipsometry was used to determine the optimal growth parameters and the mole fraction of cadmium in the $Cd_xHg_{1-x}Te$.
Keywords: $Cd_xHg_{1-x}Te$; in situ single-wavelength ellipsometry; cadmium mole fraction.

Фотоприемники на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ применяются для детектирования среднего (MWIR) и длинноволнового (LWIR) диапазонов инфракрасного излучения (1–14 мкм) [1]. Уникальность этого материала заключается в управлении оптической чувствительностью с помощью мольной доли кадмия x [2]. Синтез $Cd_xHg_{1-x}Te$ осуществляется методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на согласованных ($Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$) и альтернативных подложках (GaAs, Si). Однако данный метод имеет ряд технологических особенностей. Например, коэффициент прилипания атомов ртути близок к нулю при относительно высокой температуре подложки. В то же время параметр x и оптические характеристики активного слоя $Cd_xHg_{1-x}Te$ определяются стехиометрией Hg:CdTe. Поэтому условия роста (температура и стехиометрия Hg:CdTe) могут меняться в процессе и требуют контроля. Оптическая

эллипсометрия, благодаря чувствительности к физическим характеристикам A^2B^6-материалов, позволяет получить информацию об условиях и механизме эпитаксиального роста $Cd_xHg_{1-x}Te$ по временной зависимости ее основных параметров ψ (отношение амплитуд компонент эллиптической поляризации) и Δ (разность фаз компонент эллиптической поляризации) [3].

Поскольку в процессе роста происходит изменение состояния поляризации отраженного луча от растущей структуры, траектория эллипсометрической кривой (ψΔ-монограммы) является следствием ее механизма синтеза. В идеальном случае эпитаксии $Cd_xHg_{1-x}Te$ данная кривая представляет собой непрерывную и замкнутую петлю. Любое отклонение от оптимального варианта указывает на дефектообразование и смену механизма роста с послойного на островковый. Кроме того, центральная точка, к которой стягивается рассматриваемая спираль, является критической, поскольку в ней оптические параметры не меняются. По эллипсометрическим параметрам, располагающимся в данной точке, возможно оценить кристаллическое качество, мольную долю кадмия и, следовательно, оптимальную температуру роста, стехиометрию Hg:CdTe.

В данной работе исследуемые гетероструктуры $Cd_xHg_{1-x}Te$ / CdTe / ZnTe с разной мольной долей кадмия получены МЛЭ-методом на установке *Riber Epineat Cluster* на *epi-ready*-подложках GaAs(001) с использованием бинарных CdTe-, ZnTe- и молекулярных Te-, Hg-источников. Контроль температуры осуществлялся посредством встроенной в нагреватель термопары. Для измерения молекулярных потоков использовался выдвижной датчик Баярда — Альперта. ΨΔ-монограммы исследуемых образцов измерены посредством спектрального эллипсометрического комплекса КЭС-1000 (Россия, Новосибирск, ИФП СО РАН) на длине волны 632,8 нм. Угол падения луча света к плоскости образца составлял 70°.

В результате выполнения работы по экспериментально полученным ψΔ-монограммам определены мольная доля кадмия, оптимальные условия эпитаксиального роста структур $Cd_xHg_{1-x}Te$. Кроме того, были найдены ростовые параметры, влияющие на образование теллуросодержащего слоя на поверхности $Cd_xHg_{1-x}Te$. Полученные результаты актуальны в области изготовления оптически активных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии.

Литература

1. Dvoretsky S. A., Vasiliev V. V., Sidorov G. Y., Gorshkov D. V. HgCdTe Device Technology // Handbook of II-VI Semiconductor-Based Sensors and Radiation Detectors / G. Korotchenkov (eds). Springer, 2023. P. 423–463.
2. Hansen G. L., Schmit J. L., Casselman T. N. Energy gap versus alloy composition and temperature in $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Journal of Applied Physics, 1982. Vol. 53. P. 7099.
3. Эллипсометрический контроль параметров, выращиваемых наноразмерных гетероструктур / В. А. Швец и др. // Известия вузов. Приборостроение, 2009. — № 52 (6). — С. 78–88.

УДК 621.382.032.27

Жидкостное травление ITO для прозрачных контактов HD SiPM

Шувалова А. С., Шишкин А. В., Тюлькова А. А., Габидуллин А. Р., Денисов А. А.
Сколковский институт науки и технологий,
Центр исследовательской инфраструктуры
121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково»,
Большой б-р, 30, стр. 1
a.shuvalova@skoltech.ru

Разработан технологический процесс жидкостного химического травления пленки ITO для формирования прозрачных контактов в составе многопиксельных лавинных фотодетекторов высокой плотности. Установлена зависимость кинетики травления от состава травящего раствора и структуры пленки, что позволило оптимизировать режим травления и обеспечить необходимое качество поверхности для изоляции матриц друг от друга.
Ключевые слова: лавинные фотодетекторы; оксид индия-олова (ITO); жидкостное травление.

Wet etching of ITO for transparent contacts in HD SiPMs

Shuvalova A. S., Shishkin A. V., Tyulkova A. A., Gabidullin A. R., Denisov A. A.
Skolkovo Institute of Science and Technology, Research Facilities Center
30 Bolshoy Blvd., Bldg. 1, territory of the Skolkovo Innovation Center,
Moscow, 121205, Russia
a.shuvalova@skoltech.ru

A technological process for the wet chemical etching of ITO films has been developed to form transparent contacts in high-density multi-pixel avalanche photodetectors. The dependence of the etching kinetics on the etchant composition and film structure has been established, which made it possible to optimize the etching conditions and ensure the required surface quality for isolating the arrays from each other.
Keywords: avalanche photodetectors; indium tin oxide (ITO); wet etching.

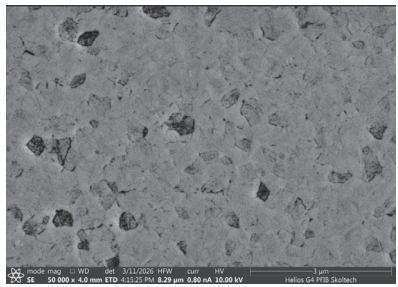
Лавинные фотодетекторы относятся к наиболее распространенному классу полупроводниковых приборов, предназначенных для регистрации оптического излучения. В зависимости от принципа работы выделяют несколько типов их исполнения: аналоговые лавинные фотодиоды (*Avalanche Photodiode, APD*), дискретные однофотонные лавинные диоды (*Single-Photon Avalanche Diode, SPAD*), а также многопиксельные лавинные фотодетекторы (*SiPM*). Последние сочетают в себе преимущества обоих подходов: они способны детектировать единичные фотоны подобно SPAD и одновременно измерять их количество, обеспечивая линейный аналоговый отклик, характерный для APD [1, 2]. Особого внимания заслуживает высокоплотная реализация SiPM (HD SiPM), где ключевую роль играет плотность компоновки элементарных ячеек, позволяющая улучшить динамический диапазон, фоточувствительность и временное разрешение детектора [3].

Одной из технологических задач при производстве HD-SiPM является реализация токопроводящих контактов, которые обеспечивают подвод питания, не перекрывая области *p-n*-переходов для детектирования фотонов. Для формирования прозрачных токопроводящих контактов используют прозрачные проводящие покрытия, среди которых оксид индия-олова (*Indium tin oxide*, *ITO*) является основным материалом благодаря наилучшему значению критерия Хакке (*Haacke's criterion*) на длине волны 905 нм, что делает его оптимальным для прозрачных электродов HD SiPM [4]. Однако процесс жидкостного химического травления ITO остается технологически сложным, поскольку кинетика травления существенно зависит от состава раствора и микроструктуры пленки, что затрудняет достижение требуемого качества поверхности. Стандартные КМОП-процессы предполагают использование плазмохимического травления на основе хлорных газов, однако для формирования подобных структур из ITO требуются отдельные производственные линии из-за высокого риска перекрестного загрязнения.

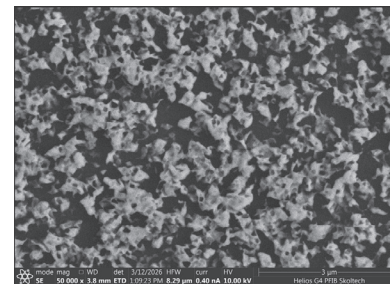
В статье представлены особенности разработанного технологического процесса жидкостного травления пленки ITO через резистивную маску. Для исследования были использованы пленки ITO, сформированные методом электронно-лучевого испарения с ионным ассистированием, который обеспечивает целевые характеристики пропускания (около 90 % при длине волны 905 нм), проводимости (ρ_s = 25 Ом/кв) и однородность состава по толщине пленки.

Многокомпонентный состав ITO является ключевым фактором, определяющим сложность его жидкостного травления: различия в химической стойкости оксидов индия и олова требуют тщательного подбора реагентов раствора, обеспечивающего равномерное удаление без образования нерастворимых остатков [5]. В ходе исследования механизма жидкостного травления установлено, что скорость удаления материала не является постоянной во времени даже для пленок с высокой однородностью состава (рис. 1). Анализ кривой скорости травления во времени показал замедление процесса, одной из причин которого является пассивация поверхности из-за формирования слоя оксида олова. В целях оптимизации режима были исследованы растворы для травления с различным составом, что позволило установить зависимости средней скорости травления от соотношения реагентов и температуры. Дополнительно изучено влияние материала подложки на характер протекания процесса. Полученные данные подтвердили, что структура пленки и состав травителя определяют кинетику травления и точность воспроизведения топологии.

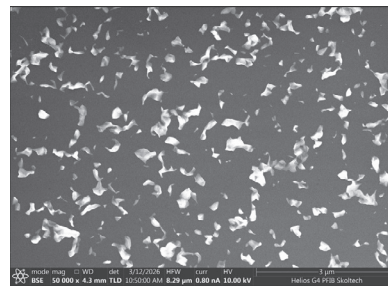
Проведенный комплекс исследований позволил сформулировать практические рекомендации по выбору состава кислотных травителей и режимов процесса для формирования прозрачных электродов с сохранением заданных электрических и оптических характеристик. Разработанный метод жидкостного травления является важным этапом технологического маршрута изготовления лавинных фотодетекторов. Он обеспечивает стабильное качество структур ITO и полную совместимость с последующими операциями.



а



б



в

Рис. 1. СЭМ-снимки поверхности пленок оксида индия-олова (ITO) после травления в течение 5, 20 и 35 минут соответственно

Литература

1. Guo X. Ranging Performance Analysis in Automotive DToF Lidars // arXiv preprint arXiv:2501.17884, 2025.
2. Vinogradov S. L. Evaluation of performance of silicon photomultipliers in lidar applications // Photon Counting Applications 2017. SPIE, 2017. Vol. 10229. P. 92–101.
3. Shushakov D. A. et al. Comparative characteristics of highly sensitive photodetectors for modern lidar systems // Laser Radar Technology and Applications XXIV. SPIE, 2019. Vol. 11005. P. 252–264.
4. Marinova V. et al. Effect of transparent conductive layers on the functionality of liquid crystal devices: Comparison of AZO, FTO and ITO // Optical Materials: X, 2024. Vol. 22. P. 100330.
5. Huang C. J., Su Y. K., Wu S. L. The effect of solvent on the etching of ITO electrode // Materials Chemistry and Physics, 2004. Vol. 84. № 1. P. 146–150.

УДК 537.523.4

Разработка многозазорного газоразрядного генератора наночастиц с использованием обводящих ключей для последовательного пробоя межэлектродных промежутков

Шестаков Н. Р.[1], Васильев С. Я.[1,2], Борисов В. И.[1], Иванов В. В.[1]
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
[2] *Институт физики твердого тела им. Ю. А. Осипьяна РАН 142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2*

Разработан принцип последовательного пробоя нескольких разрядных промежутков для многозазорного газоразрядного генератора наночастиц. Экспериментально измерено повышение энерговыделения в разрядных промежутках. Разработан генератор, увеличивающий производительность наночастиц в 1,5 раза.
Ключевые слова: многозазорный газоразрядный генератор наночастиц; наночастицы алюминия; искровой разряд.

Development of multi-gap gas discharge nanoparticle generator with bypass switches providing sequential activation of breakdowns

Shestakov N. R.[1]

Vasilyev S. Ya.[1,2], Borisov V. I.[1], Ivanov V. V.[1]
[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) 9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia*
[2] *Osipyan Institute of Solid-State Physics RAS 2 Academician Ossipyan Street, Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia*

A principle of sequential breakdown of several discharge gaps was developed for a multi-gap gas-discharge nanoparticle generator. An increase in the energy release in the discharge gaps was experimentally measured. A generator was developed that increases the nanoparticle productivity by a factor of 1.5.
Keywords: multi-gap gas-discharge nanoparticle generator; aluminum nanoparticles; spark discharge.

Метод генерации наночастиц в импульсно-периодическом газовом разряде позволяет получать наночастицы металлов высокой чистоты с малым распределением по размеру первичных наночастиц с использованием в качестве расходников лишь металлических электродов и несущего газа, что позволяет применять его в различных областях: алюминиевые наночастицы применяются в том числе в устройствах УФ-плазмоники [1]. Простота и возможность управлять характеристиками наночастиц в процессе синтеза делают его привлекательным на фоне других газофазных и химических методов синтеза наночастиц, требующих подготовки специальных расходников или постобработки получаемых наночастиц. При этом

существенными недостатками являются низкие энергоэффективность и массовая производительность существующих генераторов.

Классическая схема генератора наночастиц в импульсно-периодическом газовом разряде [2] представляет из себя колебательный контур, где емкостный накопитель C заряжается до напряжения самопробоя промежутка U_0, после чего происходит пробой и в цепи возникают затухающие колебания. В процессе колебаний происходит испарение материала электродов с последующим образованием наночастиц, при этом интенсивность эрозии определяется энергией, выделяющейся непосредственно в разрядном промежутке [3].

Одним из способов повышения доли полезной энергии является увеличение числа разрядных промежутков в контуре. Для достижения включения нескольких промежутков был разработан метод обводящих ключей, позволяющий инициировать вторичные промежутки с напряжением самопробоя до $1{,}6U_0$ после включения первого из промежутков при U_0. Были подобраны параметры установки, позволяющие добиться быстрого включения промежутков и низких потерь энергии на включение промежутков:

$$I_N(t) = \frac{1}{L\omega}\left[\left(U_0 + NU_{gap}\right) - 2NU_{gap}\frac{e^{k\gamma_N T/2}-1}{e^{\gamma_N T/2}-1}\right]e^{-\gamma_N t}\sin(\omega t), \quad (1)$$

$$Q = F\cdot\left(\int |I(t)|\cdot NU_{gap}dt - \frac{CU_0^2}{2(N-1)}\cdot 1{,}5\%\right). \quad (2)$$

Формулы (1), (2) позволяют с высокой точностью рассчитать энерговыделение в межэлектродных промежутках генератора с одной или несколькими парами электродов. В них N –количество межэлектродных промежутков; $R_N = R + R_{gap}\cdot(N-1)$, $\gamma_N = \frac{R_N}{2L}$ –затухание, связанное с активным сопротивлением контура и добавляемых пар электродов; U_{gap} –падение напряжения в межэлектродном промежутке. По данным формулам рассчитано энерговыделение в генераторе алюминиевых наночастиц с одной и двумя парами электродов с $U_0 = 1500$ В и частотой подачи импульсов $F = 500$ Гц (рис. 1).

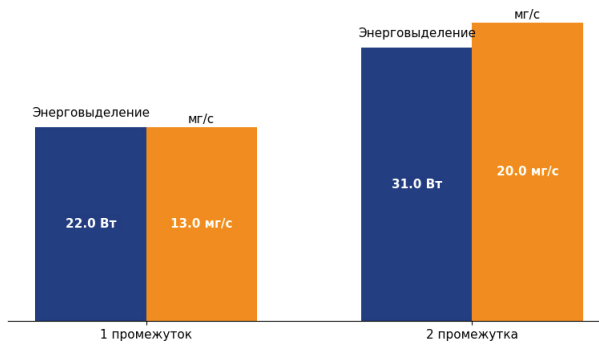


Рис. 1. КПД генератора в зависимости от количества межэлектродных промежутков

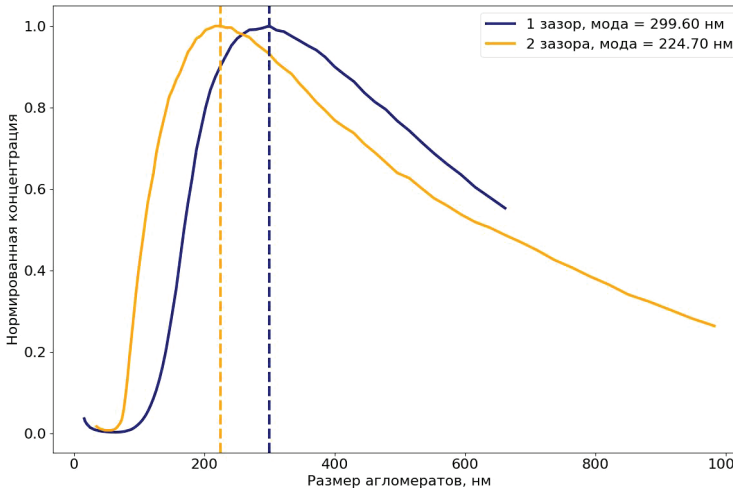


Рис. 2. Сравнение размеров агломератов наночастиц алюминия

Таким образом, предлагаемая схема генератора позволяет увеличить массовую производительность наночастиц алюминия в полтора раза с уменьшением среднего размера их агломератов с 299 до 224 нм.

Литература

1. Borisov V. I. et al. Aluminum nanoparticles synthesis in spark discharge for ultraviolet plasmonics // Journal of Physics: Conference Series, 2020. Vol. 1695. Art. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/1695/1/012021.
2. Tabrizi N. S., Ullmann M., Vons V. A., Lafont U., Schmidt-Ott A. Generation of nanoparticles by spark discharge // Journal of Nanoparticle Research, 2008. Vol. 11. P. 315–332.
3. Mylnikov D. et al. Measuring and optimization of energy transfer to the interelectrode gaps during the synthesis of nanoparticles in a spark discharge // Aerosol Science and Technology, 2019. Vol. 53. № 12. P. 1393–1403.

УДК 539.231

Создание высококачественных тонких органо-неорганических пленок перовскита для применения в оптоэлектронике

Барнёва С. В., Гец Д. С., к. ф.-м. н.
Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49, лит. А

Исследовано формирование тонких пленок органо-неорганических перовскитов $MAPbBr_3$ и $FAPbBr_3$ с помощью жидкостного нанесения. При этом добавление полиэтиленоксида в качестве полимерной матрицы приводит к снижению плотности дефектов и улучшению оптических характеристик.
Ключевые слова: органо-неорганические перовскиты; тонкие пленки; перовскит; полимерный композит; оптоэлектроника.

Synthesis of high-quality thin organic–inorganic perovskite films for optoelectronic applications

Barneva S. V., Gets D. S., Ph.D
ITMO University
49 Kronverksky Ave., Bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia
sofia.barneva@metalab.ifmo.ru, dmitry.gets@metalab.ifmo.ru

The formation of thin organic–inorganic $MAPbBr_3$ and $FAPbBr_3$ perovskite films by solution processing was investigated. The incorporation of polyethylene oxide as a polymer matrix was found to reduce the defect density and improve the optical properties of the films.
Keywords: organic–inorganic perovskites; thin films; perovskite–polymer composite; optoelectronics.

Галогенидные перовскиты являются полупроводниками 4-го поколения и перспективными материалами для оптоэлектронных приложений благодаря высоким оптоэлектронным характеристикам. На их основе уже получают солнечные элементы с эффективностью фотоэлектрического преобразования, сопоставимой с кремниевой технологией. Благодаря растворным методам синтеза возможно создание оптоэлектронных устройств большого размера, что успешно реализовано для перовскитов, применяемых в солнечных элементах. Однако получение высококачественных тонких пленок для других оптоэлектронных устройств, таких как светодиоды, особенно на подложках большой площади, затруднено. Это связано с высокой плотностью дефектов в материале, образующихся в процессе кристаллизации, и сложностью контроля роста зерен.

В данной работе предложен подход к формированию высококачественных пленок органо-неорганических перовскитов $MAPbBr_3$ и $FAPbBr_3$. Формирование пленок осуществлялось методом жидкостного нанесения (спин-коатинг / центрифугирование / spin-coating) на подложки с добавлением полиэтиленоксида (PEO). После нанесения пленки подвергались вакуумированию для удаления остаточного растворителя и отжигу.

Использование полимерной матрицы обеспечивает контроль роста кристаллитов и снижение плотности дефектов, что подтверждается увеличением времени жизни фотолюминесценции и уменьшением порогов усиленного спонтанного излучения. Это приводит к более точному контролю роста кристаллов перовскита на подложках большой площади (>10 $см^2$), уменьшению нерадиационных потерь и улучшению оптических характеристик пленок. Достигнут квантовый выход фотолюминесценции ~60 %.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-73-20189-П, https://rscf.ru/project/21-73-20189.

Литература

1. Chen D. et al. Ultralow trap density FAPbBr3 perovskite films for efficient light-emitting diodes and amplified spontaneous emission // Nature Communications, 2025. Vol. 16. № 1. P. 2367.
2. Pelant I., Valenta J. Luminescence spectroscopy of semiconductors. –Oxford University Press, 2012.
3. Vila M. et al. Morphology engineering of MAPbBr3 thin films for enhanced lighting applications // APL Materials, 2025. Vol. 13. № 7.

УДК 533.69.046

Влияние шероховатости поверхности боросиликатного стекла на качество бондирования методом прямого сращивания

Жуков И. А.[1,2], Фролова А. О.[1], Бикаев Р. И.[1], Кузнецов Е. В.[3]
[1] ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский пр-т, 42, корп. 5, пом. 1Н
ilya.zhukov@mapperllc.ru, alena.frolova@mapperllc.ru, rafael.bikaev@mapperllc.ru
[2] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78
[3] ООО «Активная фотоника»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский пр-т, 10, пом. 44Н/2

Проведены результаты исследований влияния морфологии поверхности боросиликатных стеклянных пластин диаметром 100 мм на качество бондирования методом прямого сращивания. Дана оценка эффективности применения различных методов анализа для количественной оценки параметров поверхности стекла.
Ключевые слова: бондинг; боросиликатные стекла; шероховатость поверхности; прямой метод сращивания; микрофлюидные устройства.

The influence of the surface roughness of borosilicate glass on the quality of bonding by direct bonding

Zhukov I. A.[1,2], Frolova A. O.[1], Bikaev R. I.[1], Kuznetsov E. V.[3]
[1] "Mapper" LLC
room 1H, 42k5 Volgogradsky Ave., Moscow, 109316, Russia
ilya.zhukov@mapperllc.ru, rafael.bikaev@mapperllc.ru alena.frolova@mapperllc.ru
[2] RTU MIREA
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia
[3] "Aktivnaya Fotonika" LLC
Premises 44N/2, 10 Panfilovskiy Ave., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

The results of a study on the influence of the surface morphology of borosilicate glass wafers with a diameter of 100 mm on the quality of direct bonding are presented. An evaluation is given of the effectiveness of various analysis methods for the quantitative assessment of glass surface parameters.
Keywords: bonding; borosilicate glass; surface roughness; direct bonding; microfluidic devices.

На качество бондинга боросиликатных стекол, независимо от используемого метода, влияет множество параметров, одним из наиболее значимых является шероховатость поверхности пластин [1]. В процессе сращивания важное значение имеет эффективная площадь соприкосновения поверхностей. Так как контакт между ними осуществляется на молекулярном уровне, то при избыточной шероховатости эффективная площадь контакта составляет незначительную величину. В результате качество соединения снижается из-за образованных на границе контакта микрополостей, в которых может запираться воздух, загрязнения и влага,

что препятствует формированию прочного соединения. Шероховатость –это базовая характеристика, определяющая стабильность процессов сращивания как с механической точки зрения, так и с точки зрения взаимодействия с химическими реагентами, используемыми для активации поверхности, так как неровности на субмикронном уровне могут вызвать неравномерность удаления материала химическими растворами. Стандартное значение среднего арифметического отклонения поверхности, требуемые для обеспечения качественного бондинга, составляет менее 2 нм [2].

Актуальной задачей является оценка параметров шероховатости поверхности при производстве микрофлюидных устройств. В рамках настоящего исследования оценка поверхности осуществлялась с использованием различных методов, включая получение изображений методом электронной микроскопии, анализ поверхности с помощью оптического профилометра, картирование поверхности методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) [3, 4].

В настоящей работе полученные результаты исследований позволили выявить ключевые различия между сращиваемыми пластинами и обосновать выбор образцов, а также определить оптимальные методы их обработки. При помощи картирования методом АСМ с высокой точностью удалось определить различные значения шероховатости поверхности, такие как среднее арифметическое отклонение поверхности (Sa), полная высота поверхности (St) и среднеквадратичное отклонение поверхности (Sq). Анализ данных параметров показал, что их значения определяются особенностями применяемых методов обработки поверхности и наличием дефектов заводского изготовления пластин. Полученные данные могут использоваться при разработке микрофлюидных устройств.

Литература

1. Скрипченко Ю. С. Шероховатость обработанной поверхности // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2011.
2. Скупов А. Анодное и прямое соединение пластин для микроэлектроники: выбор материалов и ключевые параметры // Вектор высоких технологий, 2015. — № 5 (18). — С. 36–44.
3. Кислова Т. В., Акатьев В. В., Смирнов К. О., Укустов И. М. Влияние длительности термической обработки на шероховатость стекла, исследованную методом атомно-силовой микроскопии // НБИ технологии, 2022. — Т. 16. — № 4. — С. 33–39.
4. Парамонова О. Л., Шардаков Н. Т., Кручинин Д. Ю. Исследование поверхности оптических стекол методом интерферометрии белого света // Оптический журнал, 2021. — Т. 88. — № 1. — С. 76–81.

УДК 66.086.4

Исследование физико-механических и функциональных характеристик тонких пленок титана, полученных методом магнетронного распыления

Темирова Т. И.[1], Жуков И. А.[1], Юркин Н. О.[1,2]
[1] ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский пр-т, 42, корп. 5, пом. 1Н
tamara.temirova@mapperllc.ru, ilya.zhukov@mapperllc.ru,
nikita.yurkin@mapperllc.ru
[2] НИТУ «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1

В работе исследованы характеристики тонких пленок титана, осажденных на подложки кремния и оксида кремния. Рассмотрены зависимости внутренних напряжений, поверхностного сопротивления, структуры пленки и качества ее сцепления с подложкой от параметров магнетронного распыления. Определен оптимальный режим, обеспечивающий наилучшую адгезию титана к кремнию.
Ключевые слова: тонкие пленки; титан; магнетронное распыление; PVD; поверхностное сопротивление; адгезия.

Study of physical, mechanical, and functional characteristics of a titanium layer deposited by magnetron sputtering

Temirova T. I.[1], Zhukov I. A.[1], Yurkin N. O.[1,2]
[1] «Mapper» LLC
room 1H, 42k5 Volgogradsky Ave., Moscow, 109316, Russia
tamara.temirova@mapperllc.ru, ilya.zhukov@mapperllc.ru,
nikita.yurkin@mapperllc.ru
[2] NUST MISIS
4 Leninsky Ave., Moscow, 119049, Russia

The characteristics of thin titanium films deposited on silicon and SiOx substrates were investigated. The dependences of residual stress, sheet resistance, film microstructure, and adhesion to the substrate on magnetron sputtering parameters were studied. An optimal deposition regime providing the highest adhesion of titanium to silicon was determined.
Keywords: thin films; titanium; magnetron sputtering; PVD; sheet resistance; adhesion.

В современных микро- и наноэлектронных технологиях формирование надежных межслойных соединений является одной из ключевых задач. При создании контактных структур на основе кремния требуется использование адгезионных слоев, обеспечивающих стабильность интерфейсов и ограничение диффузионных процессов. Титан широко применяется в качестве такого материала благодаря своим физико-механическим свойствам и хорошей совместимости с кремниевыми подложками [1–4].

Целью данной работы является исследование влияния параметров магнетронного распыления на свойства тонких пленок титана, осажденных на кремниевые подложки и подложки с пленкой SiOx, сформированной методом плазмохимического осаждения из газовой фазы, для определения режимов формирования адгезионного слоя.

Осаждение пленок титана осуществлялось методом магнетронного распыления при варьировании давления аргона и времени процесса, определяющего толщину покрытия. В качестве исследуемых характеристик рассматривались поверхностное сопротивление, внутренние механические напряжения, адгезия и особенности структуры пленок. Для оценки адгезии пленок титана к подложке проводились испытания методом липкой ленты (скотч-тест), позволяющие оценить прочность сцепления покрытия с подложкой при различных режимах осаждения.

Показано, что изменение давления рабочего газа и толщины пленки оказывает существенное влияние на электрические и механические свойства титана. Увеличение толщины пленки приводит к улучшению проводящих свойств, а изменение давления аргона влияет на уровень внутренних напряжений в пленке, что обусловлено кинетикой роста и энергией осаждаемых частиц.

Также установлено, что наличие подслоя SiOx, полученного методом PECVD, влияет на электрические характеристики и уровень внутренних напряжений пленок титана, что необходимо учитывать при формировании многослойных структур.

В результате работы определены диапазоны технологических параметров, обеспечивающие формирование пленок титана с требуемыми свойствами для применения в качестве адгезионного (затравочного) слоя в кремниевых структурах.

Литература

1. Todeschini M., Bastos da Silva Fanta A., Jensen F. et al. Influence of Ti and Cr Adhesion Layers on Ultrathin Au Films // ACS Applied Materials & Interfaces, 2017. Vol. 9. № 42. P. 37374–37385.
2. Roshanghias A., Khatibi G., Pelzer R., Steinbrenner J. On the Effects of Thickness on Adhesion of TiW Diffusion Barrier Coatings in Silicon Integrated Circuits // Surface and Coatings Technology, 2014. Vol. 259. P. 386–392.
3. Vu T. K. O., Lee D. U., Kim E. K. Influence of Titanium Adhesion Layer on Performance of β-Ga_2O_3 Solar-Blind Photodetector // Materials Chemistry and Physics, 2020. Vol. 252. Art. 123248.
4. Wu N., Hu Y., Sun S. Microstructure Characterization and Interfacial Reactions between Au–Sn Solder and Different Back Metallization Systems of GaAs MMICs // Materials, 2020. Vol. 13. Art. 1266.

УДК 533.924

Оптимизация энергетического спектра ионов в низкоэнергетическом плазменном травлении для микроэлектронных применений

Халилуллин Р. Р., Кузьменко В. О., к. ф.-м. н., Мяконьких А. В., д. ф.-м. н.
НИЦ «Курчатовский институт» — ОФТИ им. К. А. Валиева
117218, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36, корп. 1

В работе исследуется влияние формы напряжения смещения на функцию распределения ионов по энергиям (IEDF) в индуктивно-связанной плазме для атомно-слоевого травления (ALE). Показано, что несинусоидальные формы сигнала позволяют формировать более узкие IEDF, которые могут способствовать подавлению паразитного распыления в ALE.
Ключевые слова: индуктивно-связанная плазма; функция распределения ионов по энергиям; ВЧ-смещение; атомно-слоевое травление; распыление.

Optimization of the ion energy distribution in low-energy plasma etching for microelectronic applications

Khalilullin R. R., Kuzmenko V. O., Ph.D, Miakonkikh A. V., Sc.D
NRC "Kurchatov Institute" — Valiev Institute of Physics and Technology
36k1, Nakhimovsky Ave., Bldg. 1, Moscow, 117218, Russia

This study investigates the effect of the bias voltage waveform on the ion energy distribution function (IEDF) in an inductively coupled plasma used for atomic layer etching (ALE). It is shown that non-sinusoidal waveforms enable the formation of narrower IEDFs, which may contribute to the suppression of parasitic sputtering in ALE processes.
Keywords: Inductively coupled plasma; ion energy distribution function; RF bias; atomic layer etching; sputtering.

Плазменное травление десятилетиями остается одним из основных процессов микроэлектронного производства, обеспечивая высокую производительность и равномерность обработки пластин диаметром до 300 мм [1]. С уменьшением технологических норм точность переноса литографического рисунка становится важной задачей, поэтому анизотропное травление выходит на первый план. Реакторы с индуктивно-связанной плазмой (ICP), обладающие двумя независимыми генераторами для создания плазмы и управления смещением, позволяют формировать направленный поток ионов к подложке при низких давлениях [1, 2].

Переход к трехмерным топологиям микросхем потребовал прецизионного контроля удаления материала на уровне монослоя. Атомно-слоевое травление (ALE) –это циклический процесс, включающий стадию химической модификации поверхности и стадию активации реакции на поверхности за счет низкоэнергетической ионной бомбардировки, где обе стадии самоограничены, в идеале позволяет добиться монослойного характера удаления модифицированного материала [3], однако если энергия ионов превышает порог физического распыления исходного (немодифицированного) материала, то возникает паразитное распыление,

нарушающее самоограничение и повреждающее пластину. Энергетический интервал, в котором модифицированный слой полностью удаляется без повреждения нижележащего материала, называют окном ALE [3].

В промышленных ICP-реакторах для создания смещения на пластине обычно используется синусоидальное ВЧ-напряжение. Однако на практике синусоидальное смещение приводит к широкому распределению ионов по энергиям (IEDF) из-за переменного во времени плазменного приэлектродного слоя. Поэтому даже при правильно подобранной средней энергии для окна ALE часть ионов выходит за его пределы и вызывает нежелательное распыление. Значительная доля ионов приобретает энергию выше порога распыления, что приводит к неселективному удалению материала [4]. Альтернативой служит применение несинусоидальных сигналов смещения. Такие формы напряжения могут иметь более узкую IEDF, концентрируя ионный поток внутри окна ALE, что подавляет паразитное физическое распыление нижележащих слоев и повышает воспроизводимость процесса, что особенно востребовано при переходе к многослойным структурам современной микроэлектроники.

Работа выполнена в рамках государственного задания Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Литература

1. Donnelly V. M., Kornblit A. Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow // J. Vac. Sci. Technol. A, 2013. Vol. 31. № 5. P. 050825.
2. Racka-Szmidt K., Stonio B. et al. A Review: Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching of Silicon Carbide // Materials, 2022. Vol. 15. № 123.
3. Yoon M. Y., Yeom H. J. et al. Discharge physics and atomic layer etching in Ar/C_4F_6 inductively coupled plasmas with a radio frequency bias // Phys. Plasmas, 2021. Vol. 28. № 6. P. 063504.
4. Faraz T., Verstappen Y. et al. Precise ion energy control with tailored waveform biasing for atomic scale processing // J. Appl. Phys., 2020. Vol. 128. № 21. P. 213301.

УДК 538.9

Генерация терагерцевого излучения в ван-дер-ваальсовом слоистом сплаве дихалькогенидов переходных металлов

Чиглинцев Э. О.[1,2], Шевякова К. В.[1,2], Шуклин Ф. А.[2], Чернов А. И.[1,2]
[1] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного Центра «Сколково», Большой б-р, 30, стр. 1
[2] Центр фотоники и двумерных материалов, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Двумерные материалы из семейства дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) являются крайне перспективной платформой для оптики благодаря их уникальной способности к эффективному взаимодействию со светом и генерации терагерцевого (ТГц) излучения. В данной работе впервые исследуется ТГц излучатель на основе сплава ДПМ, который ранее не рассматривался в качестве источника в данном диапазоне. Нами был обнаружен новый физический механизм генерации, не наблюдавшийся в чистых материалах этого класса. Данный эффект представляет собой сочетание оптической ректификации и внутриплоскостного тока, происходящего из-за сложной доменной структуры, который приводит к формированию ТГц-сигнала в геометрии, перпендикулярной плоскости материала. Такая необычная геометрия открывает новые пути для интеграции 2D-излучателей в современные ТГц устройства. Полученные результаты закладывают фундамент для создания настраиваемых и компактных источников ТГц-диапазона для нужд биомедицины и фотоники.

Ключевые слова: терагерц; двумерные материалы; сплавы ДПМ; терагерц для медицины.

Perspective THz source based on a two-dimensional alloy: from physics of mechanisms to compact devices

Chiglintsev E. O.[1,2], Shevyakova K. V.[1,2], Shuklin F. A.[2], Chernov A. I.[1,2]
[1] Russian Quantum Center
30 Bolshoy Blvd., Bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russia
[2] Center for Photonics and 2D Materials, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

Two-dimensional (2D) transition metal dichalcogenides (TMDCs) represent a highly promising platform for optics due to their unique ability for efficient light-matter interaction and terahertz (THz) generation. This work presents the first study of a THz emitter based on a TMDC alloy, which has not been previously considered as a source in this frequency range. We have discovered a novel physical generation mechanism not observed in the pure materials of this class. This effect arises from a combination of optical rectification and in-plane currents stemming from a complex domain structure, leading to the formation of a THz signal in a geometry perpendicular to the material

plane. Such an unconventional geometry opens new avenues for integrating 2D emitters into modern THz devices. The results obtained lay the foundation for developing tunable and compact THz sources for biomedical and photonic applications.

Keywords: THz; 2D materials; TMDC alloys; biomedical THz applications.

Двумерные дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) являются ключевыми материалами для оптоэлектроники благодаря настраиваемым оптическим свойствам и сильному свето-материальному взаимодействию [1]. Известно, что в чистых ДПМ ТГц-излучение эффективно генерируется вдоль поверхности образца, что неудобно для регистрации сигнала [2] и, следовательно, неэффективно для целей медицинского диагностирования. Как логическое развитие, нами впервые исследуется сплав ДПМ, обладающие доменной структурой [3], открывающий новый путь управления ТГц волнами. В данной работе мы обнаружили механизм, генерирующий излучение перпендикулярно плоскости образца, что критически важно для создания компактных диагностических устройств.

Для детальной характеризации механизмов ТГц-генерации и структуры образцов мы реализовали комплексную методику измерений для двух энергий накачки (выше и ниже энергии запрещенного уровня материала):

- была исследована зависимость ТГц-отклика от мощности накачки, что позволило определить физическую природу генерации ТГц-излучения;
- выявлена зависимость ТГц-излучения от азимутального вращения образца, а также от вращения поляризации накачки для анализа кристаллографической анизотропии и симметрии образца;
- исследовано ТГц-излучение при различных углах падения луча накачки, для разделения вкладов от внутриплоскостных и внеплоскостных полей;

Таким образом, нами было продемонстрировано:

- терагерцовая эмиссионная спектроскопия является эффективным методом для бесконтактной характеризации структуры двумерных сплавов;
- выявлена уникальная геометрия распространения ТГц волн, обусловленная комбинацией вкладов от внутриплоскостных и внеплоскостных электрических полей;
- оценена напряженность индуцированного внутриплоскостного поля по порядку величины сопоставима с внеплоскостным полем;

Результаты нашей работы показывают, что излучатели на основе сплавов ДПМ представляют собой источник ТГц-излучения с новой геометрией, сохраняя оптические свойства чистых ДПМ, что может вызвать интерес в нуждах фотоники и медицины.

Литература

1. S. Li, H. Wang, J. Wang, H. Chen, and L. Shao. Control of light–valley interactions in 2D transition metal dichalcogenides with nanophotonic structures // Nanoscale, 2021. Vol. 13. № 13. P. 6357–6372. DOI: 10.1039/D0NR08000D.
2. Wu Y., Wang, Y., Bao, D. et al. Emerging probing perspective of two-dimensional materials physics: terahertz emission spectroscopy // Light Sci. Appl., 2024. 13, 146. DOI: 10.1038/s41377-024-01486-2.
3. P. Bampoulis, K. Sotthewes, M. H. Siekman, and H. J. W. Zandvliet. Local Conduction in $Mo_xW_{1-x}Se_2$: The Role of Stacking Faults, Defects, and Alloying // ACS Appl. Mater. Interfaces, 2018. Vol. 10. № 15. P. 13218–13225. DOI: 10.1021/acsami.8b01506.

УДК 621.373.826:621.383

Радиофотонный генератор перестраиваемого СВЧ-сигнала на основе оптического гетеродинирования DFB-лазеров

Сафина Н. А., Булатов К. М., к. т. н., Зайцев Д. Л., к. ф.-м. н., Андреев С. Н., д. ф.-м. н., Янченко С. Г.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1
safina.na@mipt.ru

Разработан и экспериментально исследован макет радиофотонного генератора перестраиваемого СВЧ-сигнала на основе биений двух DFB-лазеров на фотодетекторе. Показана перестройка разностной частоты в диапазоне 3,54–14,27 ГГц.
Ключевые слова: радиофотоника; СВЧ-генератор; DFB-лазер; фотодетектор; оптическое гетеродинирование; перестройка частоты.

Microwave Photonic Generator of a Tunable RF/Microwave Signal Based on Optical Heterodyning of DFB Lasers

Safina N. A., Bulatov K. M., Ph.D, Zaitsev D. L., Ph.D, Andreev S. N., Sc.D, Yanchenko S. G.
Moscow Institute of Physics and Technology
1A Kerchenskaya St., Bldg. 1, Moscow, 117303, Russia
safina.na@mipt.ru

A prototype of a radio-photonic generator of a tunable microwave signal based on the beating of two DFB lasers on a photodetector has been developed and experimentally investigated. Frequency tuning of the difference signal in the range of 3.54–14.27 GHz has been demonstrated.
Keywords: microwave photonics; microwave generator; DFB laser; photodetector; optical heterodyning; frequency tuning.

Актуальность работы связана с необходимостью формирования перестраиваемых СВЧ-сигналов с широким диапазоном частот и высокой скоростью перестройки. Такие источники востребованы при исследованиях ЭМС, испытаниях приемных трактов, моделировании сложной электромагнитной обстановки и в радиофотонных измерительных системах. Классические электронные синтезаторы ограничены по быстродействию, фазовому шуму и сложности широкополосного тракта. Радиофотонный подход позволяет перенести формирование частоты в оптическую область, где перестройка лазерного излучения преобразуется в перестройку СВЧ-сигнала после фотодетектирования [1].

В работе рассматривается двухлазерный радиофотонный генератор, в котором СВЧ-сигнал формируется за счет оптического гетеродинирования [2]. Основу схемы составляют два термостабилизированных одномодовых DFB-лазера с длинами волн вблизи 1550 нм, излучение которых объединяется в оптическом тракте и подается на высокоскоростной фотодетектор [2, 3].

В линейной оптической среде электрические напряженности складываются по принципу суперпозиции: $E(t) = E_1(t) + E_2(t)$, где $E_1(t) = A_1\cos(\omega_1 t + \varphi_1)$, $E_2(t) = A_2\cos(\omega_2 t + \varphi_2)$. Фототок пропорционален падающей оптической мощности:

$$i(t) \propto |E(t)|^2 = A_1^2\cos^2(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2^2\cos^2(\omega_2 t + \varphi_2) + 2A_1A_2\cos(\omega_1 t + \varphi_1)\cos(\omega_2 t + \varphi_2).$$

После тригонометрических преобразований выражение содержит постоянную составляющую $\frac{1}{2}\left(A_1^2 + A_2^2\right)$; компоненты с частотами $2\omega_1$, $2\omega_2$ и $\omega_1 + \omega_2$ лежащие в оптическом диапазоне, а также разностную компоненту:

$$i_{RF}(t) \sim A_1A_2\cos\{(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)\}.$$

Высокочастотные оптические составляющие исчезают при усреднении и не воспроизводятся электрическим трактом фотодетектора, постоянная составляющая отсекается СВЧ-трактом. Поэтому полезная частота выходного сигнала равна $\omega_{RF} = |\omega_1 - \omega_2|$.

Перестройка выходной частоты осуществляется изменением частоты генерации одного из DFB-лазеров. Грубая настройка обеспечивается термостабилизацией на элементе Пельтье: изменение температуры меняет эффективный показатель преломления и период брэгговской структуры. Быстрая подстройка реализуется изменением тока лазерного диода, влияющего на температуру и концентрацию носителей в активной области.

В экспериментальном макете при изменении тока одного из лазеров в диапазоне 33–70 мА была получена перестройка разностной частоты от 3,54 до 14,27 ГГц. В стационарном режиме ширина спектральной линии составляла порядка 15 кГц. При изменении управляющего тока с частотой 1 МГц наблюдалась перестройка СВЧ-сигнала в диапазоне 1,3–3 ГГц.

Двухлазерный радиофотонный генератор может использоваться как компактный широкополосный источник перестраиваемого СВЧ-сигнала. Его преимуществами являются широкий диапазон рабочих частот, высокая скорость перестройки, отсутствие широкополосного электронного синтезатора и совместимость с волоконно-оптическими трактами. Схема перспективна для задач электромагнитной совместимости, формирования тестовых электромагнитных воздействий, испытаний устойчивости радиоприемных устройств и радиофотонных измерительных систем [4, 5].

Литература

1. Seeds A. J. Microwave Photonics / A. J. Seeds, K. J. Williams // Journal of Lightwave Technology, 2006. Vol. 24. № 12. P. 4628–4641.
2. Stable Arbitrary Frequency Generator / T. Komljenovic, B. Szafraniec, D. M. Baney, J. E. Bowers // Journal of Lightwave Technology, 2017. Vol. 35. № 22. P. 4897–4902.
3. Thorette A. Synchronization of Two DFB Lasers Using Frequency-Shifted Feedback for Microwave Photonics / A. Thorette, M. Romanelli, M. Vallet // IEEE Journal of Quantum Electronics, 2019. Vol. 55. № 1. Art. no. 2200108.
4. Pan S. Microwave Photonic Radars / S. Pan, Y. Zhang // Journal of Lightwave Technology, 2020. Vol. 38. № 19. P. 5450–5484.
5. Machine Learning–Based Time-Domain Processing of SFCW-GPR Signals for Void Detection in Road Pavements / V. Shlykov, S. Guzhov, N. Safina, Y. Gordeev // 2025 7th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 2025. P. 1–5.

УДК 535.8

Численное моделирование элементов CWDM-демультиплексора на основе кольцевых резонаторов

Кузнецов И. В.[1], Перин А. С.[1,2], к. т. н.
[1] *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*
634050, г. Томск, ул. Ленина, 40
igor.v.kuznetsov@tusur.ru
[2] *Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН*
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Проведено численное моделирование элементов CWDM-демультиплексора на основе racetrack-резонаторов. Исследовано влияние геометрии на выделение канала 1331 нм и перекрестных подавление помех.
Ключевые слова: CWDM; нитрид кремния; фотонная интегральная схема.

Numerical Modeling of CWDM Demultiplexer Elements Based on Ring Resonators

Kuznetsov I. V.[1], Perin A. S.[1,2], Ph.D.
[1] *Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*
40 Lenina St., Tomsk, 634050, Russia
igor.v.kuznetsov@tusur.ru
[2] *V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics,*
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
1 Akademika Zueva Sq., Tomsk, 634021, Russia

Numerical modeling of CWDM demultiplexer elements based on racetrack resonators was performed. The influence of the geometry on the extraction of the 1331 nm channel and crosstalk suppression was investigated.
Keywords: CWDM; silicon nitride; photonic integrated circuit.

Рост требований к пропускной способности волоконно-оптических систем связи приводит к широкому применению спектрального уплотнения каналов, в частности технологии CWDM. Подобные устройства могут применяться не только в системах оптической связи, но и в измерительных комплексах СВЧ-диапазона, где они используются в схемах стабилизации фазы СВЧ-сигнала при передаче по оптоволокну [1].

Для реализации демультиплексоров в фотонике используются различные подходы, включая решетки на основе дифракционных структур (AWG), интерференционные фильтры и устройства на основе кольцевых резонаторов. По сравнению с альтернативными решениями, резонаторные структуры обладают высокой компактностью, технологической совместимостью с интегральной фотоникой и возможностью точной настройки спектральных характеристик за счет изменения геометрии.

В данной работе рассматривается численное моделирование элементов CWDM-демультиплексора на основе кольцевых резонаторов с топологией типа

racetrack, которая обеспечивает более гибкую настройку спектральных характеристик за счет независимости длины связи кольца с резонатором от радиуса кольца, что упрощает управление спектральными характеристиками. Целью работы является численное моделирование коэффициента передачи элементов CWDM-демультиплексора на основе кольцевых резонаторов на Si_3N_4 на изоляторе SiO_2.

На рис. 1 приведена схема, рассматриваемой в работе топологии racetrack, на которой красными стрелками и пунктиром демонстрируется направление распространения оптического излучения.

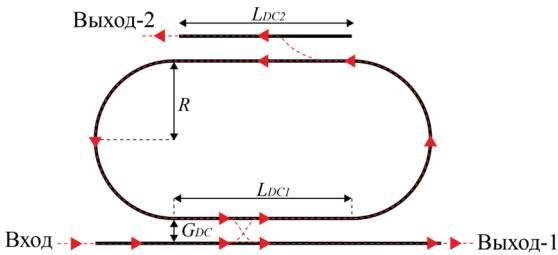
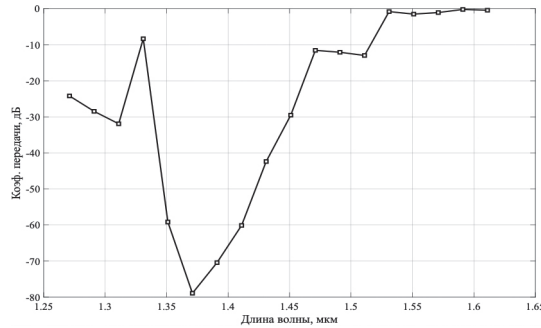


Рис. 1. Racetrack-топология: R –радиус дуги, G_{DC} –зазор в направленном ответвителе, $L_{DC1,2}$ –длины связи в направленных ответвителях

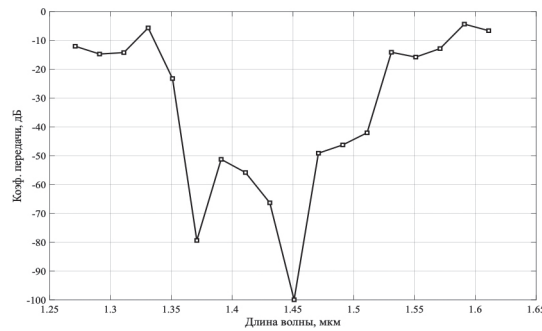
Поскольку, определенная стандартом [2], сетка CWDM имеет 18 каналов и шаг 20 нм между ними, практически невозможно выделить один канал используя одно кольцо в виду того, что FSR кольцевых резонаторов составляет единицы нм. Поэтому в этой работе рассматривается схема устройства из двух последовательно подключенных racetrack-резонаторов с различающимися геометрическими параметрами, где к выходу-2 первого резонатора подключен вход второго резонатора. На рис. 2(а) представлена зависимость коэффициента передачи кольцевого через выход-2 второго резонатора с параметрами $LDC_{1,2}$ 90 мкм, R = 46,3 мкм для обоих колец, на рис. 2(б) для случая, где первый резонатор: L_{DC1} = 90 мкм, L_{DC2} = 75 мкм, R = 46,3 мкм; второй резонатор: $L_{DC1,2}$ = 75 мкм, R = 51,075 мкм. Для всех случаев ширина волноводов составляла 1 мкм, G_{DC} = 250 нм, показатели преломления были взяты из [3, 4].

Как видно из рис. 2*а* и 2*б*, обе конфигурации позволяют выделить канал 1331 нм. При этом схема 2б хуже подавляет соседние каналы (1271, 1291 и 1311 нм), но обеспечивает более высокий коэффициент передачи на 1331 нм по сравнению с 2а (−5,6 дБ против −8,33 дБ). Перекрёстные помехи могут быть снижены за счет предварительного каскадирования резонаторов, выделяющих соседние каналы. Высокая передача в диапазоне 1451–1611 нм обусловлена характеристиками направленного ответвителя (L_{DC1} = 90 мкм) и может быть уменьшена добавлением селективного ответвителя на входе.

Таким образом, были рассмотрены элементы, которые могут быть использованы для фильтрации канала в 1331 нм в CWDM-системах. Дальнейшая работа будет направлена на исследование элементов для фильтрации других каналов и на поиск оптимальной конфигурации их каскадирования.



а



б

Рис. 2. Коэффициенты передачи в сетке CWDM

Литература

1. Yin F. et al. Phase-conjugation-based fast RF phase stabilization for fiber delivery // Optics express, 2014. Vol. 22. № 1. P. 878–884.
2. ITU-T G.694.2. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid. Geneva: ITU-T, 2003. 12 p.
3. Malitson I. H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica // Journal of the optical society of America, 1965. Vol. 55. № 10. P. 1205–1209.
4. Luke K. et al. Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si3N4 microresonator // Optics letters, 2015. Vol. 40. № 21. P. 4823–4826.

УДК 538.958

Электростатический контроль экситонного отклика гетероструктур на основе двумерных полупроводников

Абрамов А. Н.[1], Чиглинцев Э. О.[2,3], Осколкова Т. О.[1], Бандурин Денис А.[4], Иорш И. В.[2], Чернов А. И.[2,3], Кравцов В. А.[1]
[1] Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49, лит. А
ITMO University
49 Kronverksky Ave., Bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia
[2] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного Центра «Сколково», Большой б-р, 30, стр. 1
[3]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[4]Национальный университет Сингапура
Сингапур

В работе продемонстрировано, что изменение концентрации зарядов в гетероструктуре WSe_2/WS_2 позволяет формировать сильно-коррелированные электронные фазы и перестраивать спектральное положение и интенсивность экситонных резонансов.
Ключевые слова: двумерные полупроводники; экситонный отклик; сильно-коррелированная фаза; электростатический контроль.

Electrostatic control of the excitonic response in heterostructures based on two-dimensional semiconductors

Abramov A. N.[1], Chiglintsev E. O.[2,3], Oskolkova T. O.[1], Bandurin D. A.[4], Iorsh I. V.[2], Chernov A. I.[2,3], Kravtsov V. A.[1]
[1] ITMO University, St. Petersburg, Russia
[2] Russian Quantum Center
30 Bolshoy Blvd., Bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russia
[3] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[4]National University of Singapore
Singapore

The work demonstrates that varying the charge carrier concentration in a WSe_2/WS_2 heterostructure makes it possible to form strongly correlated electronic phases and tune the spectral position and intensity of excitonic resonances.
Keywords: two-dimensional semiconductors; excitonic response; strongly correlated phase; electrostatic control.

Двумерные ван-дер-ваальсовы гетероструктуры представляют собой перспективную платформу для исследования коллективных квантовых состояний и их

оптического считывания. В муаровых структурах сильное кулоновское взаимодействие и пространственная периодичность потенциала создают условия для формирования коррелированных фаз, качественно меняющих спектр межслоевых экситонов [1–3].

В работе исследовано электростатическое управление оптическим откликом гетероструктуры WSe2/WS2. Путем управления концентрацией носителей заряда продемонстрировано формирование несжимаемых коррелированных состояний при целочисленном и дробном заполнении n муаровой ячейки. Формирование коррелированных состояниях сопровождается скачкообразными сдвигами энергии и усилением фотолюминесценции межслоевого экситона. Кроме того, показано, что пространственная неоднородность муарового потенциала в пределах лазерного пятна приводит к непрерывному сдвигу локальных максимумов фотолюминесценции вблизи дробных заполнений.

Полученные результаты важны для разработки оптически считываемых и управляемых квантовых состояний в двумерных полупроводниках. Электростатический подход обеспечивает динамическое и обратимое управление экситонным откликом без внесения дополнительных структурных дефектов и открывает возможности для создания новых квантово-оптических и оптоэлектронных устройств, а также фотонных фипов.

Литература

1. Lian Z. et al. Valley-polarized excitonic Mott insulator in WS2/WSe2 moire superlattice // Nat. Phys., 2024. Vol. 20. P. 34–39.
2. Regan E. C. et al. Mott and generalized Wigner crystal states in WSe2/WS2 moire superlattices // Nature, 2020. Vol. 579. P. 359–363.
3. Devenica L. M. et al. Collective photon emission and ferroelectric exciton ordering near Mott insulating state in WSe2/WS2 heterobilayers // Nature Materials, 2026. P. 1–7.

УДК 539.231

Достижение низкого порога усиленной спонтанной люминесценции в тонких пленках квазидвумерного перовскита

Дыкова А. В.[1], Гец Д. С.[1], к. ф.-м. н.
Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49, лит. А
nastadykova544@gmail.com, dmitry.gets@metalab.ifmo.ru

Исследована зависимость оптических свойств тонких пленок квазидвумерного органо-неорганического перовскита $BA_2Cs_{n-1}Pb_nBr_{3n+1}$ от параметров жидкостного синтеза при разных значениях n. Выявлены оптимальные условия изготовления, при которых достигается низкопороговая усиленная спонтанная люминесценция.
Ключевые слова: квазидвумерные перовскиты; фотолюминесценция; порог усиленной спонтанной люминесценции.

Achievement of a low amplified spontaneous emission threshold in thin films of quasi-two-dimensional perovskite.

Dykova A. V., Gets D. S., Ph.D
ITMO University
49 Kronverksky Ave., Bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia
nastadykova544@gmail.com, dmitry.gets@metalab.ifmo.ru

The optical properties of quasi-two-dimensional organic–inorganic perovskite $BA_2Cs_{n-1}Pb_nBr_{3n+1}$ thin films were investigated as a function of solution-processing parameters at different n values. Optimal fabrication conditions yielding a low amplified spontaneous emission threshold were identified.
Keywords: quasi-two-dimensional perovskites; photoluminescence; amplified spontaneous emission threshold.

Перовскиты являются многообещающими материалами для применения в нанофотонике благодаря своей кристаллической структуре, которая позволяет путем химического инжиниринга настраивать их оптические и оптоэлектронные характеристики без использования дорогого оборудования и сложного химического синтеза.

Данные материалы имеют такие преимущества как:

- возможность перестройки по спектру
- низкая себестоимость и простота синтеза
- высокая толерантность к дефектам

Главным недостатком перовскитов является их неустойчивость. Они способны достигать высокой эффективности преобразования излучательной энергии, но при этом склонны быстро деградировать под действием окружающей среды, в частности влаги, кислорода, температуры. Одним из способов повышения стабильности перовскитов является добавление органических молекул. При этом можно добиться формирования слоистых структур Руддлесдена — Поппера. Такие

структуры называются квазидвумерными (квази-2D) и демонстрируют свойства мультиквантовых ям (рис. 1).

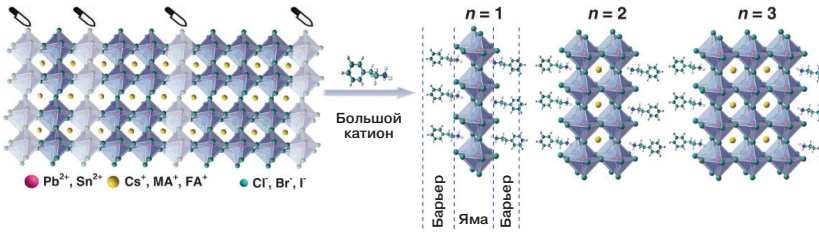


Рис. 1. Структура квази-2D перовскита [1]

Общая формула галогенидных перовскитов Руддлсдена — Поппера $A'_2A_{n-1}B_nX_{3n+1}$, где A' –длинный органический катион, A – одновалентный катион металла, B –двухвалентный катион металла, а X –галогенидный анион. Параметр n здесь демонстрирует количество октаэдров в одном слое неорганического перовскита. Такие неорганические слои чередуются со слоями гидрофобных органических молекул, благодаря чему возникает эффект диэлектрического ограничения и повышается энергия связи экситонов. Поскольку в квазидвумерных перовскитах излучательная рекомбинация происходит преимущественно за счет рекомбинации экситонов, варьируя параметр n и химический состав, мы можем достичь тонкой перестройки по спектру (рис. 2).

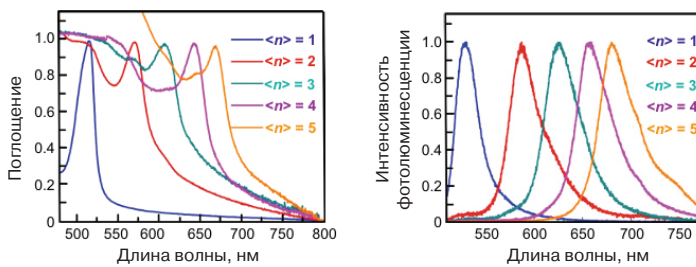


Рис. 2. Влияние параметра n на спектр фотолюминесценции [2]

Одним из наиболее популярных методов синтеза перовскитных пленок является метод центрифугирования в силу его простоты и дешевизны. Именно он использовался в данной работе. Синтез состоял из нескольких этапов: нанесение, вакуумный отжиг и финальный отжиг. Была проведена оптимизация параметров синтеза и выяснилось, что при изменении температуры вакуумирования можно достичь формирования пленок, которые демонстрируют высокий квантовый выход фотолюминесценции, что свидетельствует о низкой плотности дефектов. Данные образцы также продемонстрировали низкий порог усиленной спонтанной люминесценции (рис. 3), чего обычно трудно достичь у квази-2D перовскитов в связи с их высокой энергией связи экситонов [3].

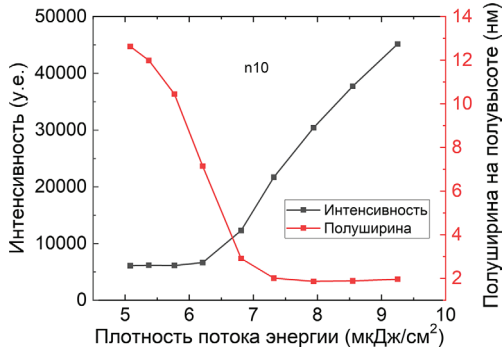


Рис. 3. Пороги усиленной спонтанной люминесценции

Выводы

Полученный результат говорит о том, что данные пленки могут быть использованы в качестве активного слоя перовскитных светоизлучательных диодов сине-зеленого диапазона.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-62-00022, https://rscf.ru/project/24-62-00022.

Литература

1. Zhang L. et al. High-performance quasi-2D perovskite light-emitting diodes: from materials to devices // Light: Science & Applications, 2021. Vol. 10. № 1. P. 61.
2. Ren M. et al. Advances and challenges in two-dimensional organic–inorganic hybrid perovskites toward high-performance light-emitting diodes // Nano-Micro Letters, 2021. Vol. 13. № 1. P. 163.
3. Li Y. et al. Exciton versus free carrier emission: Implications for photoluminescence efficiency and amplified spontaneous emission thresholds in quasi-2D and 3D perovskites // Materials Today, 2021. Vol. 49. P. 35–47.

УДК 535.3

Изучение экситонных комплексов в ненапряженных квантовых точках GaAs/AlGaAs

Башегурова Е. А., Капитонов Ю. В.
Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
e.bashegurova@spbu.ru

Методами оптической спектроскопии исследованы одиночные квантовые точки (КТ) GaAs/AlGaAs. Проведен статистический анализ распределения энергий экситонов (X) и биэкситонов (XX) в КТ двух типов –A и B, сделаны выводы об однородности ансамблей.
Ключевые слова: квантовые точки; GaAs/AlGaAs; экситонные комплексы.

Study of exiton complexes in unstrained GaAs/AlGaAs quantum dots

Bashegurova E. A., Kapitonov Yu. V., Ph.D
Saint Petersburg State University
7–9 Universitetskaya Nab., St. Petersburg, 199034, Russia
e.bashegurova@spbu.ru

Single GaAs/AlGaAs quantum dots (QDs) were investigated using optical spectroscopy methods. A statistical analysis of the energy distribution of excitons (X) and biexcitons (XX) was performed for two types of QDs (Type A and Type B), and conclusions regarding the homogeneity of the ensembles were drawn.
Keywords: quantum dots; GaAs/AlGaAs; exciton complexes.

Гетероструктуры с КТ применяются в источниках одиночных фотонов [1]. Использование ненапряженных КТ, создаваемых методом эпитаксиального заполнения наноотверстий под каплями галлия, позволяет создавать образцы с желаемой плотностью распределения и размером КТ благодаря разделению процессов образования капель Ga на подложке GaAs и заполнения наноотверстий. Для применения таких КТ необходимо изучить свойства X и XX в них, а также определить однородность ансамбля КТ.

Плотность ансамбля КТ в исследуемом образце –0,25 мкм$^{-2}$. Такое значение достигнуто путем уменьшения скорости потока нанесения капель Ga в 10 раз по сравнению с изученным ранее образцом с плотностью 1 мкм$^{-2}$ [2]. Низкая плотность позволяет оптически адресовать одну КТ для исследования ее фотолюминесценции (ФЛ) (рис. 1).

В спектре ФЛ на рис. 1 выделены следующие полосы излучения:

- КТ A: X (E = 1,597 эВ) и XX (E = 1,594 эВ);
- КТ B: X (E = 1,682 эВ) и XX (E = 1,678 эВ);
- Фоновые полосы (*) (E = 1,649 эВ, E = 1,702 эВ, E = 1,723 эВ) –технические слои гетероструктуры;
- Легкодырочные X в квантовой яме (E = 1,824 эВ) [2].

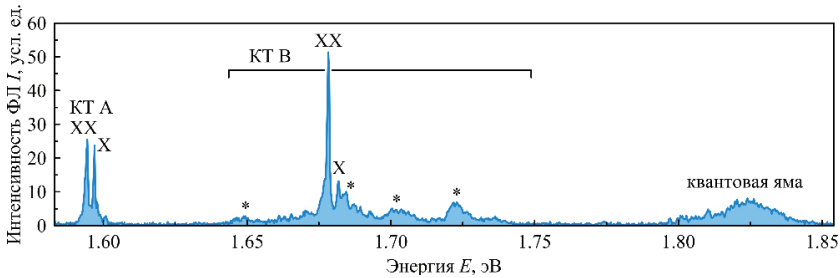
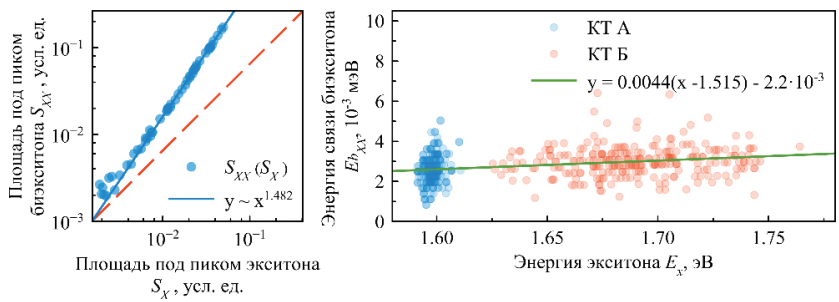


Рис. 1. Спектр ФЛ одиночной КТ, $\lambda_{лазер} = 532$ нм, $P_{лазер} = 2{,}334$ мкВт, $T = 4$ К

Для подтверждения природы полос X и XX для КТ А было проведено исследование зависимости интенсивности ФЛ от мощности лазера накачки, определена площадь пиков X и XX — S_X и S_{XX} соответственно. Эти значения были сопоставлены друг другу при равной мощности лазера на рис. 2*а*, полученная зависимость сверхлинейна, то есть $E = 1{,}597$ эВ –X, $E = 1{,}594$ эВ –XX.

В исследуемом образце содержится множество КТ, по спектрам их ФЛ был проведен статистический анализ однородности их свойств. При сканировании образца пятном лазера в направлении кристаллографической оси [110] были получены спектры ФЛ отдельных участков образца, по ним было построено распределение энергии связи XX в КТ от энергии X (рис. 2*б*).



а *б*

Рис. 2. *а*) Зависимость S_{XX} от S_X (точками), аппроксимация экспериментальных данных – синяя сплошная прямая; *б*) зависимость энергии связи XX в КТ А и В от энергии X

Разброс по энергиям X в КТ А в 10 раз меньше, чем для КТ В. То есть, КТ А между собой более одинаковы, чем КТ В. Видно, что с ростом энергии X возрастает и энергия связи XX, что объясняется бóльшим перекрыванием волновых функций в меньшем объеме КТ.

Таким образом, в работе экспериментально наблюдались отдельные пики X и XX в КТ, произведен статистический анализ ансамблей КТ, где более однородные КТ А – эпитаксиально заполняемые наноотверстия. Результаты работы имеют практическое применение в дальнейших приложениях исследуемых гетероструктур.

Работа выполнена на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Нанофотоника».

Литература

1. Somaschi N. et al. Near-optimal single-photon sources in the solid state // Nature Photon, 2016. 10. P. 340–345.
2. Deribina E. I. et al. Spatially-resolved emission of GaAs/AlGaAs quantum dots grown by nanohole-filled droplet epitaxy // Phys. Review B, 2023. 108. P. 205305

УДК 621.383

Синтез и фотофизические характеристики ККТ HgSe@CdSe со структурой ядро-оболочка для детектирования в ИК-диапазоне

Чемакина Я. А., Королева Т. В., Хакимов К. Т., Сапцова О. А., Яковлев В. О., Медведев А. Г. Попов В. С.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
chemakina.iaa@phystech.edu

Выполнен синтез коллоидных квантовых точек HgSe@CdSe методом горячей инжекции. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия подтвердила формирование структуры ядро–оболочка. Фотоэлектрические измерения зафиксировали отклик в ИК-диапазоне, что указывает на перспективность структур для ИК-фотосенсорики.
Ключевые слова: коллоидные квантовые точки; горячая инжекция; фотосенсоры.

Synthesis and photophysical characteristics of HgSe@CdSe core-shell CQDs for detection in the infrared range

Chemakina Y. A., Koroleva T. V., Khakimov K. T., Saptsova O. A., Yakovlev V. O., Medvedev A. G., Popov V. S.
Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
chemakina.iaa@phystech.edu

HgSe@CdSe colloidal quantum dots were synthesized via hot injection. Energy-dispersive X-ray spectroscopy confirmed the formation of a core–shell structure. Photoelectric measurements recorded an IR range response, indicating the potential of these structures for IR photosensor applications.
Keywords: colloidal quantum dots; hot injection; photosensors.

Коллоидные квантовые точки (ККТ) –это полупроводниковые нанокристаллы, свойства которых определяются эффектом квантового ограничения. Оптические и электронные характеристики ККТ могут изменяться в зависимости от размера частиц. Одним из основных методов получения ККТ является метод горячей инжекции, обеспечивающий узкое распределение по размерам за счет регулировки параметров синтеза [1].

Особое внимание привлекают ККТ HgSe, для которых характерен широкий диапазон регулирования положения пика поглощения [2]. Ключевая особенность HgSe –наличие внутризонного перехода в ИК-области, что обеспечивает селективность детектирования [3]. Однако ККТ HgSe склонны к окислению, а поверхностные ловушки снижают подвижность носителей. Одним из решений этой проблемы является формирование гетероструктур типа ядро–оболочка, где ядро ККТ

защищено слоем более стабильного и широкозонного полупроводника, например CdSe. Кроме того, формирование оболочки способствует улучшению транспортных свойств и увеличению фототока за счет уменьшения захвата носителей на поверхностные ловушки [4].

Синтез HgSe@CdSe по модифицированной методике [5] включал стадию формирования ядер HgSe методом горячей инжекции с последующим наращиванием оболочки CdSe с использованием растворов прекурсоров кадмия и селена.

Исследование спектральных характеристик полученных ККТ проводили методом ИК-Фурье спектроскопии (рис. 1*а*). Размер полученных ККТ был определен методом просвечивающей электронной микроскопии (рис. 1*б*). Методами энергодисперсионной спектроскопии и оптической спектроскопии подтверждено формирование оболочки CdSe на поверхности ядер HgSe при отсутствии отдельных частиц CdSe. Измерения фотоотклика фоторезисторов показали генерацию сигнала в ИК-области, подтверждая работоспособность гетероструктур.

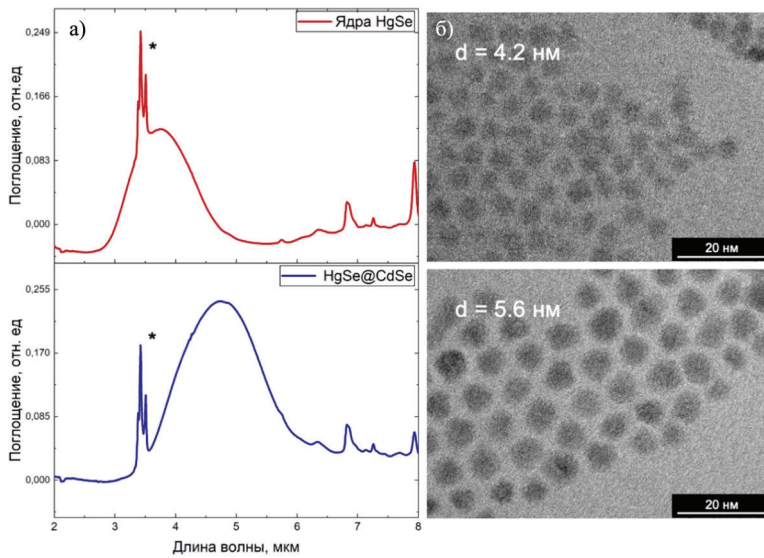


Рис. 1. Спектры поглощения (*а*) и ПЭМ (*б*) ККТ HgSe и HgSe@CdSe

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации проекта № FSMG-2025-0024.

Литература

1. Пономаренко В. П. и др. Фотосенсоры на основе коллоидных квантовых точек // Успехи химии, 2024. — Т. 93. — № 4: RCR5113.
2. Пономаренко В. П., Попов В. С. Нульмерная сенсорика. Квантовые точки. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2025.

3. Tang X., Fu Wu G., Lai K. W. C. Plasmon resonance enhanced colloidal HgSe quantum dot filterless narrowband photodetectors for mid-wave infrared // J. Mater. Chem. P, 2017. Vol. 5 (2). P. 362–369.
4. Shen G., Guyot-Sionnest P. HgTe/CdTe and HgSe/CdX (X = S, Se, and Te) core/shell mid-infrared quantum dots // Chem. Mater, 2018. Vol. 31 (1). P. 286–293.
5. Kamath A., Schaller R. D., Guyot-Sionnest P. Bright fluorophores in the second near-infrared window: HgSe/CdSe quantum dots // J. Am. Chem. Soc., 2023. Vol. 145 (19). P. 10809–10816.

УДК 621.383.4

Исследование фотоотклика тонких пленок ККТ HgTe в видимом и инфракрасном диапазонах

Яковлев В. О.[1], Сапцова О. А.[1], Короннов А. А.[1,2], Королева Т. В.[1], Хакимов К. Т.[1], Медведев А. Г.[1], Попов В. С.[1,3]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
iakovlev.vo@phystech.edu
[2] Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
[3] ГНЦ РФ АО «НПО “Орион”»
Москва, Россия

Исследован фотоотклик тонких пленок коллоидных квантовых точек HgTe при возбуждении в диапазоне 405–1500 нм. Показано, что спектральная ампер-ваттная чувствительность имеет немонотонный характер и не повторяет спектры поглощения. По данным ПЭМ и спектров поглощения установлена связь между размером ККТ и положением экситонного максимума: для Образца 1 средний размер ККТ составляет 7,8 нм, а экситонный максимум расположен при 3,67 мкм; для Образца 2 — 4,9 нм и 2,65 мкм соответственно. Времена спада фотоотклика зависят от длины волны возбуждения, что указывает на вклад процессов генерации, рекомбинации, межточечного транспорта и ловушечных состояний в тонких пленках HgTe.

Ключевые слова: HgTe; коллоидные квантовые точки; фотоотклик; ампер-ваттная чувствительность; ловушечные состояния; инфракрасный диапазон.

Investigation of the Photoresponse of HgTe Colloidal Quantum Dot Thin Films in the Visible and Infrared Ranges

Yakovlev V. O.[1], Saptsova O. A.[1], Koronnov A. A.[1,2], Koroleva T. V.[1], Khakimov K. T.[1], Medvedev A. G.[1], Popov V. S.[1,3]
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
iakovlev.vo@phystech.edu
[2] Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russia
[3] Orion R&P Association, Moscow, Russia

The photoresponse of thin HgTe colloidal quantum dot films was studied under 405–1500 nm excitation. The spectral ampere-watt responsivity was shown to be nonmonotonic and not to reproduce the absorption spectra. TEM data and absorption spectra reveal a correlation between the CQD size and the excitonic maximum: Sample 1 has an average CQD size of 7.8 nm and an excitonic maximum at 3.67 μm, whereas Sample 2 has an average size of 4.9 nm and an excitonic maximum at 2.65 μm. The decay time of the photoresponse depends on the excitation wavelength, indicating the contribution

of carrier generation, recombination, interdot transport, and trap states in thin HgTe films.

Keywords: HgTe; colloidal quantum dots; photoresponse; ampere-watt responsivity; trap states; infrared range.

Коллоидные квантовые точки халькогенидов ртути являются перспективными материалами для широкополосных фотодетекторов благодаря размерной перестройке оптического перехода и возможности формирования фоточувствительных пленок растворными методами [1–4]. Для ККТ HgTe особенно важны процессы, происходящие в твердой пленке после лигандного обмена: перенос носителей между нанокристаллами, рекомбинация и захват на поверхностные или интерфейсные ловушечные состояния.

В настоящей работе исследованы временные и спектральные характеристики фотоотклика фоторезисторов на основе ККТ HgTe при возбуждении на длинах волн 405, 650, 850, 905, 940, 1064, 1310 и 1500 нм. Для корректного сравнения отклика на разных длинах волн проводили нормировку по мощности излучения и контроль геометрии светового пятна на активной области образца.

Для сопоставления фотоэлектрических и оптических характеристик были использованы спектры поглощения и данные просвечивающей электронной микроскопии. Образец 1 характеризуется большим средним размером ККТ и более длинноволновым экситонным максимумом, тогда как Образец 2 имеет меньший средний размер и более коротковолновое положение характерного оптического перехода. Это соответствует ожидаемой связи между размером ККТ и эффективной оптической щелью.

Спектральная ампер-ваттная чувствительность обоих образцов имеет немонотонный характер. Для Образца 1 максимальный отклик наблюдается при 405 нм, затем чувствительность снижается в области 850–905 нм и возрастает при переходе к диапазону 1310–1500 нм. Образец 2 демонстрирует меньшую чувствительность при коротковолновом возбуждении, но также показывает рост отклика в длинноволновой части исследованного диапазона.

Временная динамика фотоотклика показывает разделение на два режима. При возбуждении на 405 и 650 нм времена спада составляют 0,523–0,548 с, тогда как в диапазоне 850–1500 нм они уменьшаются до 0,036–0,072 с. Такое различие указывает на смену доминирующего механизма релаксации фототока и согласуется с участием ловушечно-транспортных процессов в пленке.

Полученные результаты показывают, что форма спектральной чувствительности не определяется только оптическим поглощением. Существенную роль играют эффективность разделения фотогенерированных носителей, межточечный транспорт, рекомбинация и заполнение ловушечных состояний. Доклад посвящен анализу этих процессов и их влияния на фотоотклик тонких пленок ККТ HgTe.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации проекта № FSMG-2025-0024.

Литература

1. Попов В. С., Миленкович Т., Хакимов К. Т., Королева Т. В., Сапцова О. А., Яковлев В. О., Шуклов И. А., Короннов А. А. и др. Чувствительность фоторезисторов на основе коллоидных квантовых точек HgTe в коротковолновом и средневолновом диапазонах инфракрасного спектра при комнатной температуре // Прикладная физика, 2024. — № 6. — С. 47–53. — DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-47-53.
2. Koroleva T. V., Medvedev A. G., Khakimov K. T., Yakovlev V. O., Saptsova O. A., Koronnov A. A. et al. Mercury precursor-controlled size tuning of HgTe colloidal quantum dots for infrared photodetectors // Optical Materials, 2026. Vol. 175. Article 118029. DOI: 10.1016/j.optmat.2026.118029.
3. Caillas A., Guyot-Sionnest P. Uncooled High Detectivity Mid-Infrared Photoconductor Using HgTe Quantum Dots and Nanoantennas // ACS Nano, 2024. Vol. 18. № 12. P. 8952–8960. DOI: 10.1021/acsnano.3c12581.
4. Yang J., Caillas A., Feng J., Zhang H., Shen X., Saha S., Guyot-Sionnest P. Long-Wave Infrared HgTe Quantum Dot Photoconductors with Optical Enhancement // ACS Nano, 2025. Vol. 19. № 18. P. 17874–17883. DOI: 10.1021/acsnano.5c04153.

УДК 535-14, 535-15, 534-16

Активные устройства ТГц плоской оптики на основе на основе VO_2, $LiNbO_3$ и плазмонных наносистем, способы *in-situ* мониторинга их состояния

Кайдашев В. Е.[1], Рогов Ю., Мутаев И.[2], Парочкин А.[2], Кутепов М. Е.[1], Жуков С. С.[2], Очкуров М. В.[1], Карапетьян Г. Я.[1]
[1] Лаборатория Наноматериалов, Южный федеральный университет
344090, г. Ростов-на-Дону, пр-т Стачки, 200/1
kaydashev@gmail.com
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Active devices for THz flat optics based on VO_2, $LiNbO_3$ and plasmonic nonsystems, methods to *in-situ* monitor their states

Kaydashev V. E.[1], Sc.D, Rogov Yu.[2], Mutaev I.[2], Parochkin A.[2], Kutepov M. E.[1], Zhukov S. S.[2], Sc.D, Ochkurov M. V.[1], Karapetyan G. Ya.[1], Sc.D
[1]Laboratory of Nanomaterials, Southern Federal University
200/1 Stackki Ave., Rostov-on-Don, 344090, Russia
[2] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
kaydashev@gmail.com

Активные (программируемые) ТГц и ИК метаповерхности медленно приходят на смену широко изученных пассивных метаповерхностей, формируя элементную базу для реализации ряда ранее недоступных устройств плоской оптики и фотоники, включая фотонные дифракционные процессоры для высокопроизводительных “оптических” вычислений, в том числе квантовых, методов ИК и ТГц микроскопии, спектроскопии и неразрушающего контроля непроводящих объектов, биологических объектов (бактерий, эритроцитов, нейронов), систем теплового мониторинга, ТГц и ИК лидаров, телекоммуникационных систем будущих поколений.

В течении последних 6 лет мы разрабатываем новые композитные материалы на основе VO_2/Al_2O_3 [1], а также $VO_2/TiO_2/LiNbO_3$ [2] с лавинно-образным и постепенным, контролируемым переключением проводимости “изолятор-металл”, изучаем новые топологии активных метаповерхностей на их основе для формирования нужного распределения фаз/интенсивностей внутри фронта проходящей/отраженной ТГц и ИК волны [3–4]. Мы реализуем подходы чисто электрической и комбинированной, электро-оптической, адресации (программирования) “пикселей” активных метаповерхностей [5, 2] с топологией линз и дифракционных решеток. Мы работаем над снижением порога электро-оптического переключения материалов на основе VO2 при помощи фото-индуцированного нагрева плазмонных и плазмонно связанных наночастиц [2, 6]. Мы разрабатываем многоканальную систему in-situ мониторинга состояний активных ТГц дифракционных решеток при помощи многоканального устройства на основе поверхностных акустических волн

внутри пьезоэлектрической подложки LiNbO3 [7] и интерференционный оптический метод для экспресс-мониторинга особенностей динамического переключения и тепловых процессов в ТГц и ИК метаповерхностях.

This research work is supported by Russian Ministry of Science and Higher Education (State assignment in the field of scientific activity 2026 №FENW-2026-0010. Design and fabrication of samples was partially supported by Russian Science Foundation, grant № 24-29-00175 at SFU.

Литература

1. M. E. Kutepov et al. Influence of thickness on structural, electrical and optical properties of VO_2 films grown on TiO_2-buffered c-Al_2O_3 substrates, https://arxiv.org/abs/2411.14920v2.
2. V. Kaydashev et al. Photothermal Effect and Phase Transition in VO_2 Enhanced by Plasmonic Particles, Materials 2023, 16, 2579.
3. РНФ 24-29-00175 "Реконфигурируемые градиентные ТГц/ИК" метаповерхности, 2024–2025 гг., рук. Кайдашев В. Е.
4. РНФ 22-29-01037 Электрически и оптически конфигурируемые суб-ТГц/ТГц металинзы, 2022-2023, рук. Кайдашев В. Е.
5. V. Kaydashev et al. Reconfigurable VO_2 metasurfaces with hybrid electro-optical control: manipulating THz radiation with 0.3 W/cm^2 light, Applied Optics, 2023, 62, 4942.
6. РФФИ 18-02-00151А "Изучение фототермического эффекта в плазмонно связанных наносистемах", 2018-2020, рук. Кайдашев В. Е.
7. G. Y. Karapetyan et al. Surface acoustic waves to monitor active THz metagrating based on VO2, https://arxiv.org/abs/2412.01210v2.

УДК 535.3+ 535-14

Моделирование элемента устройства метаповерхности в терагерцевом диапазоне на основе VO2 и LiNbO3

Очкуров М. В., Карапетьян Г. Я., к. т. н., Кайдашев В. Е., к. ф.-м. н.
Южный Федеральный Университет, Лаборатория Наноматериалов
344090, г. Ростов-на-Дону, пр-т Стачки, 200/1
ochkurov@sfedu.ru, gkarapetyan@sfedu.ru, vekaydashev@sfedu.ru

В этой работе мы численно моделируем отражательные свойства одиночного фазосдвигающего мета-атома на основе электрически управляемого С-образного кольцевого резонатора Au и пленки $VO_2/TiO_2/LiNbO_3$ для создания ТГц дифракционной решетки градиентного типа с полностью электрическим управлением.
Ключевые слова: Активная метаповерхность; терагерцовая дифракционная решетка; диоксид ванадия; VO_2; ниобат лития; $LiNbO_3$.

Simulation of a terahertz metasurface device element based on VO_2 and $LiNbO_3$

Ochkurov M. V., Karapetyan G. Ya., Ph.D, Kaidashev V. E., Ph.D
Southern Federal University, Laboratory of Nanomaterials,
200/1 Stackki Ave., Rostov-on-Don, 344090, Russia
ochkurov@sfedu.ru, gkarapetyan@sfedu.ru, vekaydashev@sfedu.ru

In this work, we numerically simulate the reflectivity of a single phase-shifting meta-atom based on an electrically controlled Au C-shaped ring resonator and a $VO_2/TiO_2/LiNbO_3$ film to create a fully electrically controlled gradient-type THz diffraction grating.
Keywords: Active metasurface; terahertz diffraction grating; vanadium dioxide; VO_2; lithium niobate; $LiNbO_3$.

Активные метаповерхности имеют высокую актуальность в новых способах управления фронтом электромагнитной волны. В настоящее время развивается несколько подходов к созданию активных терагерцевых метаповерхностей: с использованием материалов с фазовым переходом, которые переключаются между двумя состояниями с помощью тепла, тока и/или света [1], гибридных мета-атомов на основе металлических резонаторов и графена [2], жидкокристаллических матриц [3], на основе кремния с “глобальным” освещением мощными фемтосекундными лазерными импульсами [4], углеродных нанотрубок в деформируемой полимерной матрице [5] и другие. Несмотря на высокую значимость полностью электические управляемые метаповерхности все еще представляют серьезный технологическим вызовом, и часто требуют использование дорогостоящих многоступенчатых литографических технологий [6]. Недавно мы обнаружили электрически контролируемое постепенное изменение проводимости в пленках VO_2/TiO_2, выращенных на подложках $LiNbO_3$ [7], которое сильно отличается от резкого и неконтролируемого перехода изолятор-металл в традиционных пленках VO_2 на подложках Al_2O_3 или SiO_2/Si. композите $VO_2/TiO_2/LiNbO_3$ полагаем что композит $VO_2/TiO_2/LiNbO_3$ позволит осуществлять полностью электрическую настройку фазы и амплитуды

отраженных волн ТГц и среднего ИК при помощи нового класса активных метаповерхностей.

Мы также предложили новый подход, основанный на поверхностных акустических волнах (ПАВ), для одновременного и независимого мониторинга состояний, т.е. постепенной настройки свойств отражения в ТГц-диапазоне во всех N каналах активной дифракционной решетки [8]. Единый широкополосный радиочастотный отклик состоит из N узкополосных частотных каналов, которые содержат информацию обратной связи о текущем состоянии каждого штриха (“пикселя”) решетки. Полностью электрически управляемая ТГц дифракционная решетка “градиентного” типа была изготовлена на основе композита $VO_2/TiO_2/LiNbO_3$.

В данной работе мы численно моделируем отражательные свойства одиночного фазосдвигающего мета-атома на основе электрически управляемого С-образного кольцевого резонатора Au и пленки $VO_2/TiO_2/LiNbO_3$ для создания ТГц фазовой дифракционной решетки с полностью электрическим управлением. Свойства отражения линейно поляризованных терагерцевых волн от единичного мета-атома изучены в зависимости от угла раскрытия кольцевого резонатора, а также длины волны падающего излучения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание в области научной деятельности на 2026 год №FENW-2026-0010).

Литература

1. V. Kaydashev, A. Slavich, I. Domaratskiy, S. Zhukov, R. Kirtaev, D. Mylnikov, G. Alymov, M. Kutepov, and E. Kaidashev, Reconfigurable VO^2 metasurfaces with hybrid electro-optical control: manipulating THz radiation with 0.3 W/cm^2 light // Appl. Opt., 2023. Vol. 62. № 22. P. 4942.
2. Q. Li, X. Cai, T. Liu, M. Jia, Q. Wu, H. Zhou, H. Liu, Q. Wang, X. Ling, C. Chen, F. Ding, Q. He, Y. Zhang, S. Xiao, and L. Zhou, Gate-tuned graphene meta-devices for dynamically controlling terahertz wavefronts// Nanophotonics, 2022. Vol. 11. № 8. P. 2085–2096.
3. X. Fu, L. Shi, J. Yang, Y. Fu, C. Liu, J.W. Wu, F. Yang, L. Bao, and T. J. Cui, Flexible Terahertz Beam Manipulations Based on Liquid-Crystal-Integrated Programmable Metasurfaces// ACS Appl Mater Interfaces, 2022. Vol. 14. № 19. P. 22287.
4. L. Gingras, A. Jaber, A. Maleki, O. Reshef, K. Dolgaleva, R. W. Boyd and J.-M. Ménard, Ultrafast modulation of the spectral filtering properties of a THz metasurface// Optics Express, 2020. Vol. 28. № 14. P. 20296.
5. G.M. Katyba, N.I. Raginov, E.M. Khabushev, V.A. Zhelnov, A. Gorodetsky, D.A. Ghazaryan and et al., Tunable THz flat zone plate based on stretchable single-walled carbon nanotube thin film// Optica, 2023. Vol. 10. № 1. P. 53–61.
6. S. Venkatesh, X. Lu, H. Saeidi and K. Sengupta, A High-Speed Programmable and Scalable Terahertz Holographic Metasurface based on Tiled CMOS Chips// Nat Electron. Vol. 3. № 1. P. 785–793, 2020.
7. V. Kaydashev, B. Khlebtsov, M. Kutepov, A. Nikolskiy, A. Kozakov, A. Konstantinov, A. Mikheykin, G. Karapetyan, and E. Kaidashev, Photothermal Effect and Phase Transition in VO_2 Enhanced by Plasmonic Particles// Materials, 2023. Vol. 16. № 8. P. 2579.
8. arXiv:2412.01210.

УДК 535.8

Численное моделирование пористой фотонно-кристаллической структуры на основе кремния и оксида алюминия для детектирования газа

Новосёлов А. А.[1], Кузнецов И. В.[1], Перин А. С.[1,2], к. т. н.
[1] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, ул. Ленина, 40
saloks1990@gmail.com
[2] Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Осуществлено математическое моделирование фотонно-кристаллической структуры для детектирования газа. В частности, рассмотрена возможность детектирования метана и азота в фотонно-кристаллической структуре на основе кремния и оксида алюминия. Приведены результаты математического моделирования, выраженные в виде зависимостей коэффициента отражения и разности коэффициентов отражений от длины волны.
Ключевые слова: кремний; азот; метан; пора; фотонно-кристаллическая структура; оксид алюминия.

Numerical Simulation of a Porous Photonic Crystal Structure Based on Silicon and Aluminum Oxide for Gas Detection

Novoselov A. A.[1], Kuznetsov I. V.[1], Perin A. S.[1,2], Ph.D
[1] Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenina St., Tomsk, 634050, Russia
saloks1990@gmail.com
[2] V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
1 Akademika Zueva Sq., Tomsk, 634021, Russia

Mathematical modeling of a photonic crystal structure for gas detection was performed. Specifically, the feasibility of detecting methane and nitrogen in a photonic crystal structure based on silicon and aluminum oxide was examined. The results of the mathematical modeling are presented, expressed as dependences of the reflectivity and the difference in reflectivity on wavelength.
Keywords: silicon; nitrogen; methane; pore; photonic crystal structure; aluminum oxide.

Работа направлена на исследование возможности использования отражения оптического излучения для детектирования конкретного вещества. Существующие на рынке детекторы газа представлены электрохимическим, теплопроводностным, термокаталитическим, инфракрасным (ИК) и полупроводниковым исполнением [1]. Так как принцип детектирования на отражении не подразумевает использования химического реагента, такой датчик, вероятно, может обеспечивать больший срок службы, чем электрохимический [2]. Относительно прочих упомянутых

детекторов, все они, за исключением ИК, требуют электрический ток в детектирующем элементе, находящемся в контакте с газом, что может привести к повышенной взрывоопасности устройства и чувствительности к электромагнитным помехам [3].

Цель работы – исследование зависимости спектра отражения пористой фотонно-кристаллической структуры при заполненности пор метаном, азотом и воздухом. Схема элемента пористой фотонно-кристаллической структуры представлена на рис. 1. Параметры моделирования приведены в табл. 1.

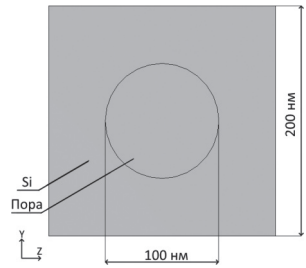


Рис. 1. Схема рассматриваемого чувствительного элемента

Таблица 1. Параметры моделирования

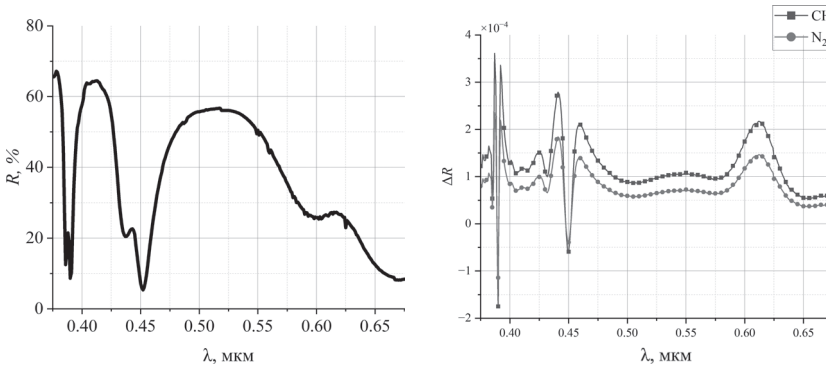
Длина волны, λ, мкм	0,375–0,7
Диаметр поры, нм	100
Размеры элемента пористой структуры (X×Y×Z), нм	120×200×200

Определение показателей преломления кремния, оксида алюминия, воздуха, азота (N_2) и метана (CH_4) осуществлялись по дисперсионным уравнениям, приведенным или полученным на основе работ [4–7].

Результаты моделирования представлены на рис. 2*а*, 3*а* – коэффициент отражения (*R*) от длины волны, рис. 2*б*, 3*б* – разность коэффициентов отражения (ΔR) в случаях заполненности структуры воздухом и детектируемым веществом.

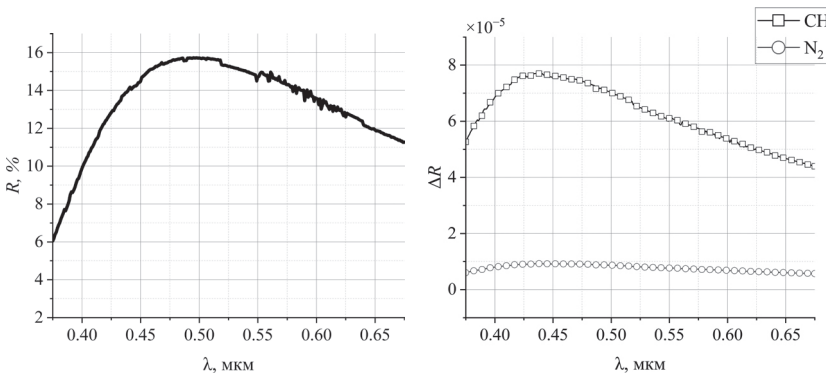
Так как коэффициент отражения структуры изменялся мало при смене заполняющего вещества, различие можно пронаблюдать в виде разности относительно результатов при заполнении пор воздухом. На рис. 2*б*, 3*б* наибольшей разностью обладал метан, наименьшей – азот. Отметим, что ограничена возможность регистрации настолько малых изменений отраженной мощности на фоне шумов детектора. Возможно, решение этой проблемы связано с изменением угла падения или свойств структуры посредством нанесения на поверхность структуры функциональных слоев. Дальнейшие исследования будут направлены на решение этой проблемы.

Таким образом, показано, что различие спектров отражения позволяет потенциально использовать структуру для детектирования газов, однако требуется повышение чувствительности.



а *б*

Рис. 2. Результаты моделирования структуры из кремния: коэффициент отражения от длины волны (*а*); разность коэффициентов отражения в случаях заполненности структуры воздухом и детектируемым веществом (*б*)



а *б*

Рис. 3. Результаты моделирования структуры из оксида алюминия: коэффициент отражения от длины волны (*а*); разность коэффициентов отражения в случаях заполненности структуры воздухом и детектируемым веществом (*б*)

Литература

1. Current Opportunities and Trends in the Gas Sensor Market: A Focus on e-Noses and Their Applications in Food Industry / S. Mor, B. Gunay, M. Zanotti, M. Galvani, S. Pagliara, L. Sangaletti // Chemosensors, 2025. Vol. 181. P. 6.
2. Портативные электрохимические сенсоры для газового анализа современное состояние вопроса в Европе и Америке / Никольская Е. Ю. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2004. — № 15. — С. 240.

3. Обзор газоанализаторов для метана / Г. Т. Земский, А. В. Ильичев, Н. В. Кондратюк, Д. В. Долгих // Актуальные вопросы пожарной безопасности, 2021. — № 4 (10). — С. 16–19.
4. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared / P. E. Ciddor // Applied Optics, 1996. Vol. 35. P. 1566–1573.
5. Über die Dispersion des Lichtes in gasförmigen Kohlenwasserstoffen / S. Loria // Annalen der Physik, 1909. Vol. 334. P. 605–622.
6. Dispersion of nitrogen / E. R. Peck, B. N. Khanna // J. Opt. Soc. Am., 1966. Vol. 56. P. 1059–1063.
7. «Refractive index» in Handbook of Laser Science and Technology / M. J. Dodge. // Volume IV, Optical Materials: Part 2, CRC Press, Boca Raton, 1986, p. 30.

УДК 535.8

Проектирование и характеризация интегрально-оптической компонентной базы на платформе КНИ

Сороковых Д. Е.[1], Габидуллин А. Р.[1], к. т. н. Архипов С. В.[1], Шишкин А. В.[1], Аббасов Т.[1], Желтиков В. А.[1], к. ф.-м. н. Москалев Д. Н.[2], к. ф.-м. н. Салгаева У. О.[2], к. ф.-м. н. Савчук А. А.[1], к. ф.-м. н. Орликовский Н. А.[1], к. т. н. Денисов А. А.[1]

[1] Центр исследовательской инфраструктуры, Сколковский институт науки и технологий
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой б-р, 30, стр. 1
[2] ООО «ДифраЛаб»
614007, г. Пермь, ул. Рабоче-Крестьянская, 22, кв. 41
d.sorokovykh@skoltech.ru

В работе представлены результаты разработки и экспериментальной характеризации набора базовых элементов (PDK) для фотонных интегральных схем на платформе кремний-на-изоляторе. В состав PDK входят одномодовые волноводы, тейперы для согласования модовых полей, дифракционные решетки ввода/вывода, MMI-делители, направленные ответвители и кольцевые резонаторы. Показано достижение требуемых геометрических и функциональных параметров. Описаны конструкции и параметры управляемых элементов — термооптических нагревателей, применяемых для подстройки рабочей точки интерферометров Маха — Цендера и резонансных структур. Представлены результаты по исследованию уровня экстинкции, максимальной частоте перестройки и допустимой максимальной мощности нагревателей, задающие ориентиры дальнейшей оптимизации высокочастотных модуляторов. Полученные результаты создают основу для масштабируемого, метрологически обеспеченного прототипирования интегрально-оптических устройств на платформе КНИ.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; кремниевая фотоника; электрооптические измерения.

Integrated-Optical Building Blocks on the SOI Platform and Automated Characterization Methods

Sorokovykh D. E.[1], Gabidullin A. R.[1], Arkhipov S. V.[1] Ph.D, Shishkin A. V.[1], Abbasov T.[1], Zheltikov V. A.[1], Moskalev D. N.[2] Ph.D, Salgaeva U. O.[2] Ph.D, Savchuk A. A.[1] Ph.D, Orlikovsky N. A.[1] Ph.D, Denisov A. A.[1] Ph.D

[1] Research Facility Center, Skolkovo Institute of Science and Technology
30 Bolshoy Blvd., Bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russia
[2] DifraLab LLC
Perm, 614007, Russia
d.sorokovykh@skoltech.ru

This work presents the results of the development and experimental characterization of a set of basic building blocks constituting a Process Design Kit (PDK) for

silicon-on-insulator photonic integrated circuits. The PDK includes single-mode waveguides, tapers for mode-field matching, grating couplers, MMI splitters, directional couplers, and ring resonators. The achievement of the required geometrical and optical parameters is demonstrated. The designs and parameters of active elements, thermo-optic heaters used to tune the operating point of Mach–Zehnder interferometers and resonant structures, are described. Results on extinction ratio, tuning rate, and allowable heater power are presented, providing guidance for the further optimization of high-frequency modulators. The obtained results establish a basis for reproducible, metrologically traceable prototyping of integrated-optical devices.

Keywords: photonic integrated circuits; silicon photonics; electro-optic measurements.

В основе представленной работы лежит формирование библиотеки интегрально-оптических элементов (PDK) и сопряженной с ней методической базы измерений для фотонных интегральных схем на платформах кремний-на-изоляторе [1, 2]. Библиотека содержит поперечные сечения волноводов глубокого и частичного травления, а также набор пассивных компонентов: одномодовые волноводы, тейперы для согласования модового поля, дифракционные решетки ввода/вывода [4], MMI-делители разных типоразмеров, направленные ответвители и кольцевые резонаторы. Для волноводов продемонстрировано устойчивое обеспечение проектных геометрических размеров, а также удельные потери, сопоставимые с мировыми аналогами [3]. Исследование тейперов показывает, что использование специализированных сужающихся участков позволяет существенно уменьшить потери при торцевом вводе и выводе излучения по сравнению с прямым сопряжением волноводов, а применение решеток ввода/вывода позволяет обеспечить удобство работы с многоэлементными структурами и автоматизированными измерительными стендами. Также были разработаны MMI-структуры и направленные ответвители, на основе которых реализуются делители и зоны связи, в том числе в составе кольцевых резонаторов. По результатам моделирования и экспериментов показано, что выбранные топологии обеспечивают заданное соотношение мощностей в плечах при достаточно малых материальных потерях.

Развитие PDK включает активные элементы: термооптические нагреватели, интегрируемые в плечи интерферометров Маха — Цендера и резонансных фильтров [5]. Конструкция и технология изготовления нагревателей разрабатывались с учетом поперечного профиля многослойной структуры, требований к удельному сопротивлению и допустимым токам и мощностям, что позволяет обеспечивать требуемый диапазон перестройки фаз и резонансных частот. А надежность и термическая стабильность исследовалась в ходе многостадийных температурных испытаний. Экспериментальные результаты демонстрируют достижение высокой экстинкции в интерферометрах, основанных на разработанных элементах, и ожидаемые уровни быстродействия термооптической перестройки. Также данные структуры задают базу для более сложных базовых блоков элементов, включая высокочастотные электрооптические модуляторы. Кольцевые резонаторы, реализованные на основе одномодовых волноводов и направленных ответвителей, используются для построения узкополосных фильтров и перестраиваемых резонансных элементов, необходимых в том числе для интегральных лазеров и спектральных фильтров.

Параллельно с разработкой структур показывается развитие методов измерений и их автоматизации. Количество чипов и тестовых структур в рамках даже одного проекта делает ручные измерения крайне трудоемкими и чувствительными к человеческому фактору, поэтому программное обеспечение для автоматизированного управления измерительными стендами, последовательной проверки набора элементов PDK и обработки получаемых данных становится необходимым. Использование методов машинного обучения и интеллектуальных ассистентов рассматривается как способ ускорения первичного анализа, выявления аномалий и формирования отчетной документации. Совокупность созданной технологической основы, компонентной базы, автоматизированной измерительной инфраструктуры формирует фундамент для масштабируемого коммерческого прототипирования интегрально-оптических устройств различного применения для рынка РФ.

Литература

1. Yeh S. K., Liang D., Luff B. J., Palsson S., Luo J., Janta-Polczynski M. et al. Silicon Photonics Platform for Next Generation Data Communication Technologies // 2024 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM): Proceedings. San Francisco, CA, USA, 2024. P. 1–4. DOI: 10.1109/IEDM50854.2024.10873369.
2. Timurdogan E., Sorace-Agaskar C., Sun C., Leake G., Moresco M., Orcutt J. S. et al. AIM Process Design Kit (AIMPDKv2.0): Silicon Photonics Passive and Active Component Libraries on a 300 mm Wafer // 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC): Proceedings. San Diego, CA, USA, 2018. P. 1–3.
3. Tong X. C. Silicon-on-Insulator Waveguides // Advanced Materials for Integrated Optical Waveguides. Springer Series in Advanced Microelectronics. Vol. 46. Cham: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-01550-7_6.
4. Abbasov T., Zibrov S., Stolyarov I., Orlikovskiy N., Gabidullin A., Arkhipov S., Shishkin A., Zheltikov V., Denisov A., Sherstov I. Focusing grating coupler for the generation of quantum sensors // Optics Express, 2025. Vol. 33. P. 29308–29321.
5. Parra J., Pérez D., Muñoz P., Doménech D., Lechuga L. M. Silicon thermo-optic phase shifters: a review of configurations and optimization strategies // Advanced Photonics Nexus, 2024.

УДК 004.89

Автоматизация тестирования фотонных интегральных схем при помощи машинного зрения

Лазарев А. С.[1], Сороковых Д. Е.[1], Орликовский Н. А.[1], к. ф.-м. н., Архипов С. В.[1], к. т. н., Савчук А. А.[1], к. т. н., Габидуллин А. Р.[1], Денисов А. А.[1], к. т. н., Рыкованов С. Г.[2], к. ф.-м. н.

[1] Центр исследовательской инфраструктуры, Сколковский институт науки и технологий 121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой б-р, 30, стр. 1 rfc@skoltech.ru

[2] Центр Искусственного Интеллекта, Сколковский институт науки и технологий 121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой б-р, 30, стр. 1 ai4esg@skoltech.ru

В докладе представлен подход к автоматизации тестирования фотонных интегральных схем с использованием методов машинного зрения. Система повышает воспроизводимость и скорость измерений за счет нейросетевого анализа оптических данных без раскрытия архитектуры и обучения.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; автоматизация тестирования; машинное зрение; нейронные сети.

Computer Vision-driven Automation for Photonic Integrated Circuits Testing

Lazarev A. S.[1], Sorokovykh D. E.[1], Orlikovskiy N. A.[1], Ph.D, Arkhipov S. V.[1], Ph.D, Savchuk A. A.[1], Ph.D, Gabidullin A. R.[1], Denisov A. A.[1], Ph.D, Rykovanov S. G.[2], Ph.D

[1] Research Facility Center, Skolkovo Institute of Science and Technology 30 Bolshoy Blvd., Bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russia rfc@skoltech.ru

[2] Artificial Intelligence Center, Skolkovo Institute of Science and Technology 30 Bolshoy Blvd., Bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russia ai4esg@skoltech.ru

The report presents an approach to automating photonic integrated circuit testing using computer vision methods. The proposed system increases reproducibility and speed of measurements by neural analysis of optical data without revealing architectural or training details.

Keywords: Photonic Integrated Circuits; testing automation; computer vision; neural networks.

Фотонные интегральные схемы (ФИС) рассматриваются как перспективная платформа для высокопроизводительных систем передачи и обработки информации. В условиях роста сложности топологий ФИС и числа тестируемых структур

существенно возрастает нагрузка на этап лабораторного тестирования, где до сих пор преобладают ручные процедуры поиска оптических вводов и позиционирования зондов. Это приводит к увеличению времени измерений и сильной зависимости воспроизводимости результатов от квалификации оператора.

В работе рассматривается подход к автоматизации тестирования фотонных интегральных схем на основе методов машинного зрения и нейросетевой обработки изображений. Предлагаемый программно-аппаратный контур ориентирован на решение задачи автоматического поиска тестовых структур и соответствующих им оптических вводов по данным с камеры, установленной в составе оптического стенда. На основе распознанных координат и идентифицированных элементов формируется регулярная «сетка» перемещений, которая используется для генерации команд на движение зондовых держателей и оптических манипуляторов. Таким образом, система автоматизирует этап навигации по кристаллу и позиционирования зондов, но не выполняет функций оценки параметров устройств или контроля качества.

Разработанный метод интегрируется в существующую инфраструктуру испытательного стенда и не требует модификаций аппаратной части, ограничиваясь добавлением модуля захвата изображений и программного обеспечения для анализа. Использование машинного зрения позволяет сократить время на первичную привязку координат, переход между структурами и повторяемое позиционирование, уменьшить количество ручных операций оператора и стандартизировать процедуру тестирования. В докладе представлена постановка задачи, архитектура программно-аппаратного контура, примеры построения сетки перемещений для типовых топологий ФИС и результаты первичной апробации, демонстрирующие сокращение времени на подготовку и проведение измерений по сравнению с полностью ручным режимом работы.

Литература

1. Latkowski S. et al. Open Standards for Automation of Testing of Photonic Integrated Circuits as Part of the openEPDA Initiative // Proceedings of the 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2019.
2. How silicon photonics enhances machine vision applications // Eureka Patsnap, 2025. URL: https://eureka.patsnap.com
3. Manufacturing Challenges in Photonic Integrated Circuits and How to Overcome Them // IC Online, технический обзор. URL: https://www.ic-online.com
4. Roadmapping the next generation of silicon photonics // Nature Communications, 2024. Vol. 15. Article 44750.

УДК 535.3

Влияние MMI на спектр AWG демультиплексора с адиабатическим тапером

Соломин А. М.[1,2], Сапегин А. А.[1,2], к. ф.-м. н.,
[1]АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
asapegin@niime.ru
[2]Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
solomin.am@phystech.edu

В ходе данной работы численно промоделированы прямоугольный, конический и параболический многомодовые интерферометры (MMI), реализованные по технологии «кремний на изоляторе» (КНИ). На основе полученных данных были смоделированы 1×4 AWG-демультиплексоры. В результате исследования были получены спектральные зависимости прошедшего излучения мультиплексора для всех рассматриваемых MMI.
Ключевые слова: AWG; flat-top; MMI (Multimode interference) coupler; фотоника; спектр.

Influence of MMI on the Spectrum of an AWG Demultiplexer with an Adiabatic Taper

Solomin A. M.[1,2], Sapegin A. A.[1,2], Ph.D
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
asapegin@niime.ru
[2] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
solomin.am@phystech.edu

In this work, rectangular, tapered, and parabolic multimode interferometers (MMI) implemented on the silicon-on-insulator (SOI) platform were numerically simulated. Based on the obtained data, 1×4 AWG demultiplexers were modeled. As a result of the study, the spectral dependences of the multiplexer were obtained for all considered MMI types.
Keywords: AWG; flat-top; MMI (Multimode Interference) coupler; photonics; spectrum.

Современные темпы роста скорости передачи информации требуют развития оптических методов передачи данных. Распространение сразу нескольких оптических сигналов без взаимной интерференции возможно благодаря технологии мультиплексирования по длине волны (Wavelength division multiplexing, WDM), где ключевым элементом служит мультплексор/демультиплексор. Одной из распространенных реализаций демультиплексора является массив волноводных решеток –AWG(Arrayed Waveguide Gratings).

Миниатюризация AWG-демультиплексоров приводит к большей чувствительности к сдвигу длины волны, например, из-за температурного расширения или поляризации. Применение MMI coupler (Multimode interference coupler –многомодовый интерферометр) между подводящим волноводом и звездообразным ответвителем (star coupler) сглаживает выходной спектр устройства и позволяет избежать ухудшения характеристик системы [1].

В основе работы MMI лежит принцип самоизображений. Подбирая параметры длины L и ширины W тапера, можно добиться формирования двукратного изображения входного поля, которое, интерферируя с основной модой волновода, создаст плоский выходной спектр [2].

Согласно теории самоизображений, входное поле может самовоспроизводиться внутри MMI. Для двукратного изображения длина L прямоугольного интерферометра должна быть [2]:

$$L = \frac{3 \cdot L\pi}{8} \cdot p = \frac{n_r W_e^2}{2\lambda} \cdot p, \quad p = 0, 1, 2 \ldots \tag{1}$$

где W_e –эффективная ширина интерферометра, n_r –эффективный показатель преломления волновода.

При моделировании рассматривались MMI прямоугольного, конического и параболического типов с фиксированной длиной интерферометра $L_{MMI} = 30$ мкм. Ширина MMI в области соединения с звездообразным ответвителем для рассматриваемых случаев составила: $W_{\text{пр}} = 2{,}4$ мкм, $W_{\text{кон}} = 6$ мкм, $W_{\text{пар}} = 7{,}2$ мкм.

AWG-демультиплексор состоит из пяти основных элементов: входного волновода, нескольких выходных волноводов, двух зон свободного распространения – FPR (Free Propagation Regions) и решетки из N волноводов [4]. Схема стандартного AWG представлена на рис. 1.

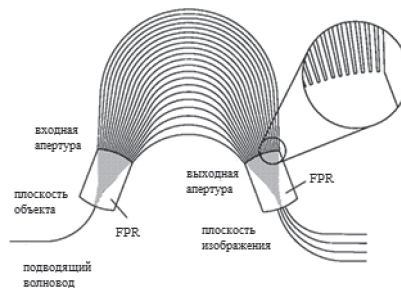


Рис. 1. Схема AWG-демультиплексора [5]

В области свободного распространения (FPR) поле основной моды может быть аппроксимировано гауссовым распределением поля [4]:

$$E_{Gauss}(x,z) = A_{norm} \cdot \exp\left(-i\left(kz - \text{tg}^{-1}\left(\frac{\lambda z}{\pi\omega^2}\right)\right) - x^2\left(\frac{1}{\omega^2} + \frac{ik}{2R}\right)\right), \tag{2}$$

где A_{norm} –нормировочная константа, k –волновое число, λ –длина волны, ω –ширина перетяжки пучка.

После прохождения первой FPR сигнал попадает на решетку волноводов, длина которых подбирается таким образом, чтобы разность длин двух соседних ΔL была пропорциональная целому числу центральных длин волн демультиплексора. На выходе располагается еще одна FPR, обеспечивающая фокусировку сигналов на выходной апертуре. При моделировании рассматривался AWG со следующими параметрами:

Таблица 1. Параметры моделирования AWG-демультиплексора

m	N	d_g	d_0	L_{FPR}	λ_0	n_{cl}	n_{core}
60	17	10 мкм	24,5 мкм	5000 мкм	1550 нм	1,47	3,52

Для демультиплексора с прямоугольным MMI ширина спектра по уровню −30 дБ составляет 6 нм. Выходной спектр представлен на рис. 2.

Для демультиплексора с коническим MMI ширина спектра по уровню −30 дБ составляет 8 нм. Выходной спектр представлен на рис. 3.

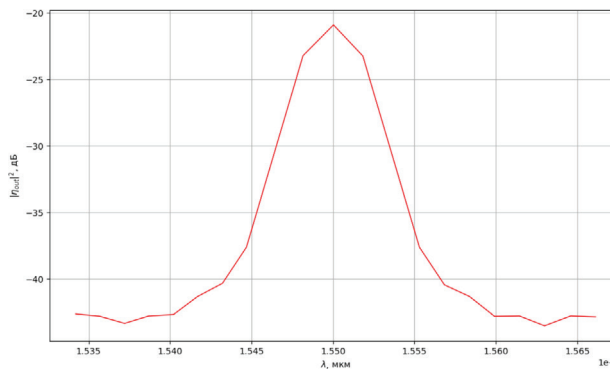


Рис. 2. Выходной спектр AWG с прямоугольным MMI

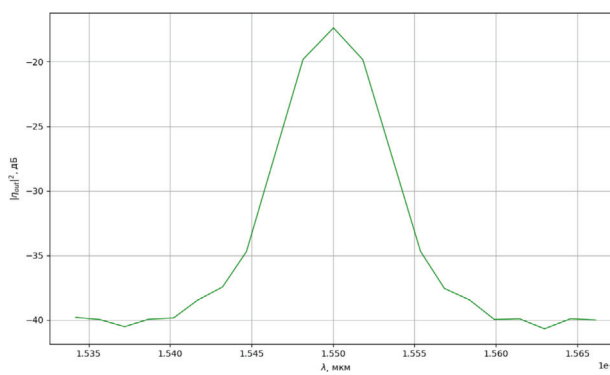


Рис. 3. Выходной спектр AWG с коническим MMI

Для демультиплексора с параболическим MMI ширина спектра по уровню −30 дБ составляет 8,5 нм. Выходной спектр представлен на рис. 4.

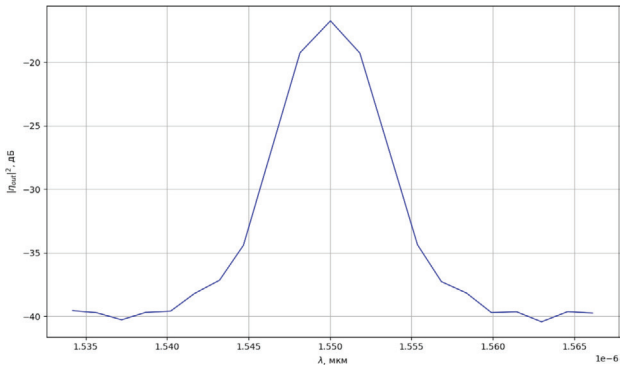


Рис. 4. Выходной спектр AWG с параболическим MMI

У AWG-демультиплексоров с коническим и параболическим MMI ширина спектра по уровню −30 дБ оказалась выше, чем в случае с прямоугольным MMI. При этом потери по выходной мощности находятся на сопоставимом уровне. Результаты моделирования обобщены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты моделирования AWG-демультиплексора с различными MMI

Вид MMI	Ширина спектра по уровню −30 дБ, нм	Потери по мощности, дБ
Прямоугольный	6	−20,9
Конический	8	−17,4
Параболический	8,5	−16,7

Литература

1. Daoxin D., Shuzhe Liu et al. Optimal Design of an MMI Coupler for Broadening the Spectral Response of an AWG Demultiplexer // Journal of lightwave technology, 2022. Vol. 20. № 11. P.5.
2. Lucas B. Soldano, Erik C. M. Pennings; Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications // Journal of lightwave technology. 1995. V.13. № 4. P.13.
3. Daoxin D., Weiquan M. et al. Using a tapered MMI to flatten the passband of an AWG // Optics Communications, 2003. Vol. 219. P. 233–239.
4. Salman Naeem Khan, Daoxin D. et al. Optimal design for a flat-top AWG demultiplexer by using a fast calculation method based on a Gaussian beam approximation // Optics Communications, 2006. Vol. 262. P. 175–179.
5. Meint K. Smit, Cor van Dam; PHASAR-Based WDM-Devices: Principles, Design and Applications // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 1996. Vol. 2. № 2. P. 236–250.

УДК 535.93

Активный дифференциальный термостабилизатор с кремниевым фотодетектором на глубоких уровнях для фотонных интегральных схем

Князев А. А., Сапегин А. А., к. ф.-м. н., Панышев П. А., к. т. н.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
aknyazev@niime.ru, asapegin@niime.ru, kpanyshev@niime.ru

Фотонные интегральные схемы (ФИС) на платформе «кремний на изоляторе» (КНИ) обладают высоким термооптическим коэффициентом, что делает их чрезвычайно чувствительными к температурным флуктуациям. В работе предложена и численно исследована новая конфигурация активного дифференциального термостабилизатора, функционирующего без внешних микроконтроллеров. Устройство основано на сравнении сигналов двух встроенных кремниевых фотодетекторов на глубоких уровнях, интегрированных в микрорезонаторы с преднамеренно разнесенными резонансными длинами волн. Методом TCAD и Ansys MODE проведено 2D-моделирование фототранзисторной структуры на основе комбинированного p-n-p перехода. Показано, что оптимальные параметры геометрии обеспечивают усиление до 7,6.
Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; термостабилизация; кремниевый фотодетектор; глубокие уровни; микрокольцевой резонатор; дифференциальный усилитель.

Active Differential Thermal Stabilizer with a Silicon Deep-Level Photodetector for Photonic Integrated Circuits

Knyazev A. A., Sapegin A. A., Ph.D, Panyshev P. A., Ph.D
Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
aknyazev@niime.ru, asapegin@niime.ru, kpanyshev@niime.ru

Silicon-on-insulator (SOI)-based photonic integrated circuits (PICs) exhibit a high thermo-optic coefficient, making them highly sensitive to temperature fluctuations. This work proposes and numerically investigates a novel active differential thermal stabilization architecture that operates without external microcontrollers. The proposed device is based on comparing the output signals of two integrated silicon deep-level photodetectors embedded in microring resonators with intentionally offset resonance wavelengths. Two-dimensional simulations of a phototransistor structure based on a combined p–n–p junction were performed using TCAD Sentaurus and Ansys MODE. The results demonstrate that the junction geometry has a critical impact on the gain and electrical stability of the device. The optimized structure achieves a current gain of up to 7.6 while maintaining stable operation.
Keywords: photonic integrated circuits; thermal stabilization; silicon photodetector; deep-level defects; microring resonator; differential amplifier.

Фотонные интегральные схемы (ФИС) представляют собой ключевой элемент современных оптических коммуникационных технологий. Они позволяют создавать компактные и высокопроизводительные устройства для обработки оптических сигналов, будучи совместимыми с КМОП-технологией. В отличие от традиционных электронных интегральных схем (ИС), где информация передается с помощью электронов, в ФИС распространяются фотоны, что позволяет достичь более высокой скорости передачи данных и снизить энергопотребление.

Современная компонентная база ФИС, реализованная на платформе «кремний на изоляторе» (КНИ), включает в себя такие ключевые элементы, как волноводы, расщепители, мультиплексоры, модуляторы на основе интерферометров Маха — Цендера и микрокольцевые резонаторы (МКР). Основным рабочим материалом в данной платформе является кремний, обладающий высоким термооптическим коэффициентом ($\Delta n/\Delta T \approx 1{,}86 \cdot 10^{-4}\ K^{-1}$). Это вызывает высокую чувствительность фазы распространяющегося излучения и условий резонанса к флуктуациям температуры. В результате даже незначительные локальные или глобальные изменения температуры на доли градуса приводят к дрейфу рабочей точки модуляторов и смещению резонансных длин волн фильтрующих элементов. Такая термочувствительность вносит паразитную фазовую модуляцию, увеличивает вносимые потери и в худшем случае приводит к полной потере информации, делая обязательным применение схем термостабилизации для обеспечения практической работоспособности ФИС.

Для организации обратной связи в активном термостабилизаторе необходим встроенный фотодетектор, отслеживающий оптическую мощность непосредственно в волноводе. В отличие от гибридных германиевых фотодиодов, требующих сложной интеграции и вносящих потери за счет ответвления света, перспективными являются методы детектирования на глубоких уровнях в самом кремнии. Пионерская работа Li и Poon [1] демонстрирует pin-фотодетектор с ионной имплантацией (дефектно-индуцированное поглощение, DSA), обеспечивающий высокую чувствительность за счет резонаторов. Альтернативный подход Jayatilleka с соавторами [2] использует DSA фотодетекторы как фоторезистивные нагреватели (IRPH –in-resonator photoconductive heaters), совмещая функции детектора и термоэлемента, что минимизирует площадь ценой повышенных темновых токов. Наиболее неинвазивным методом является емкостное зондирование проводимости волновода (CLIPP), предложенное Grimaldi [3].

В данной работе предложена новая конфигурация активного стабилизатора на основе фотодетектирования на глубоких уровнях, функционирующего без использования внешних микроконтроллеров или вычислительных устройств (рис. 1, 2). Принцип действия основан на сравнении сигналов с двух фотодетекторов, интегрированных в микрорезонаторы, резонансные длины волн которых преднамеренно разнесены. Такая схема реализует метод нахождения производной (slopedetection), при котором компаратор фиксирует разность фототоков, пропорциональную отклонению рабочей точки от максимума передаточной функции (зависимости интенсивности света от длины волны). Выходной сигнал компаратора управляет нагревательным элементом, изменяющим резонансные условия как отдельных микрорезонаторов, так и кристалла в целом. Процесс термооптической подстройки продолжается до обнуления разностного сигнала, что соответствует достижению максимума интенсивности света на рабочей длине волны. Важно

отметить, что микрорезонатор выполняет также функцию усилителя оптического поля для встроенного фотодетектора на глубоких уровнях. Сам детектор реализован на биполярном *p-n-p*-переходе, работающем в режиме фототранзистора, что также обеспечивает дополнительное многократное усиление первичного фототока.

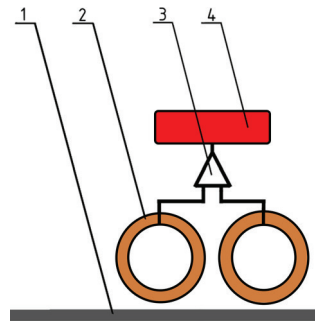


Рис. 1. Концепт датчика. 1 –Волновод из кремния 2 –МКР из фотопроводимого кремния на глубоких уровнях 3 –дифференциальный усилитель 4 –нагреватель Пельте

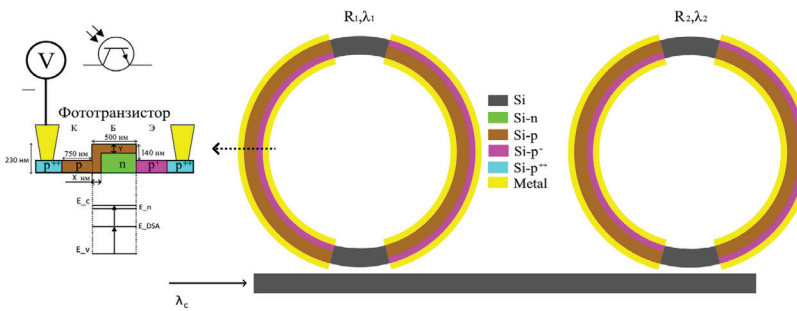


Рис. 2. Схема активного дифференциального (двухкольцевого) термостабилизатора

Результаты численного моделирования подтвердили возможность реализации выраженного транзисторного эффекта в предложенной архитектуре фотодетектора. Основное внимание было уделено исследованию влияния геометрии комбинированного *p-n-p*-перехода на коэффициент усиления и электрическую устойчивость структуры.

В ходе расчетов варьировались размеры областей X и Y, определяющие положение и толщину базовой области фототранзистора (рис. 2). Полученные значения коэффициента усиления представлены в табл. 1.

Как и ожидалось, при слишком большом размере Y 100 нм происходит пробой, как показано на рис. 3*а* размер X требуется сместить как можно ближе к центру для утонения базы и минимизации пути электрон-дырочных пар.

Таблица 1. Коэффициенты усиления

X \ Y	60 нм	80 нм	100 нм
100 нм	4,34	7,5	79
150 нм	4,37	7,53	79
200 нм	4,47	7,62	77

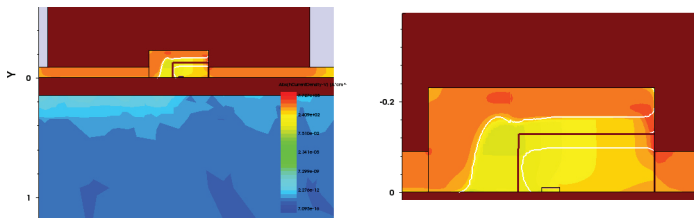


Рис. 3. Распределение модуля вектора плотности дырочного тока. Пробой между слоями pnp проводимости по правой стенке.

Для оценки влияния фотодетектора на распространение оптического сигнала было проведено дополнительное моделирование в программном комплексе Ansys MODE. Целью исследования являлось определение распределения оптической моды в микрокольцевом резонаторе и анализ спектральных потерь, связанных с присутствием легированных областей фотодетектора. Это необходимо ввиду разницы поглощения на разных длинах волн для обычного кремния (из которого состоит остальной чип) и фотодетектора.

На графике потерь (рис. 4) мы наблюдаем рост и высокие значения, что свидетельствует о доминировании потерь на свободных носителях заряда.

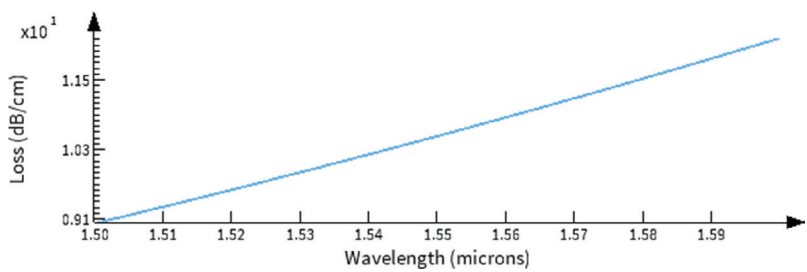


Рис. 4. Потери в зависимости от длины волны (без дефектов).

Для компенсации сдвигов резонансного пика термостабилизации (относительно обычного кремния) необходимо ввести компенсирующую нагрузку (резистор) на один из МКР согласно полученной структуре и ее характеристикам. Это позволить сгладить наклон кривой поглощения и убрать зависимость от длины волны.

Выводы

В работе предложен и численно исследован активный дифференциальный термостабилизатор для фотонных интегральных схем, использующий встроенные кремниевые фотодетекторы на глубоких уровнях. Моделирование в TCAD и Ansys MODE позволило определить оптимальную геометрию p-n-p фототранзистора и оценить оптические потери. Устройство не требует внешнего микроконтроллера, совместимо с КМОП-технологией и может быть использовано как для сенсорных приложений, так и для стабилизации фотонных тензорных ядер в нейроморфных вычислителях. В дальнейшем планируется экспериментальная реализация прототипа и исследование его быстродействия и долговременной стабильности.

Литература

1. Li Y., Poon A. W. Active resonance wavelength stabilization for silicon microring resonators with an in-resonator defect-state-absorption-based photodetector // Optics express, 2015. Vol. 23. № 1. P. 360–372.
2. Jayatilleka H. et al. Wavelength tuning and stabilization of microring-based filters using silicon in-resonator photoconductive heaters // Optics express, 2015. Vol. 23. № 19. P. 25084–25097.
3. Grimaldi V. et al. Non-invasive light sensor with enhanced sensitivity for photonic integrated circuits // 2022 17th Conference on Ph. D Research in Microelectronics and Electronics (PRIME). IEEE, 2022. P. 285–288.

УДК [621.315.5:535.93]:681.586

Оценка влияния технологических особенностей формирования волноводов электронной литографией на параметры интегрально-оптического газового сенсора на основе микрокольцевого резонатора

Митрофанова А. Е.[1,2], Ромашкин А. В.[3], Светиков В. В.[4,5], Стахнёв Д. Д.[3,4]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
mitrofanova.ae@phystech.edu
[3] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
romaleval@gmail.com
[4] АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
vl.svetikov@yandex.ru, stahnyov@zntc.ru
[5] Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН
119991, ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, 38

Оценено влияние на чувствительность газового сенсора наклона боковых стенок волновода с модифицирующим слоем углеродных нанотрубок. Предложены технологические приемы и топология, минимизирующие влияние особенностей электронной литографии и плазмохимического травления на характеристики интегральных структур.

Ключевые слова: интегральная фотоника; газовый сенсор; углеродная нанотрубка.

Evaluation of the impact of technological features of waveguide formation using electron lithography on the parameters of an integrated optical gas sensor based on a microring resonator

Mitrofanova A. E.[1,2], Romashkin A. V.[3], Svetikov V. V.[4,5], Stakhnev D. D.[3,4]
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
mitrofanova.ae@phystech.edu
[2] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[3] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
romaleval@gmail.com
[4] "Zelenograd Nanotechnology Center" JSC
124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6
vl.svetikov@yandex.ru, stahnyov@zntc.ru

[5] *Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences 119991 GSP-1, Russia, Moscow, Vavilov St., 38*

The effect of the side walls inclination of a waveguide with a carbon nanotube modifying layer on the gas sensor sensitivity was assessed. Technological approaches and a topology were proposed to minimize the impact of electron-beam lithography and plasma-chemical etching features on the characteristics of integrated structures.
Keywords: integrated photonics; gas sensor; carbon nanotube.

В последние несколько лет активно исследуется возможность создания селективного фотонного газового датчика. Для распознавания газов может использоваться фотонная интегральная схема с массивом чувствительных элементов с тонкими модифицирующими слоями, изменяющими показатель преломления (*n*) при адсорбции газов [1]. Различия в характере изменения *n* между амидированными и карбоксилированными углеродными нанотрубками на длине волны 1625 нм при отклике на H_2O и NH_3 [2] могут использоваться для создания массива датчиков, исключающих влияние влажности воздуха на оценку NH_3 и других газов, а также обладающих и радиационной стойкостью.

Однако, при реализации чувствительного элемента значительный вклад в характеристики микрокольцевого резонатора вносят особенности техпроцесса электронолитографии и последующего формирования волноводов. Изменение угла наклона стенок волновода и скругления углов, возникающее в процессе травления, изменяют расположение мод внутри волновода и связь между ними на отдельных участках, а также влияет и на взаимодействие с газочувствительным слоем. Это необходимо учитывать, так как добротность микрокольцевого резонатора во многом определяется регионом связи с волноводом, а ее уменьшение ведет к значительному усложнению детектирования. В работе исследовано влияние угла наклона боковой стенки волновода на характеристики устройства. Предложены подходы, позволяющие учесть влияние изменения геометрии волновода на этапе проектирования. Моделирование проведено методами распространения пучка и конечных разностей во временной области (BPM и FDTD, RSoft CAD).

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки России (государственное задание FSMR-2026-0006).

Литература

1. Mi G., Horvath C., Van V. Silicon photonic dual-gas sensor for H_2 and CO_2 detection // Optics express, 2017. Vol. 25. № 14. P. 16250–16259.
2. Romashkin A. V. et al. Comparison of the refractive index changes of nanolayers of amidated and carboxylated carbon nanotubes after adsorption of water and ammonia molecules // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics, 2025. Vol. 18. № 3.1. P. 12–18.

УДК 535.361

Использование формализма КТП для расчета коэффициентов рассеяния на случайных неоднородностях кремниевых волноводов

Бабичек И. В.[1,2], Барабаненков М. Ю.[2]
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
[2] *АО «НИИМЭ» 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1*

Предложена физическая модель, основанная на формализме теории рассеяния в случайных средах. Приводится вывод аналитической формулы для действительной и мнимой части коэффициента распространения волноводной моды в приближении малых неоднородностей на основе уравнений Дайсона и Бете — Солпитера и их влияние на характеристики кольцевых резонаторов и М-Ц интерферометров в кремнии.
Ключевые слова: рассеяние; волновод; фотоника; поверхностные шероховатости.

Calculation of scattering coefficients on random inhomogeneities of silicon waveguides via the QFT formalism

Babichek I. V.[1,2], Barabanenkov M. Yu.[2]
[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) 9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia*
[2] *Molecular Electronics Research Institute JSC 6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia*

A physical model based on the formalism of the theory of scattering in random media is proposed. An analytical formula is derived for the real and imaginary parts of the waveguide mode propagation coefficient in the small inhomogeneity approximation based on the Dyson and Bethe-Salpeter equations and their effect on the characteristics of ring resonators and M-C interferometers in silicon.
Keywords: scattering; waveguide; photonics; surface roughness.

В интегральной фотонике ключевой проблемой остается минимизация потерь распространения излучения в волноводных структурах. Одним из основных механизмов потерь является рассеяние на технологических неоднородностях показателя преломления, возникающих в процессе производства [1]. Такие неоднородности могут иметь как объемный характер (флуктуации состава сердцевины), так и поверхностный (шероховатость границ раздела). Для количественного описания этих эффектов необходим строгий статистический подход, обеспечивающий выполнение закона сохранения энергии. В данной работе применяется формализм уравнений Дайсона и Бете — Солпитера совместно с оптической теоремой в теории многократного рассеяния волн [2, 3].

Среднее поле в волноводе удовлетворяет волновому уравнению в скалярном приближении:

$$\nabla^2 E + \left[\nabla\left(E\frac{\nabla\varepsilon}{\varepsilon}\right)\right]_{=0} + \omega^2\varepsilon\mu E = 0$$
$$(\nabla^2 + k_0^2 - M)\psi = 0 \quad (1)$$

где M — массовый оператор, описывающий влияние рассеивающей среды на распространение средней волны.

Ключевым физическим результатом работы аналитическое выражение для массового оператора M, который согласно оптической теореме связана с полным сечением рассеяния энергии из данной моды во все доступные каналы [2]. В случае многомодового волновода сюда входит рассеяние в другие направляемые моды (межмодовая конверсия) и в моды непрерывного спектра (потери на излучение). Поправка к показателю преломления и коэффициент ослабления получаются из массового оператора так:

$$\Delta\beta_m \approx \frac{M_{mm}(\beta_m)}{\beta_m} = k_0\Delta n_{eff} + i\alpha_{total}.$$

На основе уравнения Дайсона для средней функции Грина выведена формула для поправки к постоянной распространения мод волновода со случайными поверхностными неоднородностями диэлектрической проницаемости. Получены выражения для коэффициента ослабления, коэффициента рассеяния в излучение и коэффициента рассеяния назад. Также получено выражение для дисперсии добротности кольцевого резонатора в зависимости от параметров шероховатости стенок. Полученные выражения удовлетворяют оптической теореме в первом порядке по корреляционной функции потенциала, что гарантирует физическую корректность расчета потерь мощности на рассеяние. Результаты работы могут быть использованы для оценки допустимых уровней технологических неоднородностей в интегрально-оптических волноводах и планарных световодах КНИ-технологии.

Литература

1. Lee K. et al. Fabrication of ultralow-loss Si/SiO_2 waveguides by roughness reduction // Optics letters, 2001. P. 1888–1890.
2. Барабаненков Ю. Н., Финкельберг В. М. Оптическая теорема в теории многократного рассеяния волн // Известия вузов. Радиофизика. 1968. — Т. 11. — № 5. — С. 719–725.
3. Gulyaev Yu. V., Barabanenkov Yu. N., Barabanenkov M. Yu., Nikitov S. A. Optical theorem for electromagnetic field scattering by dielectric structures and energy emission from the evanescent wave // Physical Review E, 2005. Vol. 72. P. 026602.
4. Barabanenkov, Yu. N. Application of the smooth-perturbation method to the solution of general equations of multiple wave-scattering theory. Sov. Phys. JETP. 1968. P. 954.
5. Егоров, А. А. Применение метода мод и метода функций Грина при векторном анализе волноводного рассеяния лазерного излучения // Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science, 2005. P. 5–19.

УДК 621.372.83

Направленный ответвитель на платформе LNOI для поляризационно селективного и поляризационно независимого деления

Пошевкина А. А.[1,2], Шарапова П. Р.[1]
[1] ООО «МЦКТ»
121205, г. Москва, тер. Инновационного Центра Сколково, Большой б-р, 30, стр. 1
a.poshevkina@gmail.com
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Разработан направленный ответвитель на основе тонких пленок ниобата лития на изоляторе (LNOI), который за счет выбора длины взаимодействия может служить как в качестве поляризационно независимого симметричного светоделителя, так и в качестве поляризационного светоделителя.
Ключевые слова: тонкопленочный ниобат лития на изоляторе; волноводный светоделитель; поляризационный светоделитель; линейный ответвитель; связанные моды; интегральная фотоника.

Interaction-Length-Controlled Directional Coupler on LNOI for Polarization-Selective and Polarization-Independent Splitting

Poshevkina A. A.[1,2], Sharapova P. R.[1]
[1] "Russian Quantum Center" LLC
30 Bolshoy Blvd., Bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russia
a.poshevkina@gmail.com
[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[3] Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

A directional coupler based on lithium niobate on insulator (LNOI) thin films is proposed, which, by tuning the interaction length, can function either as a polarization-independent symmetric beam splitter or as a polarization beam splitter.
Keywords: LNOI; lithium niobate on insulator; waveguide beam splitter; directional coupler; polarization beam splitter; integrated photonics.

На сегодняшний день одним из наиболее универсальных и перспективных материалов для производства интегральных фотонных схем, используемых в квантовых вычислениях, является ниобат лития, предлагающий сочетание таких свойств, как высокая нелинейность второго порядка, широкое окно прозрачности и сильные электрооптические коэффициенты. Эти качества позволяют производить

на одном устройстве, как линейные элементы – светоделители и фазовращатели, так и нелинейные элементы, основанные на эффекте параметрического рассеяния света, с высокой эффективностью. В последние годы особую популярность приобрела платформа тонких пленок ниобата лития на изоляторе (LNOI) [1–4], которая, в отличие от традиционных волноводов из ниобата лития, позволяет производить более плотную упаковку элементов на чип, а также генерировать сжатый свет внутри волновода и модифицировать его свойства при помощи изменения геометрии поперечного сечения волновода [5, 6]. Эти атрибуты делают LNOI особенно подходящим для разработки квантовых оптических процессоров с улучшенной производительностью и масштабируемостью.

Простейшим и самым необходимым элементом любой оптической схемы является светоделитель. Хорошо известны решения для одной поляризационной моды в виде направленного ответвиеля [7]. Однако в случаях, когда важно оперировать разными поляризационными модами, возникает необходимость проектировать поляризационно независимые элементы. Работы по созданию поляризационных светоделителей также активно ведутся. Были предложены, как реализации на основе направленного ответвителя [8], так и с помощью более сложных структур [9–11]. В данной работе мы изучаем, как линейный ответвитель, поддерживающий несколько волноводных мод (например TM0 и TE0) может служить в качестве универсального линейного элемента за счет подбора длины взаимодействия, исполняя функции поляризационно независимого симметричного светоделителя и поляризационного светоделителя.

В ходе работы нами была определена поперечная геометрия волновода (рис. 1), поддерживающая две моды различной поляризации (TE0 и TM0) на телекоммуникационной длине волны 1,55 мкм.

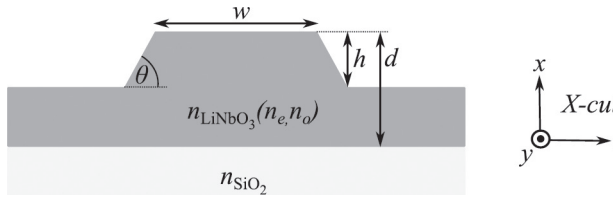


Рис. 1. Эскиз поперечного сечения волновода LNOI с шириной w = 0,6 мкм, высотой d = 0,3 мкм, глубиной травления h = 0,2 мкм и углом θ = 45° для X среза кристалла

С учетом технологических ограничений производства и желаемой миниатюризации устройства была определена величина зазора между волноводами, обеспечивающая эффективное взаимодействие полей. Исследовано влияние расстояния разведения волноводов на подавление взаимного взаимодействия, а также влияние радиуса изгиба S-образных участков на потери. Были получены зависимости коэффициентов отражения и пропускания от длины взаимодействия. Получены значения коэффициентов связи и соответствующих длин полного перетекания энергии между волноводами для каждой из мод. Найдены длины взаимодействия, обеспечивающие работу данного устройства в режиме поляризационного светоделителя и поляризационно независимого симметричного светоделителя. Показано, что для моды TM0 потери на изгибе остаются существенными, и составляют около

20 % на элемент, даже при больших радиусах изгиба, тогда как для TE0 моды возможна реализация элемента с потерями менее 1 % уже при радиусах закругления от 50 мкм.

В результате исследования нами были определены геометрические параметры светоделителя, обеспечивающие минимальные потери и компактность устройства для заданной поперечной геометрии волновода. Полученные результаты могут быть использованы при разработке интегральных квантовых фотонных схем на платформе LNOI.

Литература

1. Labbé, F., Ekici, C., Zhdanov, I., Muthali, A. L., Oxenløwe, L. K., & Ding, Y. (2025). Thin-film lithium niobate quantum photonics: Review and perspectives. Advanced Photonics, 7(4), 044002. https://doi.org/10.1117/1.AP.7.4.044002.
2. Zhu D., Hu, H., Zheng, L. et al. (2021). Integrated photonics on thin-film lithium niobate. Advances in Optics and Photonics, 13(2), 242–352. https://doi.org/10.1364/AOP.411024.
3. Kim C., Kim, H., Moon, S. et al. (2025). Integrated lithium niobate photonic devices for photonic quantum information science. Nano Convergence, 12, 65. https://doi.org/10.1186/s40580-025-00530-0.
4. Boes A., Corcoran, B., Chang, L., Bowers, J., & Mitchell, A. (2018). Status and potential of lithium niobate on insulator (LNOI) for photonic integrated circuits. Laser & Photonics Reviews, 12, 1700256. https://doi.org/10.1002/lpor.201700256.
5. Zhao J., Fang, B., Zhang, Y. et al. (2022). Flexible source of correlated photons based on LNOI rib waveguides. Journal of Physics: Photonics, 4(2). https://doi.org/10.1088/2515-7647/ac5a5b.
6. Pham, T. D., Chiu C. C., Tsai, P. J., & Chen, Y. H. (2024). Multifunction integrated lithium niobate photonic chip for photon-pair generation and manipulation. Optics Express, 32(3), 3673–3687. https://doi.org/10.1364/OE.509229.
7. Babel S., Bollmers, L., Massaro, M., Luo K. H., Stefszky, M., Pegoraro, F., Held, P., Herrmann, H., Eigner, C., Brecht, B., Padberg, L., & Silberhorn, C. (2023). Demonstration of Hong–Ou–Mandel interference in an LNOI directional coupler. Optics Express, 31, 23140–23148. https://doi.org/10.1364/oe.484126.
8. Gong Z., Yin, R., Ji, W., Wang, J., Wu, C., Li, X., & Zhang, S. (2017). Optimal design of DC-based polarization beam splitter in lithium niobate on insulator. Optics Communications, 396, 23–27. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.03.028
9. Wu Y., Sun, X., Li, H., Lu, C., Zhang, Y., Liu, S., Zheng, Y., & Chen, X. (2018). Lithium niobate thin-film polarization beam splitter based on asymmetric directional coupling. IEEE Photonics Journal, 10(1), 1–8. https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2791510.
10. Yuan M., Han, X., Xiao, H., Nguyen T. G., Boes, A., Ren, G., Hao, Q., Xue, J., Mitchell, A., & Tian, Y. (2019). Integrated lithium niobate polarization beam splitter based on a photonic-crystal-assisted multimode interference coupler. Optics Letters, 44(6), 1341–1344. https://doi.org/10.1364/OL.44.001341.
11. Tao J., Li, X., Li, J., Dai, S., Zhao, Y., Wei, C., & Liu, J. (2021). Compact, high-extinction-ratio, and low-loss polarization beam splitter on lithium-niobate-on-insulator using a silicon nitride nanowire-assisted waveguide and a grooved waveguide. Micromachines, 12(10), 1210. https://doi.org/10.3390/mi12101210.

УДК 543.424.2

СИПМ-зонд с ГКР-активным слоем на основе системы Mo-Ag для исследования клеток in situ

Кондратьева С. А.[1,2], Новиков Д. В.[1,2], Колмогоров В. С.[2], Тарасов А. М.[1], д. ф.-м. н. Пархоменко Ю. Н.[2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] Национальный исследовательский технический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1
sonyk.220412@yandex.ru

В работе рассмотрена проблема создания ГКР-активных слоев на поверхности нанокапилляров для комбинированной методики сканирующей ион-проводящей микроскопии и спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния, применяемой в сверхчувствительном анализе живых систем. Предложено формирование массивов плазмонных наночастиц из многокомпонентной пленки Mo-Ag с последующим термическим воздействием, что позволяет избежать характерного для чистого серебра снижения эффективности из-за сульфидизации. Исследовано комплексное воздействие условий формирования ГКР-активного слоя на поверхности СИПМ-капилляра на параметры массива плазмонных наночастиц Ag и эффективности усиления сигнала комбинационного рассеяния (КР) света. Показаны КР-спектры модельного аналитического вещества родамин 6G (R6G) и возможность исследования состава и механических характеристик клеточных структур данными капиллярами.
Ключевые слова: сканирующая ион проводящая микроскопия; гигантское комбинационное рассеяние света; ионно-плазменное распыление.

SICM-probe with a SERS-active layer based on the Mo-Ag system for in situ cell imaging

Kondratieva S. A.[1,2], Novikov D. V.[1,2], Kolmogorov V. S.[2], Tarasov A. M.[1], Sc.D Parkhomenko Y. N.[2]
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[2] National University of Science and Technology "MISIS"
119049, Russia, Moscow, Leninsky Ave., 4, b. 1
sonyk.220412@yandex.ru

This article examines the creation of SERS-active layers on the surface of nanocapillaries for a combined technique of scanning ion-conducting microscopy and giant Raman spectroscopy used in the ultrasensitive analysis of living systems. The formation of plasmonic nanoparticle arrays from a multicomponent Mo-Ag film followed by thermal treatment is proposed, which avoids the reduction in efficiency due to sulfidation typical of pure silver. The complex effect of the SERS-active layer formation conditions on the surface of a SIPM capillary on the parameters of the plasmonic Ag nanoparticle array and the amplification efficiency of the Raman scattering (RS) signal is studied. The Raman spectra of the model analytical substance rhodamine 6G (R6G) and the

feasibility of studying the composition and mechanical properties of cellular structures using these capillaries are presented.

Keywords: scanning ion conduction microscopy; surface-enhanced Raman spectroscopy; ion-plasma sputtering.

В последние годы подходы к разработке и апробации лекарственных препаратов основываются на исследовании их влияния на биологические системы, включая как единичные клетки, так и живой организм в целом [1]. Развитие сверхчувствительного анализа живых систем требует создания новых зондовых структур, сочетающих высокую топографическую разрешающую способность с возможностью химического анализа компонентов. Одним из таких методов является комбинирование сканирующей ион-проводящей микроскопии (СИПМ), с использованием в качестве зондов –нанокапилляров, и спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР) [2].

При формировании ГКР-активного слоя на поверхности СИПМ-капилляров нужно учитывать следующие особенноси: наноразмер кончика капилляра, чтобы не повредить клетку; кончик не должен закрываться плазмонными наночастицами и массив должен быть стабилен в растворах исследования. Для формирования равномерных массивов наночастиц (НЧ) на поверхности капилляров используются физические методы. Чаще всего в качестве ГКР-активных слоев применяются массивы Ag НЧ, так как они демонстрируют плазмонные свойства с максимальным коэффициентом усиления, однако на воздухе они склонны к сульфидизации и адсорбции, что снижает их эффективность [3]. Эта проблема решается применение многокомпонентных пленок, например Mo-Ag, из которых энергетическим воздействием формируется массив плазмонных НЧ. Равномерность массива наночастиц на поверхности капилляра обеспечивается его вращением во время формирования многокомпонентной пленки.

При создании эффективных ГКР-слоев следует учитывать множество факторов: длина волны плазмонного резонанса НЧ; проводимость материала НЧ и подложки; форма, размер и взаимное положение НЧ [4]. Однородность массива НЧ влияет на воспроизводимость и качество ГКР-сигнала. Оптимизацию конструкции и поиск эффективных параметров массива плазмонных частиц эффективнее всего проводить с помощью математического моделирования. Моделирование позволяет создать виртуальную структуру с возможностью изменения параметров системы и изучения влияния этих изменений на свойства структуры.

В данной работе проводилось математическое моделирование по уравнению Лапласса и методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics, позволяющее описать распределение напряженности электрического поля для массива плазмонных НЧ на поверхности ГКР-активного слоя при воздействии падающего света с длиной волны 532 нм. Для этого была взята модель, представленная системой из равноудаленных друг от друга Ag НЧ на поверхности тонкой пленки Mo_xO_y (рис. 1), и рассматривались зависимости коэффициента усиления сигнала комбинационного рассеяния от размера и расстояния между частицами.

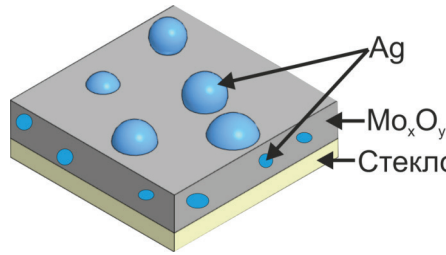


Рис. 1. Схематическое изображение ГКР-активного слоя на капилляре

Были исследованы зависимости параметров массива Ag НЧ от условий формирования. Получены ГКР-активные слои на поверхности капилляров с коэффициентом усиления до $2 \cdot 10^5$. Толщина тонкой пленки системы Mo-Ag составляла от 20 до 160 нм, скорость вращения от 1 до 25 об/сек. Энергетическое воздействие для выделения массива наночастиц производилось в муфельной печи на воздухе при температуре от 150 до 300 °C и выдержке при заданной температуре от 10 до 30 минут. ГКР-активность полученных капилляров измерялась с помощью водного раствора красителя R6G концентрацией 10 мкМ. С помощью капилляров с оптимальным режимом нанесения ГКР-активного слоя были получены КР-спектры и топография сфероидов клеточной линии MCF-7 с противоопухолевым препаратом доцетакселем (DOC).

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 22-19-00824-П. Измерение ГКР-активности и модифицирование капилляров проводилось в научно-исследовательской лаборатории «Фотонная сенсорика и плазмонные метериалы» в рамках государственного задания 2024-2026 FSMR-2024-0012.

Литература

1. Wei F. A review for cell-based screening methods in drug discovery / F. Wei, S. Wang, X. Gou // Biophysics reports, 2021. Vol. 7. № 6. P. 504.
2. Bulbul G. Nanopipettes as monitoring probes for the single living cell: state of the art and future directions in molecular biology / G. Buldul, G. Chaves, J. Olivier, Ozel R. E., N. Pourmand // Cells, 2018. Vol. 7. № 6. P. 55.
3. Keast V.J. Atmospheric corrosion of silver and silver nanoparticles // Corrosion and Materials Degradation, 2022. Vol. 3. № 2. P. 221–234.
4. Boyack R. Investigation of particle shape and size effects in SERS using T-matrix calculations / R. Boyack, E.C. Le Ru // Physical Chemistry Chemical Physics, 2009. Vol. 11. № 34. P. 7398–7405.

УДК 621.383.522

Анализ характеристик и оптимизация волноводных UTC-фотодетекторов на технологической платформе фосфида индия

Садов Ф. А., Гришаков К. С., к. ф.-м. н., Васильевский И. С., д. ф.-м. н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
fs502@mail.ru, ksgrishakov@mephi.ru, isvasilyevskij@mephi.ru

Проведен теоретический анализ и оптимизация волноводного InP UTC-фотодетектора. Выявлена связь характеристик прибора с его геометрией и структурой. Предложена конструкция конвертера моды, обеспечивающая эффективность передачи оптической мощности из оптоволокна в активный поглощающий слой более 80 %.
Ключевые слова: волноводный фотоприемник; адиабатический конвертер моды; эванесцентно-связанные волноводы; чувствительность; ширина полосы; фотодетектор с униполярным дрейфом.

Analysis and Optimization of InP-Based Waveguide UTC Photodetectors

Sadov F. A., Grishakov K. S., Ph.D, Vasil'evskii I. S., Sc.D
National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia
fs502@mail.ru, ksgrishakov@mephi.ru, isvasilyevskij@mephi.ru

A theoretical analysis and optimization of a InP-based waveguide uni-traveling-carrier (UTC) photodetector have been carried out. The relationship between the device performance and its geometry and structural design has been established. A mode converter design is proposed that provides an optical power coupling efficiency of more than 80% from an optical fiber into the active absorbing layer.
Keywords: waveguide photodetector; adiabatic mode converter; evanescently coupled waveguides; responsivity; bandwidth; uni-traveling-carrier photodetector.

Непрерывный рост объемов передаваемой информации в оптических системах, обусловленный развитием центров обработки данных, облачных технологий и сетей 5G/6G, требует фотоприемных устройств с высокой чувствительностью и широкой полосой пропускания [1]. Современные оптические модули обеспечивают скорости передачи данных порядка 100 Гбит/с и выше, что предъявляет жесткие требования к быстродействию фотодетекторов. Традиционные фотодетекторы с вертикальной засветкой ограничены компромиссом между квантовой эффективностью и полосой пропускания, что стимулирует переход к волноводным фотоприемникам.

Волноводные фотодетекторы на технологической платформе InP позволяют разделить процессы поглощения и транспорта носителей. Наибольший интерес представляют фотодетекторы с униполярным дрейфом (UTC, от англ. *uni-travelling-carrier*), в которых области поглощения и дрейфа разделены, а перенос осуществляется электронами, что снижает времяпролетные ограничения ширины полосы.

Данная работа посвящена количественному анализу характеристик волноводных UTC-фотодетекторов на технологической платформе InP. Установлено, что для обеспечения полосы пропускания свыше 50 ГГц толщина поглощающего слоя должна составлять ≤ 0,3 мкм при ширине 4–5 мкм. Подобные геометрические ограничения активной области приводят к существенным потерям при прямой стыковке со стандартным линзированным оптическим волокном (диаметр моды ~ 4 мкм) и, как следствие, снижению чувствительности устройства.

Для минимизации потерь предложена архитектура на основе эванесцентно-связанных волноводов [2]. В данной схеме (рис. 1) излучение вводится в пассивный волновод с эффективностью более 90 %, после чего передается в активную область через оптимизированный адиабатический преобразователь моды. Расчеты методом разложения по собственным модам (EME) для длины волны 1,55 мкм подтвердили, что предложенная конструкция обеспечивает эффективность передачи мощности свыше 80 %.

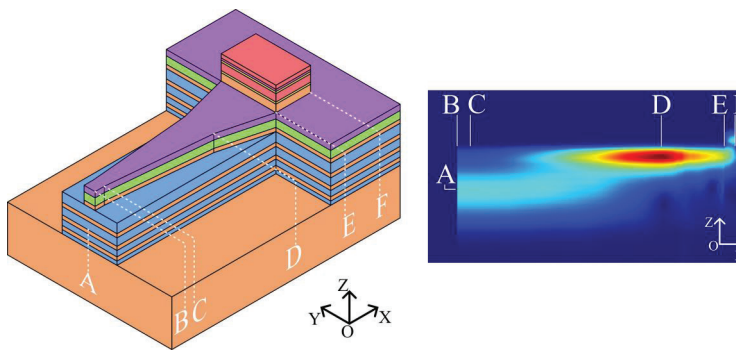


Рис. 1. Конструкция волноводного InP-фотодетектора с интегрированным конвертером моды

На рис. 1 слева представлена 3D-схема устройства. Данная структура обеспечивает эффективный ввод излучения из оптоволокна (A). Адиабатический преобразователь моды (BF) передает излучение в активную область (FG), в которой происходит поглощение более 80 % исходной мощности. Справа показано пространственное распределение модуля электрического поля в сечении, перпендикулярном оси Y и проходящем через центр симметрии структуры.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке высокоскоростных фотоприемных модулей для систем оптической связи со скоростями 100 Гбит/с и выше. Предложенное решение позволяет обеспечить одновременно широкую полосу пропускания и высокую чувствительность, что критично для современных телекоммуникационных применений.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: на основе многопараметрической глобальной оптимизации слоевой структуры и геометрии, учитывающей влияние размеров активной области на полосу пропускания, разработана архитектура адиабатического конвертера моды.

Решение обеспечивает передачу более 80 % оптической мощности из оптоволокна в активный поглощающий слой фотодетектора.

Литература

1. Zhou X. et al. Scaling large data center interconnects: Challenges and solutions // Optical Fiber Technology, 2018. Vol. 44. P. 61–68.
2. Ye H. et al. High speed evanescent waveguide photodetector with a 100 GHz bandwidth // Applied Physics Express, 2024. Vol. 17. № 1. P. 012001.

УДК 004.942

Экспериментальное исследование предиктивного анализа сервисного обслуживания промышленных объектов

Голубева И. А., д. т. н., Гагарина Л. Г., Вологжанин Н. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Проведено экспериментальное исследование для выявления оптимальной комбинации параметров модели предиктивного анализа сервисного обслуживания промышленных объектов, а также произведена оценка предложенных решений.
Ключевые слова: предиктивный анализ; фильтр Калмана; модели деградации; метод Монте-Карло.

Experimental study of predictive analysis of industrial facility maintenance services

Golubeva I. A., Sc.D, Gagarina L. G., Vologzhanin N. A.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

An experimental study was conducted to identify the optimal combination of parameters for a predictive analysis model for industrial facility maintenance services, and the proposed solutions were evaluated.
Keywords: Predictive analysis; Kalman filter; degradation models; Monte Carlo method.

В настоящее время объемы данных, генерируемых системами мониторинга промышленного оборудования, постоянно возрастают, что значительно усложняет планирование оперативного обслуживания по состоянию. В условиях ограниченных вычислительных ресурсов и высокой неопределенности процессов деградации крайне важно не только собирать данные, но и обеспечивать их интерпретируемый, физически обоснованный и вероятностный анализ. Следовательно, экспериментальное исследование гибридных подходов к предиктивному анализу, сочетающих в себе адаптивность нейронных сетей и теоретическую строгость стохастического моделирования, является актуальной и своевременной.

Известен ряд существующих методов решения задачи предиктивного анализа сервисного обслуживания. К ним относятся:

- методы теории надежности, основанные на статистических распределениях и фиксированных интервалах сервиса. В их работе не учитывается индивидуальное состояние конкретного экземпляра оборудования и не предусматривается адаптацию к изменяющимся условиям эксплуатации[1];
- байесовские процедуры, применение которых требует наличия априорных знаний о распределении ресурса и которые демонстрируют высокую чувствительность к качеству входных данных [2];

- цифровые двойники, реализованные в виде детерминированных физико-математических моделей, однако не учитывающие стохастическую природу реальных отказов и влияние высокого уровня шума в сенсорных измерениях[1];
- классические методы анализа временных рядов (в частности, ARIMA или экспоненциальное сглаживание), ограниченные в способности выявлять сложные нелинейные зависимости в многомерных потоках данных[2].

Ни один из перечисленных подходов не обеспечивает одновременно высокой точности прогноза и количественной оценки его неопределенности, что ограничивает их применимость при принятии обоснованных решений в условиях повышенных рисков.

В работе предлагается гибридная модель предиктивного анализа сервисного обслуживания промышленных объектов, объединяющая рекуррентную нейронную сеть для оценки текущего состояния оборудования, фильтр Калмана для адаптивной параметризации и выбор из трех стохастических моделей деградации (винеровского, гамма- и пуассоновского процессов) в зависимости от характера отказа. На основе уточненных параметров методом Монте-Карло генерируется ансамбль траекторий износа, что позволяет формировать вероятностную оценку остаточного срока службы. Данная работа фокусируется на экспериментальном исследовании предложенного подхода, включая выбор оптимальной реализации фильтра Калмана и верификацию эффективности гибридной модели на реальных данных.

В качестве языка программирования предлагается использование языка Python, а в качестве среды разработки –Google Colab.

В перспективе предусматривается применение программной реализации разработанных модели и алгоритма для автоматизации технологических процессов построения прогноза сервисного обслуживания на промышленных объектах в том числе –критической инфраструктуры.

Литература

1. Жиляков С. А., Карасев Е. М., Левочкин С. Б., Плешивцева Т. А. Ранняя диагностика и прогнозирование надежности промышленного оборудования на основе «цифрового двойника» // Neftegaz.RU, 2021. — № 5. — С. 60–68.
2. Хамамех Имад Прогнозирование времени отказа оборудования технологического процесса с помощью искусственной нейронной сети // Современная электроника, 2022. — № 5. — С. 42–44.

УДК 658.7:004

Адаптивная система управления запасами предприятия на основе цифровых двойников и предиктивной аналитики

Кузнецова Е. С.
АО «НИИ «Субмикрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, 5, стр. 2

Предложена трехуровневая архитектура адаптивной системы управления запасами (АСУЗ), интегрирующая цифровые двойники изделий, гибридные модели машинного обучения (LSTM, Survival Analysis) и алгоритм Apriori для прогнозирования отказов с точностью 81 % и динамического резервирования. Апробация на высокотехнологичном предприятии показала снижение среднего уровня запасов на 25 %, сокращение времени реакции на сбои в четыре раза и уменьшение простоев из-за дефицита на 87 % при обеспечении коэффициента готовности Кг ⩾ 0,98.
Ключевые слова: адаптивное управление запасами; цифровой двойник; предиктивная аналитика; сложные технические системы; динамическое резервирование; машинное обучение

Adaptive Inventory Management System for an Enterprise Based on Digital Twins and Predictive Analytics

Kuznetsova E. S.
Submicron Scientific Research Institute JSC
5 Georgievsky Ave., bld. 2, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

A three-level architecture of an adaptive inventory management system (AIMS) is proposed, integrating digital twins of products, hybrid machine learning models (LSTM, Survival Analysis) and the Apriori algorithm for failure prediction with 81 % accuracy and dynamic redundancy. Testing at a high-tech enterprise showed a 25 % reduction in average inventory levels, a 4-fold decrease in response time to failures, and an 87 % reduction in downtime due to shortages, while ensuring an availability factor Kг ⩾ 0.98.
Keywords: adaptive inventory management; digital twin; predictive analytics; complex technical systems; dynamic redundancy; machine learning

В условиях возрастающей сложности технических систем и требований к бесперебойной работе производства актуальным является переход от реактивных к предиктивным стратегиям управления запасами элементов замены. Цель работы – разработка модели управления запасами, повышающей надежность и снижающей затраты на техническое обслуживание и ремонт средств производства.

Научная новизна заключается в синтезе трехуровневой архитектуры, интегрирующей цифровые двойники изделий, предиктивную аналитику и гибридные модели машинного обучения для динамического расчета оптимального уровня запасов. Ключевым отличием является реализация динамического резервирования на основе оценки рисков срыва поставок и прогнозирования отказов с точностью до 81 % с использованием алгоритма Apriori для идентификации состава ремонтных комплектов.

Методика базируется на цифровых двойниках как динамически обновляемых виртуальных моделях, обеспечивающих сбор эксплуатационных данных в режиме, близком к реальному времени. Прогнозирование отказов осуществляется с помощью гибридных моделей LSTM и Survival Analysis, обученных на исторических данных средств производства. Оптимизация уровня запасов выполняется на основе динамической формулы, учитывающей прогнозируемую потребность, надежность поставщика и оценку риска срыва поставки.

Практическая апробация разработанной АСУЗ на предприятии электронной промышленности продемонстрировала значительное улучшение ключевых показателей. Средний уровень запасов снижен на 25% по сравнению с традиционной системой за счет исключения субъективных страховых надбавок и перехода к расчету на основе фактического состояния оборудования. Время реакции на сбои сокращено в четыре раза (с 48 до 12 часов) благодаря автоматизированному мониторингу критических параметров и предиктивной диагностике на базе LSTM-сетей, идентифицирующей 92% аномалий менее чем за 10 минут. Простои из-за дефицита запасных частей уменьшены на 87% за счет алгоритма динамического резервирования, который при прогнозе отказа инициирует пополнение критических компонентов с учетом времени поставки и кросс-проектное перемещение ресурсов. Коэффициент готовности оборудования Кг обеспечен на уровне не ниже 0,98.

Внедрение адаптивной системы управления запасами позволяет перейти от реактивной модели (по факту отказа) к предиктивной, основанной на планировании замены до наступления отказа и оптимизации страховых запасов. Система повышает устойчивость сложных технических систем к сбоям в цепочках поставок, снижает эксплуатационные издержки и создает основу для конкурентоспособности высокотехнологичных предприятий электронной промышленности.

Литература

1. Michael R. Linders, Harold E. Fearon. Supply and Inventory Management. Logistics. Moscow: Victoria Plus, 2006. 768 p.
2. Щеглов Д. К., Ещенко М. Н., Борина А. П., Ухов А. А. Теоретические основы применения концепции цифровых двойников для создания интеллектуальной системы мониторинга технического состояния и обслуживания сложной наукоемкой продукции // Судостроение, 2023. — № 5 (870). — С. 21–26.
3. Царев М. В., Андреев Ю. С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия вузов. Приборостроение, 2021. — Т. 64. — № 7. — С. 517–531.

УДК 621.3.049

Моделирование температурного профиля в процессе поверхностного монтажа с использованием гибридной нейронной сети

к. т. н. Кондрашов В. В., Барсукова А. А.
ПАО «НПО «Стрела»
300002, г. Тула, ул. М. Горького, 6
anastasiy_barsukova@mail.ru

Предложен метод прогнозирования температурной кривой пайки SMD на основе гибридной нейросети (1D/2D-свертки + полносвязные ветви для числовых признаков). Метод обеспечивает оперативное предсказание профиля в многозонной печи (9 зон) и снижает число экспериментальных прогонов при подготовке технологического процесса.
Ключевые слова: температурная кривая; поверхностный монтаж; нейросеть; CNN; SMD.

Ph.D Kondrashov V. V., Barsukova A. A.
PAO "NPO "Strela"
301000, Tula, Russia
office@npostrela.net

A method for predicting the SMD reflow temperature profile is proposed based on a hybrid neural network (1D/2D convolutions + dense branches for numeric features). The method provides fast profile prediction for a multi-zone oven (9 zones) and reduces experimental runs.
Keywords: temperature profile; surface mount; neural network; CNN; SMD.

В работе рассматривается задача предсказания температурной кривой пайки для плат с элементами поверхностного монтажа (SMD) в многозонных печах. Традиционные эмпирические и численные методы требуют существенных затрат времени и ресурсов, применение нейросетевых методов позволяет ускорить процесс настройки и уменьшить число опытных плат.

Предлагается гибридная архитектура: сверточная ветвь для обработки временных рядов или пространственных представлений температур (1D/2D-свертки) и полносвязная ветвь для числовых признаков (количество компонентов, площадь платы и др.). Входы представляются в виде тензоров:

$$X_{img} \in \mathbb{R}^{C\times H\times W}, \quad X_{num} \in \mathbb{R}^{d}, , \tag{1}$$

где C — число каналов, H×W — размер изображения/карты, d — размер вектора числовых признаков. Архитектура продолженной нейросети представлена на рис. 1.

Целевая величина — температурная кривая T(t) в заданных контрольных точках печи. Для регрессии используется функция потерь MSE:

$$L_{MSE} = (1/N)\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{2}$$

и, при необходимости, для задач классификации дефектов используется Cross-Entropy:

$$L_{CE} = -\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{c=1}^{C}\left(\hat{y}_{i,c}\right). \quad (3)$$

Данные нормализуются (standardization/min-max), применяются фильтрация и сглаживание для снижения шумов измерений. Обучение — итеративное (градиентный спуск/Adam) с ранней остановкой и регуляризацией (Dropout, L2). Оценка качества: MSE, RMSE и максимальное отклонение на контрольных точках.

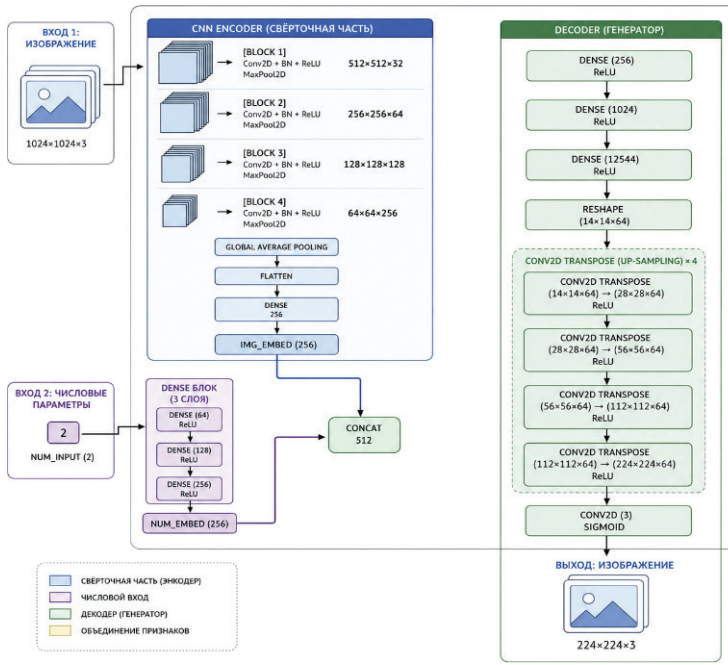


Рис. 1. Архитектура предложенной нейросети.

Процесс обучения состоит из предварительного обучения на синтетических данных минимизацией соответствующего loss. Рекомендуемые гиперпараметры для этой части обучения:

optimizer = Adam(lr = 1e-4),
batch_size = 16,
epochs_max = 100,
EarlyStopping(patience = 10),
ReduceLROnPlateau(factor = 0.5, patience = 5),
dropout ≈ 0.3, latent_dim ≈ 256.
Модель с наилучшим val_loss сохраняется.

После завершения предобучения модель фиксируется и применяется к реальным данным в режиме без какого-либо дообучения.

Получение обучающей выборки

Обучающей выборка была синтетически сгенерирована помощью алгоритма Монте-Карло. Объем синтетической обучающей выборки составил 1000 графиков. Для каждого примера генерировались числовые параметры: число компонентов (10–200), площадь платы (40–130 см^2) и их отношение; затем строился профиль по 10 зонам (Z1-Z9, C1) с клиппингом значений в диапазоне 80–280 °C. Профили сохранялись как изображения (224×224, без осей, у-диапазон 80–280) для подачи в CNN. Синтетические графики приведены на рис. 2.

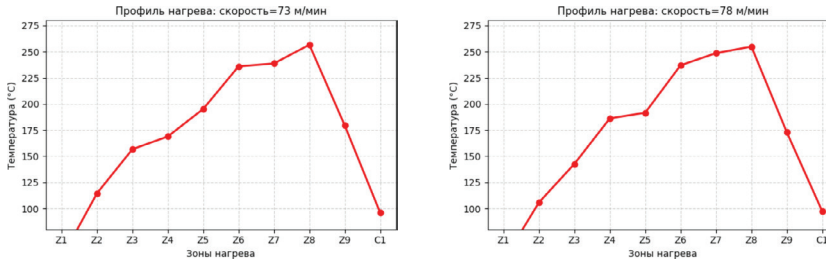


Рис. 2. Синтетические температурные профили, полученные на основе реальных данных

Проведение обучения

Гибридная модель (CNN-энкодер + числовой энкодер + декодер-изображение) предварительно обучалась на синтетической выборке объемом 800 графиков. Для повышения надежности результатов каждая конфигурация запускалась независимо три раза с различными значениями seed. В ходе обучения контролируется сходимость параметров loss и MAE на обучающей и валидационной выборках. По окончании обучения сохраняются следующие данные:

- лучшая модель по минимальному loss на валидации;
- логи обучения, loss и метрики по эпохам;
- параметры нормализации такие как среднее и стандартное отклонение для числовых признаков и целевых температур.

Модель продемонстрировала стабильную сходимость. Графики loss и MAE (см. рис. 2) показывают плавное снижение значений без признаков переобучения. На финальных эпохах (50–100) кривые выходят на плато, что свидетельствует о достижении предела обобщающей способности на синтетических данных.

Верификация на реальных экспериментальных данных

Для подтверждения возможности переноса знаний, полученных в ходе обучения на синтетических данных, проведена верификация модели на 10 реальных экспериментальных образцах. В данном эксперименте модель использовалась без какой-либо тонкой настройки или дообучения на реальных данных, что позволяет оценить истинную обобщающую способность архитектуры.

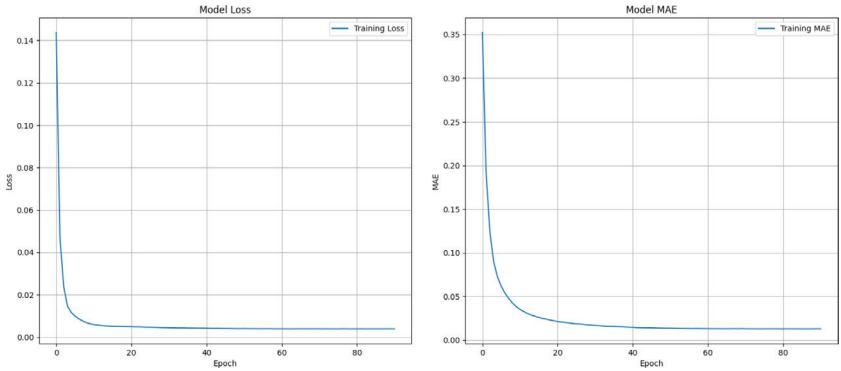


Рис. 3. Результат обучения модели на синтетических данных

Таблица 3. Метрики на реальных данных

Метрика	Значение, °C
$RMSE_{real}$	5,8
MAE_{real}	4,4
Max $Error_{real}$	13,5

Модель продемонстрировала высокую точность воспроизведения температурных профилей, сохранив ключевые характеристики топологии данных, полученных в ходе реальных экспериментов. Сравнение предсказанных профилей с экспериментальными данными (см. рис. 4) подтверждает, что даже при отсутствии реальных примеров в процессе обучения, модель корректно аппроксимирует физический процесс.

В работе предложен и экспериментально апробирован метод прогнозирования температурной кривой рефлоу для многозонной печи на основе гибридной нейросети, объединяющей сверточную ветвь (2D-CNN) для обработки пространственно-временных карт профиля и полносвязную ветвь для числовых параметров платы и процесса. Обучение выполнялось на синтетической выборке (1000 примеров) с последующей верификацией на реальных данных 10 образцов.

Разработана и реализована гибридная архитектура нейросети, учитывающая как изображения температурного профиля, так и числовые параметры платы и процесса.

Экспериментально подтверждена возможность переноса знаний модель, обученная исключительно на синтетических данных, показала высокую точность на реальных образцах без дообучения (RMSE = 5,8 °C, MAE = 4,4 °C).

Литература

1. Увайсов С. У., Черноверская В. В., Нгуен В. Д., Нгуен В. Т. Применение искусственной нейронной сети в задаче тепловой диагностики печатного узла бортового устройства контроля разбега самолета // МОИТ, 2022. 10 (3). DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.012.

2. Хоанг В. Ч., Сальников В. С. Нейросетевой подход к моделированию температурно-силовых характеристик процесса резания // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ», 2016. — Т. 8. — №3. — URL: http://naukovedenie.ru/PDF/59TVN316.pdf.

УДК 004.42

Модели машинного обучения для оценки задержек цепей на этапе размещения элементов на ПЛИС

Шокарев Д. Б., Чочаев Р. Ж.
НИЦ «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
shokarev.d.b@yandex.ru

Предложен ряд моделей оценки задержек цепей на этапе размещения на ПЛИС на основе машинного обучения. Выполнено сравнение полученных моделей с эмпирической моделью на основе таблиц задержек. Лучшая из полученных моделей позволила уменьшить среднюю абсолютную ошибку с 29,17 % до 12,74 %.
Ключевые слова: ПЛИС; размещение; градиентный бустинг над решающими деревьями; автоматизация проектирования.

Machine learning models for net delay estimation during FPGA placement

Shokarev D. B., Chochaev R. Zh.
NRC «Kurchatov Institute»
1, Akademika Kurchatova Sq., Moscow, 123182, Russia
shokarev.d.b@yandex.ru

A set of machine learning models for estimating net delay during the FPGA timing-driven placement were proposed. The models were compared with an empirical model based on delay tables. The best of the proposed models reduced the mean absolute percentage error from 29.17 % to 12.74 %.
Keywords: FPGA; placement; Gradient Boosted Decision Trees; electronic design automation (EDA).

Одна из ключевых проблем при размещении элементов проектируемых схем на ПЛИС с оптимизацией задержек заключается в необходимости быстрой оценки задержек цепей до проведения трассировки. Для решения данной проблемы используются различные модели оценки задержек, составляемые на основе данных о реальных задержках, полученных после временного анализа оттрассированной схемы. Сложность разработки подобных моделей заключается в поиске баланса между скоростью вычисления и точностью задержек, а также временем, необходимым для подготовки данных. При разработке моделей оценки задержек для точной оценки необходимо учитывать архитектурные особенности ПЛИС. Кроме того, реальная задержка цепей в пользовательской схеме зависит не от кратчайших путей, а от используемого в маршруте проектирования алгоритма трассировки. Учет особенностей алгоритма трассировки приводит к тому, что при любом его изменении для каждой поддерживаемой ПЛИС требуется обновление данных для модели оценки задержек. Поэтому подходы, требующие длительной подготовки данных, менее предпочтительны.

С учетом вышеизложенного к моделям оценки задержек, которые используются на этапе размещения на ПЛИС, предъявляются следующие требования:

- высокая скорость оценки,
- высокая точность оценки,
- учет особенностей используемого алгоритма трассировки,
- низкие временные затраты на подготовку данных для модели.

Поэтому в данной работе предложено использовать модели машинного обучения на основе деревьев решений. Для обучения и валидации моделей был подготовлен набор данных, содержащий информацию о цепях схемы (количество терминалов цепи, перегруженность, расстояния между источником и приемником и др.), полученную после прохождения полного маршрута проектирования для набора тестовых схем. Информация о задержках получена с помощью статического временного анализа после трассировки.

Было проведено сравнение предсказаний моделей градиентного бустинга XGBoost, CatBoost и случайного леса. Сравнивались как модели, обученные на полном наборе данных, так и отдельные модели, обученные независимо для каждого типа соединений. При оценке моделей использовались следующие метрики: средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE), среднее квадратичное отклонение (MSE), коэффициент детерминации R^2. Поскольку ключевой характеристикой модели задержки выступает время предсказания, то из полученных моделей приоритет отдавался имеющим наименьшее количество деревьев. Наилучший результат показала модель на основе случайного леса, обученная на полном наборе данных. Также было проведено сравнение полученной модели с эмпирической моделью на основе таблиц средних задержек. Сравнение показало, что модель на основе случайного леса позволяет уменьшить среднюю абсолютную процентную ошибку в 2,29 раза с 29,17 % до 12,74 %, а коэффициент детерминации R^2 увеличить с 0,61 до 0,91.

УДК 004.8:537.312

Прогнозирование деградации мемристоров в условиях сдвига домена с использованием transfer learning и моделей временных рядов

Алямовская А. А.[1,2], Мещанинов Ф. П.[2], к. ф.-м. н., Жевненко Д. А.[2], к. ф.-м. н., Горнев Е. С.[1,2], акад. РАН, д. т. н.
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
aalyamovskaya@niime.ru

В работе исследуется задача прогнозирования поведения мемристоров при изменении частоты и режима работы (сдвиг домена). Сравниваются современные модели временных рядов и подходы transfer learning. Эксперименты показывают, что модели, в архитектуре которых явно используется декомпозиция на тренд и сезонность показывают наилучшее качество, превосходя более сложные методы более чем на 20 %.
Ключевые слова: мемристоры; временной ряд; машинное обучение; трансфер лернинг.

Predicting memristor degradation under domain-shifting conditions using transfer learning and time-series models

Alyamovskaya A. A.[1,2], Meshchaninov F. P.[2], Ph.D, Zhevnenko E. A.[2], Ph.D, Gornev E. S.[1,2], Academician of the RAS, Sc.D
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
aalyamovskaya@niime.ru

This paper investigates the problem of predicting the behaviour of memristors when the frequency and operating mode change (domain shift). Modern time series models and transfer learning approaches, including full and partial fine-tuning, are compared. Experiments on open benchmarks and the real-world NNU dataset show that models whose architecture explicitly utilises decomposition into trend and seasonality demonstrate the best performance, outperforming more complex methods by over 20 %.
Keywords: memristors; time series; machine learning; transfer learning.

Мемристоры являются ключевыми элементами нейроморфных вычислительных систем благодаря их способности хранить состояние и моделировать синаптическую пластичность [1]. Характеристики мемристоров зависят как от частоты переключения и режима работы, так и от внешних факторов. В результате возникает

необходимость в решении задачи сдвига домена, когда меняется чистота сигнала или режим работы устройства.

Целью данной работы является разработка и оценка моделей временных рядов для устойчивого прогнозирования поведения мемристоров при изменении частоты переключения. В рамках данного исследования рассматриваются такие модели, как TimeMixer [2], DLinear [3], и PatchTST [4], охватывающие основные классы архитектур долгосрочного предсказания временных рядов. Первичная валидация моделей производится на открытых бенчмарках для прогнозирования временных рядов.

Основная часть экспериментов проведена на данных реального исследования от ННГУ для ячейки памяти WU6. Эксперимент включал запись вольт-амперных характеристик с приложением последовательности импульсов треугольной формы с частотами 25, 50 и 100 кГц.

В работе рассматриваются следующие методики проведения переноса: zero-shot перенос, протокол TL-1 (warm-start с последующим дообучением всей модели) и протокол TL-2 (head-only finetune), при котором основная часть модели замораживается, а обучение проводится только для выходной головы. Последний подход направлен на снижение вероятности переобучения при ограниченном объеме данных.

Полученные результаты показывают, что модели с явной декомпозицией временного ряда обладают наилучшей устойчивостью к сдвигу домена и обеспечивают высокое качество прогнозирования временных рядов мемристоров. Для модели DLinear на проприетарном датасете ННГУ достигнуты значения MSE = (0,0036 ± 0,0002) и MAE = (0,0345 ± 0,0015), что более чем на 20 % лучше по метрике MAE по сравнению как с базовыми, так и SOTA архитектурами, рассмотренными в данной работе. При этом модель демонстрирует устойчивость к увеличению горизонта прогноза (деградация менее 4 % при добавлении одного цикла переключения) и сохраняет работоспособность в условиях межчастотного zero-shot переноса (25 → 100 кГц) с умеренной деградацией качества (менее 20 процентов по метрике MSE), что подтверждает эффективность простых интерпретируемых подходов для задач прогнозирования деградации мемристоров.

Литература

1. Гриценко В. А., Гисматулин А. А., Орлов О. М. Запоминающие свойства мемристоров на основе оксида и нитрида кремния // Российские нанотехнологии, 2021. — Т. 16. — № 6. — С. 751–760.
2. Wang S. et al. Timemixer: Decomposable multiscale mixing for time series forecasting // arXiv preprint arXiv:2405.14616, 2024.
3. Zeng A. et al. Are transformers effective for time series forecasting? // Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence, 2023. Vol. 37. № 9. P. 11121–11128.
4. Nie Y. et al. A time series is worth 64 words: Long-term forecasting with transformers // arXiv preprint arXiv:2211.14730, 2022.

УДК 004.383.4

Вероятностные вычисления на магнитных туннельных переходах

Киселева К. В.[1,2], аспирант, Юрлов В. В.[2,3], аспирант,
Скирдков П. Н.[2], к. ф.-м. н., Кичин Г. А.[2,4], к. ф.-м. н.,
Антонов В. Н.[1], к. ф.-м. н., Звездин К. А.[2], д. ф.-м. н.
[1] Сколковский институт науки и технологий
121205, г. Москва, Россия
Kseniia.Kiseleva@skoltech.ru, V.Antonov@skoltech.ru
[2] ООО «Новые Спинтронные Технологии»
121205, г. Москва, Россия
petr.skirdkov@gmail.com, g.kichin@rqc.ru, zvezdin.ka@phystech.edu
[3] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
ghtndctvzp1@gmail.com
[4] ООО «Международный центр квантовых технологий»
121205, г. Москва, Россия

Проведено исследование решения задачи коммивояжера с помощью эмулятора стохастических магнитных туннельных переходов. Предложен модифицированный алгоритм имитации отжига, в котором генерация новых состояний ограничена допустимыми перестановками городов, что исключает нефизичные конфигурации и сокращает пространство поиска. Рассмотрено влияние гиперпараметров на качество решения.
Ключевые слова: нейроморфные вычисления; магнитный туннельный переход; p-биты; задача коммивояжера; метод Изинга; имитация отжига.

Probabilistic computing based on magnetic tunnel junctions

Kiseleva K. V.[1,2], Yurlov V. V.[2,3], Skirdkov P. N.[2], Ph.D, Kichin G. A.[2,4], Ph.D,
Antonov V. N.[1], Ph.D, Zvezdin K. A.[2], Sc.D
[1]Skolkovo Institute of Science and Technology
Moscow, 121205, Russia
Kseniia.Kiseleva@skoltech.ru, V.Antonov@skoltech.ru
[2] «New Spintronic Technology», LLC
Moscow, 121205, Russia
petr.skirdkov@gmail.com, g.kichin@rqc.ru, zvezdin.ka@phystech.edu
[3] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
ghtndctvzp1@gmail.com
[4]«International center of quantum technology» LLC
Moscow, 121205, Russia

This study was conducted on solving the Traveling Salesperson Problem using an emulator of stochastic magnetic tunnel junctions. A modified simulated annealing algorithm

is proposed in which the generation of new states is restricted to valid city permutations, thereby eliminating unphysical configurations and reducing the search space. The influence of hyperparameters on solution quality is examined.
Keywords: Neuromorphic computation; Magnetic Tunnel Junction; p-bits; Travelling Salesman Problem; Ising method; Simulated Annealing.

Задача коммивояжера является NP-трудной комбинаторной оптимизационной задачей, востребованной в логистике, планировании маршрутов и проектировании. Для ее решения используется имитация отжига, эффективность которой существенно зависит от качества генераторов случайных чисел. Стохастические магнитные туннельные переходы (МТП) служат источником истинной физической случайности и обладают низким энергопотреблением [1–4]. Классический SA-подход на основе модели Изинга порождает множество недопустимых конфигураций с повторением или пропуском городов; в настоящей работе предложен метод, ограничивающий поиск только допустимыми перестановками [5].

Методы

Задача формулируется на N×N матрице бинарных переменных x_i^k с двумя ограничениями: каждый город посещается ровно один раз, а каждой позиции маршрута соответствует ровно один город. Гамильтониан включает член, отвечающий за длину маршрута, и штрафные члены с коэффициентами A, B и C. В изученном алгоритме новое состояние строится поэтапно: для каждой позиции маршрута выбирается неиспользованный город с наибольшей вероятностью активации, что гарантирует допустимость конфигурации. Переходы принимаются по критерию Метрополиса при постепенно понижающейся температуре.

Процедура SA начинается с инициализации конфигурации σ и вычисления обменной матрицы J_{ikjl}, отражающего расстояния между городами и штрафные члены. На каждой итерации матрицы σ обновляется согласно приложенному току, вычисляется Гамильтониан системы. Новая конфигурация σ' принимается, если разность энергий нового и предыдущего решения отрицательна; в противном случае переход совершается согласно Метрополису. Температура уменьшается по медленному экспоненциальному закону [6]. Перед обновлением состояний применяется алгоритм допустимой генерации, исключающий повторы и пропуски городов.

Результаты и обсуждение

Сравнение классического и предложенного методов показало, что классический подход дает маршруты с повторениями и пропусками городов, тогда как предложенный алгоритм обеспечивает полное покрытие всех городов. Качество решения зависит от коэффициентов B и C и подбирается в зависимости от числа городов и максимального расстояния между ними.

Исследована зависимость качества решения от начальной температуры, числа итераций и скорости охлаждения. При увеличении числа городов требуется более точная настройка коэффициентов штрафа для сохранения допустимости маршрутов. Полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале стохастических МТП в качестве аппаратной платформы для решения NP-трудных задач оптимизации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-12-00302.

Литература

1. Camsari K. Y. et al. P-bits for probabilistic spin logic // Applied Physics Reviews, 2019. Vol. 6. № 1.
2. Si J. et al. Energy-efficient superparamagnetic Ising machine and its application to TSP // Nature Communications, 2024. Vol. 15. № 1.
3. Zink B. R. et al. Review of Magnetic Tunnel Junctions for Stochastic Computing // IEEE J. Explor. Solid-State Comput. Devices Circuits, 2022. Vol. 8. № 2. P. 173–184.
4. Chen W. et al. E-Spin: A Stochastic Ising Spin Based on Electrically-Controlled MTJ // Micromachines, 2023. Vol. 14. P. 258.
5. Van Laarhoven P. J. M. et al. Simulated annealing. Springer Netherlands, 1987.
6. Krapivsky P. L. Slow cooling of an Ising ferromagnet // J. Stat. Mech, 2010. № 2. P. P02014.

УДК 004.032.26, 621.315.592, 621.9.048.7

Исследование устойчивости мемристивных структур для нейроморфных вычислений к воздействию протонного и нейтронного излучения с использованием ионов средних энергий

к. ф.-м. н. Окулич Е. В., д. ф.-м. н. Тетельбаум Д. И., к. ф.-м. н. Белов А. И., к. ф.-м. н. Гусейнов Д. В., к. ф.-м. н. Михайлов А. Н.
ННГУ им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Н. Новгород, пр-т Гагарина, 23
eokulich@nifti.unn.ru

Предложен и апробирован метод имитации радиационного воздействия (космических протонов с энергией ~10 МэВ и реакторных нейтронов ~1 МэВ) с помощью имплантации ионов средних энергий. Метод применен для оценки радиационной стойкости мемристивных структур на основе SiO_2, ZrO_2 и HfO_2. Показана его эффективность для скрининга элементной базы нейроморфных систем, работающих в условиях повышенного радиационного фона.
Ключевые слова: мемристор; нейроморфные вычисления; RRAM; ионная имплантация; радиационная стойкость; протонное облучение; нейтронное облучение; оксидные структуры.

Study of the stability of memristive structures for neuromorphic computing to the effects of proton and neutron radiation using medium-energy ions

Ph.D Okulich E. V., Sc.D Tetelbaum D. I., Ph.D Belov A. I., Ph.D Guseinov D. V., Ph.D Mikhailov A. N.
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603022, Russia

A method for simulating radiation exposure (cosmic protons with energies of ~10 MeV and reactor neutrons with energies of ~1 MeV) using medium-energy ion implantation is proposed and tested. The method is applied to assess the radiation endurance of memristive structures based on SiO_2, ZrO_2, and HfO_2. Its effectiveness for screening the components of neuromorphic systems operating under elevated background radiation conditions is demonstrated.
Keywords: memristor; neuromorphic computing; RRAM; ion implantation; radiation endurance; proton irradiation; neutron irradiation; oxide structures.

Введение

Мемристоры и резистивная память (RRAM) рассматриваются как перспективная элементная база для нейроморфных вычислительных систем, сочетающих компактность, энергоэффективность и совместимость с КМОП-технологией. Нейроморфные системы на мемристорах способны имитировать принципы работы мозга, что открывает возможности для био- и нейрогибридных интерфейсов [1–4]. В связи с этим актуально применение таких устройств в условиях радиационного

воздействия — космического (протоны с энергией ~10 МэВ) и реакторного (нейтроны ~1 МэВ). Однако натурные испытания на стойкость к этим видам излучения сложны и малодоступны. Альтернативой служит имитация радиационных эффектов с помощью ионной имплантации.

Виды радиационного воздействия

Различают два основных механизма:

- **Ионизирующее** (преобладает при протонном и гамма-облучении) — в ряде случаев обратимо.
- **Дефектообразующее** (displacement damage, доминирует при облучении быстрыми нейтронами) — приводит к необратимой деградации параметров.
- Наибольший практический интерес представляет стойкость именно к дефектообразующему облучению.

Методика имитации

В работе предложен алгоритм подбора энергии и дозы ионов средних энергий (с массами, близкими к атомам мишени) для создания дефектности, эквивалентной воздействию протонов 10 МэВ и нейтронов 1 МэВ. Имитация нейтронного облучения выполняется ионами, входящими в состав оксидного слоя, что исключает нежелательное легирование и повышает адекватность эксперимента.

Экспериментальные образцы

Исследовались мемристорные структуры, изготовленные магнетронным распылением:

- Au/Zr/оксид/TiN/Ti,
- Au/варьируемый подслой Zr/оксид/TiN/Ti,

где в качестве оксида использовались SiO_2, ZrO_2, HfO_2.

- и Au/Ta/ZrO_2(Y)/Pt/Ti.

Результаты

На основе разработанной методики проведены экспериментальные оценки радиационной стойкости. Выделены структуры, наиболее устойчивые к дефектообразующему облучению, и определены степени деградации их электрофизических параметров. Показано, что предложенный подход позволяет проводить массовый скрининг мемристоров для нейроморфных систем, предназначенных для работы в космосе и вблизи ядерных реакторов.

Заключение

Метод имитации радиационного воздействия ионами средних энергий является эффективной и доступной альтернативой натурным испытаниям. Он может быть рекомендован для оценки радиационной стойкости перспективных мемристорных структур — ключевых элементов нейроморфных вычислителей, работающих в условиях повышенного радиационного фона.

Исследование выполнено в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» ННГУ и государственного задания № FSWR-2025-0006.

Литература

1. Chiolerio A., Chiappalone M., Ariano P., Bocchini S. // Front. Neurosci., 2017. Vol. 11. Art. № 70. https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00070.

2. Roy K., Jaiswal A., Panda P. // Nature, 2019. Vol. 575. P. 607–617. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1677-2.
3. George R., Chiappalone M., Giugliano M. et al. // iScience, 2020. Vol. 23. № 10. Art. № 101589. https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101589.
4. Serb A., Corna A., George R. et al. // Sci. Rep., 2020. Vol. 10. Art. № 2590. https://doi.org/10.1038/s41598-020-58831-9.

УДК 537.312.7

Формирование дефектов в пленках оксида гафния для мемристорных кроссбар-массивов высокой плотности

Исаев А. Г., Мяконьких А. В., Рогожин А. Е.
ОФТИ имени К. А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт»
117218, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36, корп. 1

При помощи АСМ с измерением проводимости исследовался процесс резистивного переключения в структурах на основе оксида гафния сформированных методом ALD. Показано, что исследованные методы инжиниринга дефектов позволяют сформировать большее число филаментов при меньших напряжениях.
Ключевые слова: Мемристор; резистивное переключение; атомно-слоевое осаждение; атомно-силовая микроскопия

Defect engineering in hafnium oxide films for high density memristor crossbar arrays

Isaev A. G., Miakonkikh A. V., Rogozhin A. E.
NRC "Kurchatov Institute" – Valiev IPT
36/1 Nakhimovsky Ave., Moscow, 117218, Russia

The resistive switching process in hafnium oxide structures formed by the ALD method was studied using the conductive AFM. Suggested methods of defect engineering allow forming higher number of filaments at lower voltages.
Keywords: Memristor; resistive switching; atomic layer deposition; atomic force microscopy

Мемристоры на основе оксида гафния представляют большой интерес, так как они могут служить аппаратной основой для резистивной памяти с произвольным доступом (ReRAM) и систем нейроморфных вычислений [1]. Одной из главных проблем оксидных мемристоров является низкая воспроизводимость резистивных состояний от ячейки к ячейке. Для повышения воспроизводимости состояний можно формировать более однородные пленки методом атомно-слоевого осаждения (ALD), однако в таких пленках необходимо дополнительно создавать дефекты, на которых будут формироваться проводящие филаменты [2, 3].

В данной работе оксид гафния толщиной 6 нм формировался при помощи атомно-слоевого осаждения подложке 100 нм TiN / Si. Для создания дополнительных дефектов в оксиде использовались 3 подхода. Первый предполагал кристаллизацию аморфной пленки оксида гафния при помощи отжига при 500 °C в течение 30 мин в атмосфере аргона для создания дефектов на границах кристаллических зерен. Второй подход заключался в легировании азотом пленки 6 нм $N:HfO_x$ в процессе ее осаждения аналогично работе [4]. Третий подход заключался в формировании слоя 0,5 нм Al_2O_3 на пленке 5,5 нм $N:HfO_x$ для создания дефектов на границе двух оксидов аналогично работе [5]. Для исследования процесса формирования проводящих филаментов в оксиде применялся метод атомно-силовой микроскопии с измерением проводимости (ПАСМ) [6]. Получение и обработка ПАСМ

изображений, а также оценка количества филаментов проводились аналогично работе [4].

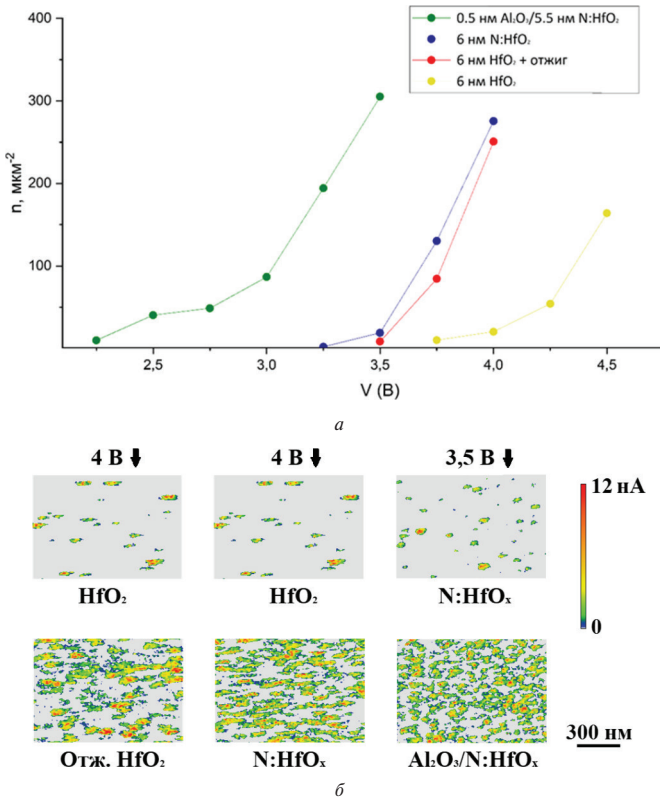


Рис. 1. Проводящие филаменты в различных структурах: а) число филаментов на 1 мкм^2, сформированных методом ПАСМ при различных напряжениях электоформовки в пленках 6 нм HfO_2 до и после отжига при 500 °С и легированных азотом пленок 6 нм $N:HfO_x$ и 0,5 нм Al_2O_3/ 5,5 нм $N:HfO_x$ б) ПАСМ изображения филаментов, полученные для различных структур при некоторых напряжениях

На рис. 1 представлена зависимость числа филаментов на 1 мкм^2, сформированных зондом ПАСМ, от напряжения электроформовки. В отожженных и легированных структурах удалось получить большее число филаментов при меньших напряжениях, при этом в легированных структурах наблюдалось чуть большее число филаментов при равных напряжениях. Добавление 0,5 нм слоя Al_2O_3 в легированной структуре позволяло формировать филаменты при еще более низких напряжениях.

Работа выполнена в рамках госзадания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. Pan F., Gao S., Chen C. et al. Recent progress in resistive random access memories: Materials, switching mechanisms, and performance // Mater. Sci. Eng. R Rep., 2014. Vol. 83. P. 1–59.
2. Lanza M., Wong H.-S.P., Pop E. et al. Recommended Methods to Study Resistive Switching Devices // Adv. Electron. Mater., 2019. Vol. 5. № 1. P. 1800143.
3. Banerjee W., Liu Q., Hwang H. Engineering of defects in resistive random access memory devices // J. Appl. Phys., 2020. Vol. 127. № 5. P. 051101.
4. Isaev A., Permyakova O., Kalimova I. et al. N-doped HfOx-based memristors for high-density neuromorphic systems: Crystallization and conductive filament growth // Mater. Sci. Eng. B., 2026. Vol. 323. P. 118683.
5. Isaev A. G., Permyakova O. O., Rogozhin A. E. Mechanisms of conductive filament formation in hafnium oxide multilayer structures // Thin Solid Films, 2023. Vol. 781. P. 139993.
6. Electrical Atomic Force Microscopy for Nanoelectronics / ed. Celano U. // Cham: Springer International Publishing, 2019.

УДК 004.032.26; 621.382

Электрофизические характеристики мемристорных ячеек памяти на основе ZrO2(Y) в кроссбар-матрицах с цифровой адресацией, сформированных на базе технологии КМОП КНИ 0,35 мкм

Жарков Г. Д.[1], Белов А. И.[1], к. ф.-м. н., Королев Л. Я.[1], Тютина Е. Р.[1], Гусев Н. С.[2], Пашенькин И. Ю.[2], Лукоянов В. И.[1], Грязнов Е. Г.[1], Сафонов А. В.[1], Антонов И. Н.[1], Щаников С. А.[1], Михайлов А. Н.[1]

[1] ННГУ им. Н. И. Лобачевского,
Научно-образовательный центр «Физика твердотельных наноструктур»
603022, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, 23
grigoriyzharkov@gmail.com, belov@nifti.unn.ru, madimtor@ya.ru, e.tyutina@unn.ru, vitalylukoyanov@yandex.ru, Gryaznov_EG@mail.ru,safalex@mail.ru, ivant@nifti.unn.ru, schanikov@unn.ru, mian@nifti.unn.ru
[2] Институт физики микроструктур РАН
603087, г. Нижний Новгород, д. Афонино, ул. Академическая, 7
usevns@ipmras.ru, pashenkin@ipm.sci-nnov.ru

Исследованы кроссбар-матрицы с цифровой адресацией мемристорных ячеек памяти конструкции 5T1M на основе $ZrO_2(Y)$, созданные в двух лабораториях. Разработан и применен алгоритм приведения ячеек памяти к режиму стабильных переключений. Проведено сравнение электрофизических параметров ячеек памяти, сформированных в разных лабораториях.

Ключевые слова: мемристор; резистивная память; RRAM; кроссбар; нейроэлектроника; КМОП-интеграция мемристоров; стабилизированный диоксид циркония.

Electrophysical characteristics of memristive memory cells based on $ZrO_2(Y)$ in crossbar arrays with digital addressing, fabricated with CMOS SOI 0,35 μm technology

Zharkov G. D.[1], Belov A. I.[1], Korolev L. Ya.[1], Tyutina E. R.[1], Gusev N. S.[2], Pashenkin I. Yu.[2], Lukoyanov V. I.[1], Gryaznov E. G.[1], Safonov A. V.[1], Antonov I. N.[1], Shchanikov S. A.[1], Mikhaylov A. N.[1]

[1] Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Scientific and Educational Center "Physics of Solid-State Nanostructures"
23 Gagarina Ave., Nizhny Novgorod, 603022, Russia
grigoriyzharkov@gmail.com, belov@nifti.unn.ru, madimtor@ya.ru, e.tyutina@unn.ru, vitalylukoyanov@yandex.ru, Gryaznov_EG@mail.ru,safalex@mail.ru, ivant@nifti.unn.ru, schanikov@unn.ru, mian@nifti.unn.ru
[2] The Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences
7 Academicheskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia
usevns@ipmras.ru, pashenkin@ipm.sci-nnov.ru

Crossbar arrays with digital addressing of 5T1R memristive memory cells based on $ZrO_2(Y)$, fabricated in two laboratories, are investigated. An algorithm which performs initial switch and stabilizes subsequent switching of the memory cells has been developed and applied. The electrophysical characteristics of the memory cells fabricated in two laboratories are compared.

Keywords: memristor; resistive memory; RRAM; crossbar array; neuroelectronics; CMOS integration of memristors; yttria-stabilized zirconia.

Устройства на основе мемристоров являются перспективной элементной базой для создания энергоэффективных запоминающих и вычислительных систем нового поколения. На их основе возможно создание энергонезависимой памяти, а также аппаратная реализация вычислений в памяти (нейроморфных вычислений). Особый интерес представляют мемристорные кроссбар-матрицы, архитектура которых обеспечивает высокую плотность записи и позволяет реализовать аппаратно векторно-матричное умножение [1, 2].

Практическая реализация кроссбар-матриц сопряжена с рядом фундаментальных и технологических проблем, включающих нестабильность параметров мемристоров, наличие паразитных токов утечки в больших матрицах, а также подбор совместимых с технологическими материалами процессов [3].

В настоящей работе проведено исследование мемристорных кроссбар-матриц размером 64×64 на основе $ZrO_2(Y)$ на тестовом кристалле топологии RRAM4K [4]. Конструкция ячейки в матрице носит название 5T1M (5 транзисторов, 1 мемристор): ячейка содержит пять транзисторов (два *p*-канальных и три *n*-канальных), блокирующих паразитные токи через невыбранные ячейки. К матрице подключены два дешифратора, реализующие цифровую адресацию: координаты ячейки памяти задаются двумя 6-битными цифровыми шинами.

Транзисторы выполнены по технологии «кремний на изоляторе» с проектными нормами 350 нм (КМОП КНИ 0,35 мкм НИИИС им. Ю. Е. Седакова) [2]. Мемристоры выполнены в верхних слоях металлизации методом магнетронного распыления и имеют структуру Au(20 нм)/Ta(40 нм)/$ZrO_2(Y)$(20 нм)/Pt(20 нм)/Ti(10 нм).

В работе разработан и применен алгоритм приведения мемристорных ячеек памяти к рабочему состоянию. Алгоритм обеспечивает формовку и «антиформовку» ячеек, что приводит к значительному снижению их напряжений переключения. Алгоритм реализован на специальной оснастке, разработанной для управления микросхемами топологии RRAM4K, под управлением программного обеспечения MemriBoard [5], разработанного для исследования мемристорных кроссбар-матриц.

В работе проведено исследование электрофизических параметров ячеек памяти, сформированных в двух лабораториях: лаборатории мемристорной наноэлектроники ННГУ и отделе магнитных наноструктур ИФМ РАН. Для структур, сформированных в ИФМ РАН, наблюдается существенное повышение однородности электрофизических параметров по кристаллу, что связывается с использованием более совершенных методов литографии и травления, а также со снижением скорости напыления резистивного слоя.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах». Мемристивные структуры изготовлены в лаборатории мемристорной наноэлектроники ННГУ (государственное задание № FSWR-2025-0006) с использованием инфраструктуры Учебного дизайн-центра электроники ННГУ и в отделе магнитных наноструктур ИФМ РАН с использованием инфраструктуры ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур».

Литература

1. Programming memristor arrays with arbitrarily high precision for analog computing / Song Wenhao, Rao Mingyi, Li Yunning, Li Can, Zhuo Ye, Cai Fuxi, Wu Mingche, Yin Wenbo, Li Zongze, Wei Qiang, Lee Sangsoo, Zhu Hengfang, Gong Lei, Barnell Mark, Wu Qing, Beerel Peter A., Chen Mike Shuo-Wei, Ge Ning, Hu Miao, Xia Qiangfei, and Yang J. Joshua // Science, 2024. Vol. 383. № 6685. P. 903–910.
2. Михайлов А. Н., Белов А. И., Королев Д. С., Гусейнов Д. В., Грязнов Е. Г., Коряжкина М. Н., Лукоянов В. И., Слиняков Ю. Г., Шарапов А. Н., Филатов Д. О., Горшков О. Н., Андреева Н. В., Смирнов В. А., Федотов А. А., Щаников С. А. и Казанцев В. Б. Мемристивные наноматериалы и технологии новой элементной базы нейроэлектроники // Нейротехнологии и Нейроэлектроника, 2024. — Т. 1. — № 1. — С. 44–109.
3. Lanza Mario, Pazos Sebastian, Aguirre Fernando, Sebastian Abu, Le Gallo Manuel, Alam Syed M., Ikegawa Sumio, Yang J. Joshua, Vianello Elisa, Chang Meng-Fan, Molas Gabriel, Naveh Ishai, Ielmini Daniele, Liu Ming, and Roldan Juan B. The growing memristor industry // Nature, 2025. Vol. 640. № 8059. P. 613–622.
4. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2025630357. Топология тестовой микросхемы энергонезависимой резистивной памяти RRAM / Е. Г. Грязнов, В. И. Лукоянов, А. В. Сафонов, И. Н. Антонов, Д. И. Большаков, А. Н. Михайлов. — № 2025630350; заявлено 21.10.2025; опубл. 06.11.2025. –1 с.
5. Борданов И. А., Королев Л. Я., Плотникова Е. Е., Жарков Г. Д., Щаников С. А. MemriBoard [Электронный ресурс]: репозиторий на GitHub. — URL: https://github.com/neurocomputer/MemriBoard/tree/dev (дата обращения: 01.07.2026).

УДК 621.382, 538.975

Мемристивные нейроны и синапсы на основе структуры $Ag/H_{0,5}Zr_{0,5}O_2$

Жидков Н. С., Зенкевич А. В., Ханас А. Р.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследуются нейронные и синаптические мемристивные устройства, работающие на основе механизма миграции атомов активного электрода Ag в диэлектрик $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$, полученные с использованием различных режимов термической обработки.
Ключевые слова: мемристоры; нейроны; синапсы; нейроморфные вычисления; оксид гафния-циркония; миграция ионов металлов.

Memristive neurons and synapses based on the $Ag/H_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ structure

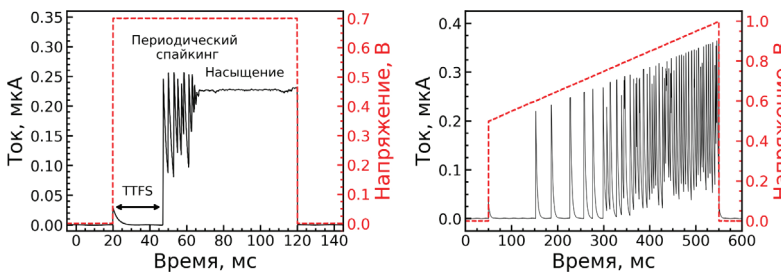
Zhidkov N. S., Zenkevich A. V. Ph.D, Khanas A. R. Ph.D
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

This paper examines neuronal and synaptic memristive devices based on the migration of Ag active electrode atoms into the $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ dielectric, obtained using various thermal treatment regimes.
Keywords: memristors; neurons; synapses; neuromorphic computing; hafnium zirconium oxide; metal ion migration.

Нейроморфная вычислительная архитектура является многообещающим кандидатом для замены архитектуры фон Неймана в области исполнения нейросетевых алгоритмов. Основа данной архитектуры лежит в воспроизведении принципов работы нейронов и синапсов головного мозга, а также их взаимодействия. С точки зрения энергопотребления наибольшая эффективность нейроморфной архитектуры достигается при использовании новой элементной базы –в частности, мемристоров. Одно из основных преимуществ мемристоров по сравнению со стандартной кремниево-транзисторной технологией производства чипов является масштабируемость. Филаментарный механизм переключений мемристоров делает потенциально возможным создание устройств с горизонтальными размерами не превышающими десятки нанометров, что значительно меньше размеров каскада транзисторов необходимых для имитации работы нейронов и синапсов.

В данной работе демонстрируется возможность создания синапсов и нейронов на устройствах с одинаковой структурой при помощи различных режимов термической обработки. Переключения происходят за счет формирования филаментов из ионов активного электрода из Ag в мемристоре со структурой $Pt/Ag/Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2(HZO)/TiN$. Во всех электрических измерениях напряжение подавалось на верхний электрод, а нижний был заземлен. Для реализации нейрона,

представляющего собой генератор импульсов тока или напряжения (спайков), требуется энергозависимый пороговый переключатель. Его создание возможно благодаря формированию “тонких” (1–2 нм в диаметре) филаментов через диэлектрический слой, что происходит при наличии областей с повышенным содержанием дефектов в виде границ зерен или тройных стыков, вдоль которых и проходит диффузия Ag. Такие дефекты наиболее типичны для поликристаллических пленок, поэтому после сразу после нанесения пленки HZO методом атомно-слоевого осаждения проводится первый быстрый термический отжиг при 550 °C в течении 30 секунд. После осаждения верхнего электрода проводится второй отжиг при 350 °C в течении 60 секунд для частичной диффузии Ag внутрь HZO, что уменьшает пороговые напряжения. Далее, для установления нагрузки, необходимой для стабилизации режима релаксационных колебаний, последовательно подключался резистор сопротивлением 2,7 МОм. На рис. 1*а* изображен типичный токовый отклик схемы на прямоугольный импульс напряжения, где можно выделить три основные области: время до первого спайка (time to first spike, TTFS), периодический спайкинг с определенной частотой и насыщение. При этом при подаче импульса с линейно увеличивающейся во времени величиной напряжения происходит постепенное изменение частоты следования спайков (рис. 1*б*).

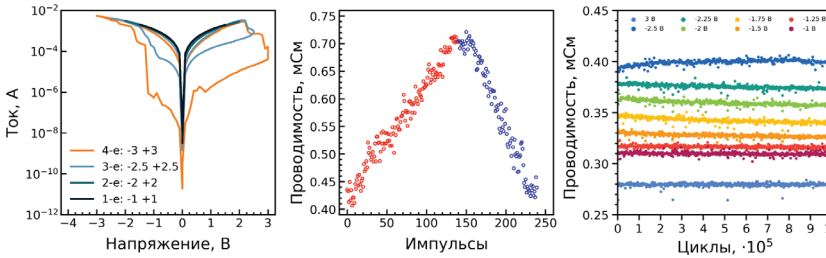


а *б*

Рис. 1. *а*) типичный токовый отклик на прямоугольный импульс напряжения, длительностью 100 мс; *б*) режим частотной кодировки, полученный при подаче изменяющего по амплитуде во времени импульса напряжения

Для реализации синапса, представляющего собой ячейку памяти, требуется создание структуры, способной плавно изменять состояние своего сопротивления. Для этого после изготовления верхних электродов проводится отжиг при 550 °C в течении 30 секунд. При такой температуре одновременно происходит два процесса: кристаллизация пленки с образованием зерен и границ между ними, а также диффузия серебра через образовавшиеся границы зерен. Измерение вольтамперных характеристик (ВАХ) полученной структуры показало (рис. 2*а*), что устройство изначально находится в состоянии с низким сопротивлением и для выключения требуется подавать положительное напряжение более 2 В. Далее проводились измерения долговременной потенциации и депрессии при помощи постепенно изменяющихся по амплитуде импульсов напряжения (рис. 2*б*). Видно, что используемый режим подачи напряжения приводит к линейному изменением проводимости. В тоже время устройства демонстрируют хорошую повторяемость

при циклических измерениях на выносливость. Каждое состояние, продемонстрированное на рис. 2*в*, выдержало 1 миллион переключений без пересечений с другими состояниями.



а *б* *в*

Рис. 2. *а*) постепенное выключение устройства при первых нескольких циклах ВАХ; *б*) линейное изменение проводимости при долговременной потенциации и депрессии, *в*) выносливость устройств при циклических измерениях

Продемонстрированные результаты открывают возможность к созданию компактных однослойных нейроморфных интегральных чипов, так как нейроны и синапсы в данной работе обладают одной и той же структурой, что делает возможным их изготовление на одном слое одного устройства. Дальнейшие исследования будут проводится с целью оптимизации используемых процессов и материалов для интеграции со стандартными линиями производств кремниевых интегральных микросхем.

УДК 621.38

От интеркаляции ионов лития к миграции вакансий кислорода в пленках $LiNbO_y$ ($1,5 < y < 3$) в составе нанокомпозитных мемристоров для реализации надежных нейроморфных синапсов в матричном исполнении

Ильясов А. И.[1,2], Емельянов А. В.[1,3], Форш П. А.[2], Рыльков В. В.[1], Демин В. А.[1]
[1] НИЦ «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
[2] МГУ имени М. В. Ломоносова, физический факультет
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
[3] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследованы мемристоры на базе нанокомпозитов $(Co\text{-}Fe\text{-}B)_x(LiNbO_3)_{100-x}$ и $(Co\text{-}Fe\text{-}B)_x(SiO_2)_{100-x}$ с прослойкой $LiNbO_y$ в одиночном и матричном исполнении. Продемонстрированы простые аппаратные и программные нейроморфные вычислительные сети на их основе. Развиты методы исследования характеристик мемристоров пассивных кроссбар-матриц.
Ключевые слова: мемристор; резистивное переключение; нанокомпозит; ниобат лития; ниобит лития; пассивный кроссбар-массив; токи шунтирования.

From Li ion intercalation to migration of oxygen vacancies in $LiNbO_y$ ($1,5 < y < 3$) layers in nanocomposite memristors for crossbar arrays of high-reliable neuromorphic synapses implementation

Iliasov A. I.[1,2], Emelyanov A. V.[1,3], Ph.D, Forsh P. A.[2], Sc.D, Rylkov V. V.[1], Sc.D, Demin V. A.[1], Sc.D
[1] National Research Center "Kurchatov Institute"
123182 Moscow, Russia
[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
[3] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

Memristors based on $(Co\text{-}Fe\text{-}B)_x(LiNbO_3)_{100-x}$ and $(Co\text{-}Fe\text{-}B)_x(SiO_2)_{100-x}$ nanocomposites incorporating a $LiNbO_y$ interlayer were investigated both as individual devices and in crossbar array configurations. Simple hardware and software neuromorphic computing networks based on these devices were demonstrated. Methods for studying the characteristics of memristors in passive crossbar arrays were developed.
Keywords: memristor; resistive switching; nanocomposite; lithium niobite; lithium niobite; passive crossbar array; sneak path currents.

Разработка универсальной резистивной памяти на базе мемристоров металл-изолятор-металл остается одним из ключевых направлений создания нейроморфных вычислительных систем (НВС) благодаря энергоэффективности и многоуровневому характеру хранения информации [1]. Однако широкое внедрение мемристоров сдерживается разбросом их характеристик, необходимостью формовки и трудностями интеграции с КМОП-технологией . В настоящей работе были исследованы нанокомпозитные (НК) мемристоры на основе гетероструктур M/НК/$LiNbO_y$/M_b, включающих НК слой $(Co\text{-}Fe\text{-}B)_x(LiNbO_3)_{100-x}$ или $(Co\text{-}Fe\text{-}B)_x(SiO_2)_{100-x}$ и тонкую диэлектрическую прослойку $LiNbO_y$, полученные методом ионно-лучевого распыления без принудительного нагрева подложки.

В ходе структурных исследований было установлено, что стехиометрия аморфного слоя $LiNbO_y$ в существенной степени зависит от материала нижнего электрода M_b. Экспериментально показано, что отношение атомарных концентраций кислорода и ниобия (y) варьируется в диапазоне от 1,5 до 3: $y \approx 1{,}5–2$ для Cu, $y \approx 2$ для Au, и $y \approx 3$ для Cr. Были созданы пассивные кроссбар-матрицы размером 16×16 мемристоров со структурой M/НК/$LiNbO_y$/Au ($y \approx 2$) и нанокомпозитом $(Co\text{-}Fe\text{-}B)_x(LiNbO_3)_{100-x}$. Устройства продемонстрировали стабильные резистивные переключения (РП) вакансионного типа, высокую устойчивость (более 10^5 циклов) и пластичность (не менее 16 промежуточных резистивных состояний). Иное поведение обнаружено у структур M/НК/$LiNbO_y$/Cu со слоем НК $(Co\text{-}Fe\text{-}B)_x(SiO_2)_{100-x}$ ($y \approx 1{,}5–2$). На основе структурных и электрофизических характеристик был описан предполагаемый механизм РП в них, связанный с интеркаляцией лития в слое $LiNbO_y$ и его последующим захватом на атомах Si в самоорганизованной прослойке $SiO_{1,1}$, формирующейся на интерфейсе между НК и диэлектриком.

Для корректного изучения характеристик мемристоров пассивных кроссбар-матриц, были развиты методы измерения их характеристик, позволяющие нивелировать влияние паразитных токов шунтирования [2]. Были сформулированы условия применения различных измерительных схем: схема «с заземлением шин V» рекомендована для чтения состояний и снятия вольт-амперных характеристик, «с заземлением шин $V/2$» для записи состояний, а схема «с подвешенными шинами» оптимальна для проведения тестов на выносливость.

Практическая значимость разработанных структур подтверждена аппаратной реализацией элементов НВС на их основе. На базе кроссбар-матрицы мемристоров была построена полносвязная нейронная сеть 4-в-2, способная распознавать простые бинарные образы, в том числе при 25-процентном уровне зашумления входных сигналов; было показано, что часть такой матрицы может быть использована в качестве настраиваемого сверточного фильтра в составе гибридной программно-аппаратной сверточной сети для распознавания графических образов. Наконец, в рамках моделирования работы полносвязной сети для распознавания рукописных цифр (MNIST) с использованием параметров мемристоров на основе $(Co\text{-}Fe\text{-}B)_x(SiO_2)_{100-x}$ и $LiNbO_x$ ($y \approx 1{,}5–2$) была достигнута точность распознавания более 97%, сохраняющаяся как при применении прецизионного алгоритма записи-верификации, так и при использовании метода настройки одинаковыми импульсами. Полученные результаты демонстрируют, что мемристоры на основе неупорядоченного $LiNbO_y$, технологически совместимые с КМОП, являются перспективной платформой для создания энергоэффективных НВС.

Работы выполнена при финансовой поддержке РНФ № 25-19-90201 с использованием оборудования Ресурсных центров (НИЦ «Курчатовский институт»). Ильясов А. И. является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант #23-2-10-17-1).

Литература

1. Aguirre F. et al. Hardware implementation of memristor-based artificial neural networks. Nature Communications 15, 1974 (2024).
2. Shi L., Zheng G., Tian B., Dkhil B., Duan C. Research progress on solutions to the sneak path issue in memristor crossbar arrays // Nanoscale Advances, 2020. 2, 1811–1827.

УДК 621.38

Мемристоры на основе нанокомпозитов парилен-ZnTe и парилен-CdTe для нейроморфных вычислительных систем

Рябова М. А.[1,2], Мацукатова А. Н.[1], Емельянов А. В.[1,2]
[1] НИЦ «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
rmargo01@mail.ru, an.matcukatova@physics.msu.ru, emelyanov.andrey@mail.ru
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Работа посвящена исследованию влияния наночастиц теллуридов на резистивное переключение нанокомпозитных мемристоров на основе парилена и модифицированному механизму электрохимической металлизации. Полученные результаты демонстрируют перспективность дальнейших исследований для внедрения в нейроморфные вычислительные системы.
Ключевые слова: резистивное переключение; нанокомпозиты; нейроморфные вычислительные системы.

Memristors based on parylene-ZnTe and parylene-CdTe nanocomposites for neuromorphic computing systems

Ryabova M. A.[1,2], Matsukatova A. N.[1], Ph.D, Emelyanov A. V.[1,2], Ph.D
[1] NRC «Kurchatov Institute»
1, Akademika Kurchatova Sq., Moscow, 123182, Russia
rmargo01@mail.ru, an.matcukatova@physics.msu.ru, emelyanov.andrey@mail.ru
[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

This study examines the effects of telluride nanoparticles on the resistive switching behavior of parylene-based nanocomposite memristors and explores the modified electrochemical metallization mechanism involved. Our findings indicate that further research is promising for the eventual deployment of these devices in neuromorphic computing systems.
Keywords: resistive switching; nanocomposites; neuromorphic computing systems.

Для практического внедрения в нейроморфные вычислительные системы (НВС) мемристоры должны отвечать жестким требованиям [1]. Среди этих требований критически важна воспроизводимость мемристивных характеристик: от цикла к циклу (C2C), от устройства к устройству (D2D) и от партии к партии (B2B), поскольку даже вариации на уровне 5% могут нарушать сходимость алгоритмов обучения в нейроморфных системах [2]. Вариативность параметров мемристоров обусловлена в основном неупорядоченной структурой материалов и стохастической природой процесса резистивного переключения (РП) [3]. Перспективный подход к решению этой проблемы — инженерия дефектов, то есть контроль неупорядоченности в мемристивной системе на атомарном и наномасштабном уровнях [13]. Известно, что внедрение наночастиц материалов с отрицательным потенциалом

восстановления (MoO_x, PbTe) позволяет повысить воспроизводимость C2C и D2D в мемристорах на основе парилена [33, 34]. Однако потенциал восстановления этих материалов не ниже −0,2 В. В данной работе в матрицу парилена внедрены наночастицы ZnTe и CdTe, которые обладают более низким потенциалом восстановления (до −0,7 В относительно стандартного водородного электрода (vs SHE) и до −0,3 В vs SHE, соответственно). Предполагается, что более отрицательный потенциал восстановления обеспечивает более сильную термодинамическую движущую силу для восстановления катионов металла с положительным потенциалом восстановления (например Cu^+ +0,5 В vs SHE) на поверхности наночастиц, что привело бы к более детерминированному зарождению и стабилизации проводящих филаментов.

В работе были исследованы мемристивные структуры на основе нанокомпозитов парилен-ZnTe и парилен-CdTe с различными концентрациями и условиями отжига для определения оптимальных параметров структур. Были проведены основные электрофизические измерения (C2C, D2D и B2B воспроизводимость, удержание резистивных состояний и выносливость РП). Также были изучены синаптические свойства, включая изменение резистивного состояния по биоподобному правилу пластичности, зависящей от времени прихода импульсов (STDP), и долговременную потенциацию/депрессию (LTP/LTD).

Результаты показали, что внедрение наночастиц теллуридов в парилен стабилизирует РП и уменьшает вариативность параметров по сравнению с чистым париленом и раннее изученными нанокомпозитами на его основе. Для лучших структур достигнуты значения энергопотребления менее 40 пДж на одно переключение и время переключения порядка 30 нс.

Таким образом, работа подтверждает перспективность использования наночастиц с низким потенциалом восстановления, таких как ZnTe и CdTe, для повышения стабильности резистивного переключения в полимерных нанокомпозитных мемристорах. Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований, направленных на использование таких устройств в нейроморфных вычислительных системах с высокими требованиями к воспроизводимости и энергоэффективности.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РНФ № 25-72-00017 в части экспериментальных исследований электрофизических свойств нанокомпозитных мемристоров. Структурные исследования выполнены с использованием оборудования Ресурсных центров при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. M. Lanza, S. Pazos, F. Aguirre, A. Sebastian, M. Le Gallo, Alam S. M., S. Ikegawa, Yang J. J., E. Vianello, M.-F. Chang, G. Molas, I. Naveh, D. Ielmini, M. Liu, J. B. Roldan. The growing memristor industry // Nature, 2025. Vol. 640. P. 613–622.
2. Z. Wang, C. Li, W. Song, M. Rao, D. Belkin, Y. Li, P. Yan, H. Jiang, P. Lin, M. Hu, Strachan J. P., N. Ge, M. Barnell, Q. Wu, Barto A. G., Q. Qiu, Williams R. S., Q. Xia, J. J. Yang. Reinforcement learning with analogue memristor arrays // Nat. Electron., 2019. Vol. 2. P. 115–124.

3. Roldán J. B., E. Miranda, D. Maldonado, Mikhaylov A. N., N. V. Agudov, Dubkov A. A., Koryazhkina M. N., González M. B., Villena M. A., S. Poblador, M. Saludes-Tapia, R. Picos, F. Jiménez-Molinos, Stavrinides S. G., E. Salvador, Alonso F. J., F. Campabadal, B. Spagnolo, M. Lanza, L.O. Chua. Variability in Resistive Memories // Adv. Intell. Syst., 2023. Vol. 5. P. 2200338.
4. W. Banerjee, Q. Liu, H. Hwang. Engineering of defects in resistive random access memory devices // J. Appl. Phys., 2020. Vol. 127. P. 051101.
5. A. Minnekhanov, A. Matsukatova, A. Trofimov, A. Nesmelov, S. Zavyalov, V. Demin, A. Emelyanov. Reliable Memristive Synapses Based on Parylene-MoOx Nanocomposites for Neuromorphic Applications // ACS Appl. Mater. Interfaces, 2023. Vol. 15. P. 54996–55008.

УДК 621.38-022.532

Влияние деформации изгиба на эффект резистивного переключения в мемристивных структурах на основе парилена с инкапсуляционным слоем

Юкляевских Г. А.[1,2], Швецов Б. С.[1,2], Несмелов А. А.[1], Емельянов А. В.[1,2]
[1] НИЦ «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
Nesmelov_AA@nrcki.ru, emelyanov_av@nrcki.ru
[2] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
gyuklyaevskikh@bk.ru, b.shvetsov15@physics.msu.ru

Исследованы мемристоры на основе парилена с инкапсуляционным слоем на гибких подложках. Выявлены основные аспекты влияния механических деформаций на характер и параметры резистивного переключения.
Ключевые слова: Мемристор; Резистивное переключение; Парилен; Гибкая электроника; Органическая электроника.

The influence of bending deformation on the resistive switching effect in parylene-based memristive structures with an encapsulation layer

Yuklyaevskikh G. A.[1,2], Shvetsov B. S.[1,2], Ph.D, Nesmelov A. A.[1], Emelyanov A. V.[1,2], Ph.D
[1] NRC «Kurchatov Institute»
1, Akademika Kurchatova Sq., Moscow, 123182, Russia
Nesmelov_AA@nrcki.ru, emelyanov_av@nrcki.ru
[2] Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
gyuklyaevskikh@bk.ru, b.shvetsov15@physics.msu.ru

Memristors based on parylene with an encapsulation layer on flexible substrates have been investigated. The key aspects of the influence of mechanical deformation on the characteristics and parameters of resistive switching have been identified.
Keywords: Memristor; Resistive switching; Parylene; Flexible electronics; Organic electronics.

С развитием нейроморфных вычислительных систем (НВС) в последнее время растет интерес к созданию вычислительных устройств на гибкой подложке для носимой электроники, способных обеспечить высокую производительность и энергоэффективность при решении задач искусственного интеллекта (например распознавание образов, нейропротезирование, контроль физиологического состояния организма и т. д.). В качестве базового элемента такого устройства активно используется мемристор –элемент электрической цепи, обладающий способностью изменять свое резистивное состояние под воздействием приложенного напряжения и прошедшего тока.

Мемристор в общем виде является многослойной структурой: два электрода, между которыми находится активный слой. В качестве материала активного слоя могут выступать неорганические, композитные, гибридные и органические материалы. Органические материалы вызывают особый интерес благодаря вариабельности и простоте методов изготовления, низкой стоимости производства и широкой доступности, при этом не уступая неорганическим материалам в основных свойствах (окно сопротивлений более 10^5, время энергонезависимого удержания состояния более 10 лет, число резистивных переключений (РП) без деградации структуры более 10^{12} и многоуровневость резистивного переключения). Также, некоторые органические материалы, в частности –парилен (ППК), являются безопасными при контакте с живым организмом, что важно для носимой электроники. Мемристивные структуры на основе ППК обладают сбалансированными характеристиками РП, кроме того, механизм РП основан на электрохимической металлизации, что является схожим по принципу работы с биологическим синапсом [1]. Важно отметить возможность создания мемристоров на основе ППК на гибких подложках с сохранением свойств полимера вплоть до радиуса изгиба в 2 мм [2]. При этом важно сохранение работоспособности таких устройств в условиях повышенной влажности, пыли и т. д. Для этого необходимо создание инкапсуляционного слоя, защищающего структуру от внешних воздействий.

Были проведены исследования по влиянию деформаций на свойства структур Cu/ППК/ITO. Ранее было установлено, что на верхнем электроде таких структур при изгибных испытаниях образуются микротрещины, что приводит к изменению параметров мемристоров [3]. В данной работе структуры были дополнительно покрыты тонким защитным слоем из ППК, чтобы исключить нарушение контакта медного электрода со слоем ППК. Таким образом, целью работы является изучение эффекта РП в мемристорах на гибкой подложке с защитным покрытием и без него при разной степени деформации изгиба, а также выявление основных аспектов влияния механической деформации на эффект РП.

Так, созданные мемристоры на основе парилена сохраняют свою работоспособность при радиусах изгиба до 5 мм (рис. 1), демонстрируя многоуровневый эффект РП (8 стабильных состояний). При этом наблюдается хорошая повторяемость переключения от цикла к циклу и от устройства к устройству. Обнаружено, что в случае наименьшего радиуса изгиба (5 мм) необходимо устанавливать меньший ток ограничения для сохранения работоспособности мемристора. Результаты данного исследования демонстрируют сохранение эффекта РП при механических деформациях и целостности верхнего электрода при создании защитного слоя и открывают новые перспективы для дальнейшего исследования мемристоров на основе парилена в качестве элементной базы носимой нейроморфной электроники.

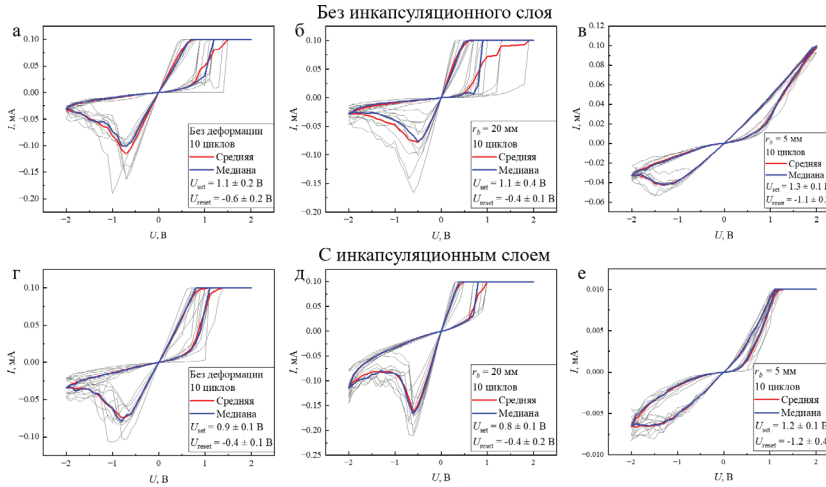


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики мемристоров на гибкой подложке без инкапсуляционного слоя (*а*–*в*) и с инкапсуляционным слоем (*г*–*е*) при разной степени деформации изгиба с указанием напряжений переключения в проводящее (U_{set}) и непроводящее (U_{reset}) состояния

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 24-19-00200). Работа была выполнена на оборудовании Ресурсных Центров (НИЦ «Курчатовский институт»).

Литература

1. Parylene Based Memristive Devices with Multilevel Resistive Switching for Neuromorphic Applications / A. A. Minnekhanov, A. V. Emelyanov, D. A. Lapkin et al. // Scientific Reports, 2019. Vol. 9. № 1. P. 10800.
2. Lee, C. D. Mechanical Properties of Thin-Film Parylene–Metal–Parylene Devices / C. D. Lee, E. Meng // Frontiers in Mechanical Engineering, 2015. Vol. 1. № September. P. 1–14.
3. Flexible parylene-based memristors: Electrophysical properties and applications in neuromorphic systems / G. A. Yuklyaevskikh, B. S. Shvetsov, A. V Emelyanov et al. // Sensors and Actuators: A. Physical, 2026. Vol. 399. № October 2025. P. 117437.

УДК 537.312.7

Перспективные материалы и особенности электрофизических характеристик мемристорных структур: современные проблемы и пути решения.

Мизгинов Д. С., к. ф.-м. н., Тельминов О. А., к. т. н., Горнев Е. С., академик
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
niime@niime.ru

В данной работе представлен анализ современного состояния разработок в области мемристорных структур на основе перспективных материалов и анализируются из электрофизические характеристики.
Ключевые слова: мемристор; 2D материалы; дихалькогениды; перовскиты; органические материалы.

Perspective materials and features of the electrophysical characteristics of memristor structures: current challenges and solutions.

Mizginov D. S., Ph.D, Telminov O. A., Ph.D, Gornev E. S., academician
Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
niime@niime.ru

This paper presents an analysis of the current state of research in the field of memristor structures based on promising materials and examines their electrophysical characteristics.
Keywords: memristor; 2D materials; dichalcogenides; perovskites; organic materials.

Переход к нейроморфным вычислительным системам и кроссбар-архитектурам требует создания новых элементов энергонезависимой памяти с высокой плотностью упаковки и низким энергопотреблением. Мемристорные структуры рассматриваются как один из наиболее вероятных кандидатов на роль базовых элементов таких систем [1]. Однако, несмотря на значительные успехи, ряд проблем, связанных с материалами и стабильностью электрофизических характеристик, ограничивает их широкое внедрение. В современной микроэлектронике поиск материалов для мемристоров вышел за рамки классических оксидов металлов. Основной вектор исследований направлен на поиск соединений, способных обеспечить стабильное переключение и воспроизводимость резистивных состояний. К наиболее актуальным классам материалов сегодня относятся двумерные материалы, перовскиты и органические полимеры [2].

Двумерные материалы (рис. 1) являются одним из наиболее перспективных направлений. Использование атомарно тонких слоев, таких как дисульфид молибдена или гексагональный нитрид бора, позволяет создавать мемристоры с вертикальным или планарным типом переноса заряда. Главные преимущества таких структур — значительное снижение энергопотребления при переключении и возможность реализации высокой плотности размещения ячеек [4]. Высокая

механическая прочность и стабильность параметров при деформации позволяют интегрировать данные материалы в гибкие подложки. За счет малого межэлектродного расстояния сокращается время дрейфа ионов, что повышает быстродействие структур и обеспечивает значительное снижение тока утечки.

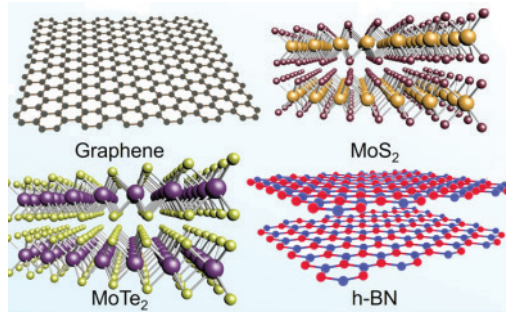


Рис. 1. Схематическое изображение 2D материалов — графен, дисульфид молибдена, дителлурид молибдена, гексагональный нитрид бора [3]

Галогенидные перовскиты актуальны благодаря аномально высокой подвижности ионов внутри кристаллической решетки. Применение галогенидных перовскитов в качестве функциональных слоев мемристорных структур обусловлено высокой подвижностью ионов при низких значениях энергии активации, что позволяет существенно снизить пороговые напряжения переключения и минимизировать напряжение переключения [5]. Кроме того, выраженная фоточувствительность этого класса материалов позволяет реализовать механизмы оптического управления проводимостью. Оптическое управление проводимостью используется для создания сенсорных нейроморфных систем, где функции восприятия и обработки информации объединены в одном устройстве. Это позволяет имитировать работу человеческого глаза, обеспечивая первичную обработку визуальных данных без необходимости передачи сигналов на центральный процессор. Такой подход существенно снижает энергопотребление и задержки в системах машинного зрения.

Литература

1. Batool, S., Idrees, M., Zhang, S.-R., Han, S.-T. & Zhou, Y. Novel charm of 2D materials engineering in memristor: when electronics encounter layered morphology // Nanoscale Horiz, 2022. 7, 480–507.
2. Li, Y., Wang, Z., Midya, R., Xia, Q. & Yang, J. J. Review of memristor devices in neuromorphic computing: materials sciences and device challenges // J. Phys. D Appl. Phys., 2018. 51, 503002.
3. Cao, Z. et al. Memristor-based neural networks: a bridge from device to artificial intelligence. Nanoscale Horiz. 8, 716–745 (2023).
4. Xie, J., Afshari, S. & Sanchez Esqueda, I. Hexagonal boron nitride (hBN) memristor arrays for analog-based machine learning hardware. npj 2D Mater. Appl. 6, 1–7 (2022).
5. Resistive Switching in Oxides / A. Mehonic, A.J. Kenyon // Defects at Oxide Surfaces / J. Jupille, G. Thornton (Eds.). Cham: Springer, 2015. P. 401–428.

УДК 004.869

Нейросетевая мультимодальная система для оценки ориентации и веса объекта в роботизированном захвате

Саира, аспирант, Капустин В. В., к. т. н., доцент
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40

В данной работе представлена нейросетевая мультимодальная система для одновременной оценки ориентации и веса объекта в роботизированном захвате 6-осевого роботизированного манипулятора. Система объединяет три распределенных датчика: стереокамера ZED2 (глобальный обзор рабочей зоны), камера OV2640 подключенная к микроконтроллеру ESP32-CAM, установленная на захвате, для визуального отслеживания ориентации с использованием маркеров ArUco, и датчик MPU6050 (IMU), также установленный на захвате, для измерения вибрации. В системе используются две нейронные сети: YOLO для обнаружения и классификации объекта, и одномерная сверточная нейронная сеть (1D-CNN) для оценки веса объекта по вибрации и классификации механических неисправностей (ослабленный сустав, добавленная масса, смещение, износ сервоприводов).
Ключевые слова: Нейронная мультимодальная система; Оценка ориентации объекта; Оценка веса объекта; Роботизированный захват; YOLO; 1D-CNN; MPU6050; ESP32-CAM; Обнаружение аномалий.

A neural network multimodal system for estimating the orientation and weight of an object in a robotic gripper

Saira, postgraduate student, Kapustin V. V., Ph.D, Associate Professor
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

This paper presents a neural network-based multimodal system for simultaneously estimating the orientation and weight of an object in the robotic grip of a 6-axis robotic manipulator. The system integrates three distributed sensors: a ZED2 stereo camera (global view of the workspace), an OV2640 camera connected to an ESP32-CAM microcontroller mounted on the gripper for visual orientation tracking using ArUco markers, and an MPU6050 sensor (IMU), also mounted on the gripper, for vibration measurements. The system utilizes two neural networks: YOLO for object detection and classification, and a one-dimensional Convolutional Neural Network (1D-CNN) for estimating object weight based on vibration and classifying mechanical faults (loose joint, added mass, offset, servo wear).
Keywords: Neural Multimodal System; Object Orientation Estimation; Object Weight Estimation; Robotic Grasper; YOLO; 1D-CNN; MPU6050; ESP32-CAM; Anomaly Detection.

Современная эпоха определяется автоматизацией. Каждая задача должна выполняться быстро и эффективно с минимальным участием человека. Сегодня машины

и механизмы заменили ручной труд во многих областях, а автоматизированное оборудование широко распространено в современных отраслях промышленности. Однако одной скорости недостаточно. Современное производство также требует совершенства, что подразумевает непрерывный контроль качества, инспекцию в реальном времени и точную проверку каждой роботизированной операции. Роботы выполняют определенные задачи очень точно и эффективно, включая сборку, упаковку, перемещение и сортировку [1]. Они также способны выполнять деликатные операции, требующие высокой точности, надежности и стабильности. Любое отклонение от ожидаемых результатов может привести к дефектам, повреждению оборудования или дорогостоящим простоям производства [2]. Хотя существуют промышленные системы мониторинга и диагностики, они очень дороги и недоступны для образовательных целей, а также для малых и средних предприятий или исследовательских лабораторий [3]. Кроме того, многим существующим системам по-прежнему не хватает надежной связи между сенсорным вводом и принятием решений в реальном времени. Поэтому разработка экономически эффективных и надежных систем мониторинга стала важнейшим приоритетом исследований [4].

Кроме того, существуют сенсорные системы для различных типов промышленных задач, способные контролировать и отслеживать работу системы в режиме реального времени. Однако многие системы ограничены использованием данных от одного датчика, например, на основе машинного зрения или вибрации, и не объединяют их, что указывает на отсутствие возможности объединения мультимодальных данных для всестороннего анализа. Высокая стоимость является еще одной серьезной проблемой для образовательных учреждений или небольших исследовательских центров. Для преодоления этих проблем в данной статье представлена мультимодальная система на основе нейронной сети для определения ориентации объекта и оценки веса в роботизированном захвате. Предложенная система объединяет три распределенных датчика: стереокамеру ZED2 для глобального мониторинга рабочего пространства, модуль ESP32-CAM, установленный на захвате для локального визуального отслеживания с использованием маркеров ArUco, и инерциальный измерительный блок MPU6050 для оценки веса на основе вибрации и диагностики неисправностей [5]. Система реализована на 6-осевом роботизированном манипуляторе с распределенным набором датчиков, включающим стереокамеру ZED2 (глобальный обзор рабочего пространства), микроконтроллер ESP32-CAM с камерой OV2640, установленной непосредственно на захвате (локальный обзор «глаз в руке»), и инерциальный датчик MPU6050 (измерение вибрации и вращения захвата).

Ниже перечислены аппаратные компоненты, которые будут использоваться в данном исследовании.

Наши научные и технические достижения в данной работе:

- Разработана многомодальная архитектура слияния данных для трех распределенных датчиков (ZED2, ESP32-CAM, MPU6050) с использованием двух нейронных сетей: YOLO для обнаружения и классификации объектов и 1D-CNN [1] для оценки веса и диагностики неисправностей.
- Реализован метод оценки ориентации захваченного объекта (углы крена, тангажа, рыскания) на основе анализа [6] маркеров ArUco с использованием камеры ESP32-CAM в конфигурации «глаз в руке».

- Создан метод оценки веса объекта на основе характеристик вибрации захвата с использованием одномерной сверточной нейронной сети (1D-CNN), обрабатывающей шесть каналов данных MPU6050 (три оси акселерометра и три оси гироскопа).
- Разработан алгоритм диагностики механических неисправностей роботизированного манипулятора, классифицирующий четыре типа состояний: ослабление соединения, добавление паразитной массы, угловое смещение захвата и износ сервоприводов.
- Реализован механизм голосования по большинству голосов 2 из 3 для надежного принятия решений по аномалиям, где окончательный вывод формируется на основе согласованных сигналов от трех независимых детекторов.
- Система интегрирована на платформе ROS2, что обеспечивает модульность, масштабируемость и совместимость с широким спектром роботизированного оборудования [4].

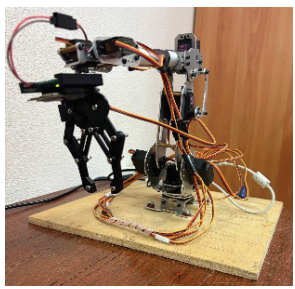


Рис. 1. 6-осевой роботизированный манипулятор



Рис. 2. Микроконтроллер ESP32-CAM



Рис. 3. Датчик MPU-6050

Практическое значение заключается в создании доступной (общая стоимость дополнительного оборудования менее 500 долларов) многомодальной системы, которую могут использовать малые и средние предприятия, образовательные учреждения и исследовательские лаборатории для повышения эффективности и надежности операций роботизированного захвата и манипулирования.

Литература

1. Vision-guided deep learning framework for dexterous robotic grasping using YOLOv8 and LSTM/Transformers / Kadalagere Sampath S., Wang N., Yang C., Wu H., Liu C., Pearson M. // Applied Sciences, 2025. Vol. 15(5). P. 2615.
2. Fault Types and Diagnostic Methods of Manipulator Robots: A Review / Zhang Y., Wu J., Gao B., Xia L., Lu C., Wang H., Cao G. // Sensors, 2025. Vol. 25(6). P. 1716.
3. Vision-Based Pick and Place Control System for Industrial Robots Using an Eye-in-Hand Camera / Nguyen V.-T., Nguyen P.-T., Su S.-F., Tan P. X., Bui T.-L. // IEEE Access, 2025. Vol. 13. P. 25127–25140.

4. Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild / Macenski S., Foote T., Gerkey B., Lalancette C., Woodall W. // Science Robotics, 2022. Vol. 7(66). P. eabm6074.
5. Muratbakeev E., Novak D., Kozhubaev Y. Investigation of Industrial Bearing Fault Diagnosis Based on 1D-CNN-LSTM // 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2025. P. 1059–106
6. Hoang D. C., Tan P. X., Nguyen A. N., Pham D. L., Vu V. D., Nguyen V. T., Bui S. A. Vote-based multimodal fusion for hand-held object pose estimation // Alexandria Engineering Journal, 2025. Vol. 120. P. 237–249.

УДК 004.932

Оптимизация нейросетевого модуля визуального позиционирования для развертывания на бортовых компьютерах мобильных объектов

Кобелев В. А., к. т. н. Тельминов О. А.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Описаны методы оптимизации нейросетевого модуля визуального позиционирования мобильного объекта: квантование модели, кэширование признаков и пакетная обработка.
Ключевые слова: мобильный объект; визуальная навигация; сиамская нейронная сеть; оптимизация; EfficientNetB0.

Optimization of a neural network module for visual positioning for deployment on onboard computers of mobile objects

Kobelev V. A., Ph.D Telminov O. A.
Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

Optimization methods for a visual positioning neural network module of an aircraft are described: model quantization, feature caching, and batch processing.
Keywords: mobile object; visual navigation; Siamese neural network; aerial photography; positioning; EfficientNetB0.

Бортовые компьютеры мобильных объектов характеризуются жесткими ограничениями по вычислительным ресурсам: отсутствие дискретной видеокарты, ограниченный объем оперативной памяти и риск теплового троттлинга (автоматическое снижение частоты процессора при перегреве) при длительной работе. Это предъявляет особые требования к нейросетевым модулям, развертываемым на борту.

Модуль определяет координаты мобильного объекта путем сопоставления бортового аэрофотоснимка с предварительно загруженной эталонной картой. Для обеспечения работы на CPU, изготовленных на основе КМОП-технологии [1], реализован комплекс мер по оптимизации.

Первой мерой является квантование модели: EfficientNetB0 [2] конвертируется в формат TensorFlow Lite [3] с 8-битным квантованием весов. Это позволило сократить размер модели до 48 МБ и ускорить инференс на CPU в 2,5 раза при незначительном снижении точности позиционирования.

Второй мерой является кэширование векторов признаков. При сканировании эталонной карты скользящим окном 192×192 пикс. с шагом 128 пикс. соседние участки перекрываются на 64 пикс. Векторы признаков перекрывающихся областей вычисляются однократно и сохраняются в хэш-таблице с доступом O(1), что исключает повторные вычисления.

Третьей мерой является пакетная обработка: участки карты формируются в батчи по 32 изображения и подаются в сеть единым запросом, что снижает накладные расходы на вызовы функций и повышает утилизацию кэша процессора.

Примененные методы обеспечили время обработки кадра 0,39 с и потребление памяти 1,8 ГБ.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологий и микроэлектроника. — М.: Техносфера, 2020. — 434 с. ISBN: 978-5-94836-611-1. EDN: YEVRRQ.
2. Kishore C. et al. EfficientNetB0-Based Deep Learning Framework for High-Accuracy Satellite Image Classification // 2026 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS). IEEE, 2026. P. 1–6.
3. TensorFlow Lite. –Текст: электронный –URL: https://github.com/tensorflow/tensorflow/tree/master/tensorflow/lite.

УДК 004.852:004.032.26

SpikeRuGPT: русский язык глазами LIF-нейрона и анализ нейроморфной активности

Хакимов А. Т.[1], Батуев Б. Б.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова Российской академии наук
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
khakimov.at@phystech.edu

В работе обучена первая русскоязычная импульсная языковая модель SpikeRuGPT на архитектуре SpikeGPT (RWKV + LIF-нейроны) на корпусе Тайга (~1,8 млрд токенов). Показано, что морфологическая сложность русского языка существенно влияет на энергоэффективность нейроморфных систем: русский требует на 53 % больше спайков, чем английский, что пропорционально увеличивает энергопотребление на нейроморфном железе. Дополнительно предложена модификация LearnableLIF с обучаемыми параметрами нейронной динамики, подтверждающая иерархию временных масштабов по слоям модели.

Ключевые слова: импульсные нейронные сети; нейроморфные вычисления; SpikeGPT; LIF-нейроны; морфология языка.

SpikeRuGPT: Russian language through the eyes of a LIF neuron and analysis of neuromorphic activity

Khakimov A. T.[1], Batuev B. B.[2]
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences
11/7 Mokhovaya St., Moscow, 125009, Russia
khakimov.at@phystech.edu

The first Russian-language spiking language model, SpikeRuGPT, is trained in this work using the SpikeGPT architecture (RWKV + LIF neurons) on the Taiga corpus (~1.8 billion tokens). It is shown that the morphological complexity of Russian substantially affects the energy efficiency of neuromorphic systems: Russian requires 53 % more spikes than English, which proportionally increases energy consumption on neuromorphic hardware. In addition, a LearnableLIF modification with trainable neural-dynamics parameters is proposed, confirming a hierarchy of temporal scales across the model layers.

Keywords: spiking neural networks; neuromorphic computing; SpikeGPT; LIF neurons; language morphology.

Импульсные нейронные сети (ИНС) — энергоэффективная альтернатива классическим нейросетям: энергопотребление нейроморфных ускорителей (Intel Loihi, BrainScaleS) пропорционально средней частоте спайков [1]. Модель SpikeGPT [2] на архитектуре RWKV с бинарными LIF-нейронами [3] впервые показала применимость ИНС к языковой генерации, однако обучена только на английском, в результате чего ее нельзя должным образом протестировать на рускоязычных задачах. В отечественной литературе также рассматривались задачи предсказания последовательностей с помощью импульсных нейронных сетей [4], однако нейроморфные языковые модели для русского языка ранее не были представлены .Открытые русскоязычные GPT-модели семейства ruGPT не получили широкого распространения и не имеют нейроморфных аналогов, что создает разрыв в исследовательской инфраструктуре для русского языка.

В работе с нуля обучена русскоязычная модель SpikeRuGPT (12 слоев, d_model = 512, ~100 млн параметров) на корпусе Тайга [5] (~1,8 млрд токенов, BPE ruGPT-3) на NVIDIA A100 до валидационной перплексии 59,79. Ключевой архитектурной модификацией по сравнению с оригинальным SpikeGPT стала замена фиксированных LIF-нейронов на LearnableLIF — нейроны с обучаемыми параметрами мембранной постоянной времени τ и порога возбуждения θ, параметризованными через softplus для гарантии физической корректности ($\tau > 1$, $\theta > 0$). На основе обученной модели проведено послойное сравнение спайковой активности с открытой SpikeGPT-OpenWebText-216M [2] на ~1000 фрагментах из Тайги и OpenWebText.

Получена первая работоспособная русскоязычная импульсная языковая модель SpikeRuGPT на архитектуре SpikeGPT с модифицированными обучаемыми LIF-нейронами (LearnableLIF). Впервые показано, что морфологическая сложность языка — значимый фактор энергоэффективности ИНС: средний firing rate 33,2% против 21,7% у английской (рост 53%). Различие локализовано в средних слоях: англоязычная модель почти неактивна (<5%), русскоязычная поддерживает 20–25%, что связано с ранней обработкой падежных и согласовательных зависимостей. Помимо этого, подтверждена гипотеза об иерархии временных масштабов LIF-нейронов: обучаемая постоянная времени τ монотонно растет с глубиной слоя (корреляция Пирсона +0,996), что соответствует принципу иерархической обработки информации — нижние слои кодируют лексические признаки с быстрой динамикой, верхние интегрируют синтаксический контекст на длинных зависимостях. Фиксированный $\tau = 2{,}0$ оригинальной модели является не самым оптимальным компромиссом.

Обученная модель и методология воспроизводимы и открыты для сообщества: это снимает барьер входа для дальнейших исследований спайковых языковых моделей на русском и иных морфологически богатых языках — от доменного дообучения до запуска на нейроморфном железе.

УДК 004.89

Параллельный набор предложений на русском языке с аннотированными грамматическими исправлениями для обучения и тестирования LLM

Плесовских А. Е., Голуб В. В., Щагин Д. Ю., Мустафина Э. Р., Романов А. Ю., д. т. н.
НИУ «Высшая школа экономики»
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
aeplesovskikh@hse.ru, vvgolub@edu.hse.ru, dishchagin@edu.hse.ru, ermustafina@edu.hse.ru, a.romanov@hse.ru

В работе представлен крупный датасет предложений с исправлениями грамматических ошибок для русского языка, содержащий 707 тысяч пар предложений, собранных на основе анонимизированных студенческих научно-исследовательских работ и открытых корпусов на русском языке. С использованием датасета проведено сравнительное исследование современных больших языковых моделей с применением параметрически-эффективного дообучения low-rank adaptation, по результатам которого выбрана модель, демонстрирующая наилучшее соотношение качества исправлений и скорости инференса.
Ключевые слова: искусственный интеллект; большие языковые модели; датасет; low-rank adaptation.

A parallel set of sentences in Russian with annotated grammatical error corrections for training and testing LLMs

Plesovskikh A. E., Golub V. V., Shchagin D. Y., Mustafina E. R., Romanov A. Y., Sc.D
HSE University
34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia
aeplesovskikh@hse.ru, vvgolub@edu.hse.ru, dishchagin@edu.hse.ru, ermustafina@edu.hse.ru, a.romanov@hse.ru

The paper presents a large dataset of sentences with grammatical error corrections for the Russian language, containing 707,000 pairs of sentences, collected based on anonymized student research papers and open corpora in Russian. Using the dataset, a comparative study of modern large language models was conducted, employing parametrically efficient low-rank adaptation fine-tuning; the results of the study were used to select the model demonstrating the best balance between the quality of corrections and inference speed.
Keywords: artificial intelligence; large language models; dataset; low-rank adaptation.

Проблема исправления предложений с грамматическими ошибками и лексически неприемлемыми конструкциями долгое время остается одной из центральных задач теоретической и прикладной лингвистики. Идея оценивать выражения с точки зрения их грамматической правильности восходит ко II в. н. э. –времени жизни александрийского грамматика Аполлония Дискола, который первым написал работу о синтаксисе [1]. В своих работах он приводил примеры грамматически

дефектных конструкций (солецизмов), чтобы обосновать, почему одни конструкции лучше других [2].

В классических работах по грамматике, в частности, в своих исследованиях Н. Хомский критикует подходы, когда приемлемость предложений часто определялась на основе интроспективных суждений лингвистов, при этом неприемлемые конструкции традиционно помечались символом астериска (*). Подобный подход, несмотря на свою методологическую значимость в прошлом столетии для становления теории, подвергался критике в связи с высокой степенью субъективности и зависимостью от индивидуальных языковых предпочтений экспертов [2].

Лексическая приемлемость в широком смысле отражает степень естественности и допустимости языковой конструкции для носителя языка и не сводится исключительно к соблюдению формальных грамматических правил. В отличие от грамматической корректности, которая определяется соответствием формальным синтаксическим и морфологическим нормам, лексическая приемлемость включает лексическую сочетаемость, стилистическую уместность, прагматические ограничения и контекстуальные факторы [3]. Таким образом, предложение может быть формально грамматически корректным, но при этом восприниматься как неестественное или неприемлемое в реальном языковом употреблении (например к таковым возможно отнести следующее предложение: «Бесцветные зеленые идеи спят яростно.»).

С развитием корпусной лингвистики и накоплением больших массивов размеченных текстовых данных акцент в исследованиях приемлемости сместился от индивидуальных экспертных оценок к статистическим и эмпирическим методам анализа. Существенную роль в этом процессе сыграло развитие моделей машинного перевода, в рамках которых задача сопоставления исходного и целевого текста стала рассматриваться как отображение множества одних языковых форм в множество других форм. Впоследствии было показано, что задачи генерации текста, перефразирования и исправления ошибок концептуально близки к задаче перевода [4], что послужило основой для применения нейронных архитектур и больших языковых моделей в задачах грамматической коррекции.

В этом контексте особую значимость приобретают масштабные параллельные датасеты, содержащие примеры реальных языковых ошибок и их исправлений. Для русского языка подобные ресурсы остаются ограниченными как по объему, так и по разнообразию языковых явлений, особенно в академической и научно-исследовательской сферах. Настоящая работа направлена на восполнение данного пробела путем создания крупного корпуса исправлений, основанного на аутентичных текстах студенческих научно-исследовательских работ и открытых датасетах, а также на систематическое исследование эффективности современных языковых моделей в задаче исправления грамматических ошибок.

Формирование датасета

В рамках данной работы был собран и подготовлен датасет, содержащий более 707 тысяч параллельных наблюдений вида «исходное предложение –исправленное предложение» на русском языке [5] в формате, совместимом с Stanford Alpaca. Часть датасета (12 тысяч предложений), связанная с датасетом RULEC-GEC [6], может быть получена у правообладателя исследователями отдельно. Датасет содержит как предложения с исправлениями, так и пары, не требующие корректировок.

Основным источником данных послужили анонимизированные тексты научно-исследовательских работ студентов МИЭМ НИУ ВШЭ. Данные тексты отражают реальные языковые ошибки, характерные для академического письма, включая лексические, морфологические, синтаксические и стилистические нарушения.

Для увеличения разнообразия языковых конструкций и типов ошибок датасет был дополнен примерами из открытых русскоязычных корпусов, содержащих предложения с грамматическими исправлениями, включая RULEC-GEC [6], cLang-8 [7], RLC-GEC [8], RLC-Crowd [8], датасет «Орфографические ошибки и опечатки» [9]. В процессе агрегации данных выполнялась нормализация форматов, удаление дубликатов и фильтрация низкокачественных пар предложений. В табл. 1 представлено сравнение объема разработанного датасета с рядом широко используемых русскоязычных корпусов для задачи исправления ошибок.

Таблица 1. Сравнение объемов датасетов

Датасет	Количество пар предложений
RULEC-GEC [6]	12 480
cLang-8 [7]	43 574
RLC-GEC [8]	52 211
RLC-Crowd [8]	34 150
датасет «Орфографические ошибки и опечатки» [9]	72 792
RuCoLA [10]	13 400
RuGECv1 [5]	707 261

Разработанный корпус существенно превосходит существующие аналоги по объему и описывает более широкий набор ошибок, характерных для академических текстов.

Обучение и оценка моделей

С применением собранного датасета были обучены и проведено сравнение 9 современных языковых моделей, таких как: Falcon-H1 0.5B Instruct, Gemma2 2B, Gemma2 9B, Llama3 8B, Llama3.1 8B, Mistral 7B, Qwen2.5 7B и TinyLlama 1.1B v1.0, доступных в репозитории Hugging Face [11]. Обучение выполнялось с использованием библиотеки unsloth 2026.1.3 на языке программирования Python 3.11 с применением 4-битной квантизации и параметрически-эффективным дообучением LoRA [12], что позволило существенно снизить требования к вычислительным ресурсам.

Для оценки качества моделей использовались метрики, ориентированные на практическую задачу исправления ошибок: доля предложений, в которых модель не изменила исходный текст; доля ухудшенных предложений; доля улучшенных предложений. На основе этих величин вычислялись показатели Edit rate (ER), определяемый как отношение суммы улучшенных и ухудшенных предложений к общему количеству примеров (в процентах), и Success rate (SR), характеризующий долю успешных исправлений среди всех внесенных изменений (в процентах). В табл. 2 приведено сравнение моделей по вычислительным характеристикам и параметрам обучения.

Таблица 2. Сравнение моделей и параметров обучения

Модель	Время инференса, сек.	Пиковая память, ГБ	ER, %	SR, %
Gemma2 2B	2,07	3,72	12,00	91,67
Gemma2 9B	3,41	7,65	17,00	70,59
Falcon-H1 0.5B Instruct	10,51	1,29	9,00	22,22
Llama3 8B	2,81	6,34	16,00	87,50
Llama3.1 8B	2,82	6,65	11,00	90,91
Mistral 7B	3,41	5,01	12,00	66,67
Qwen2.5 7B	2,04	1,20	12,00	75,00
TinyLlama 1.1B v1.0	2,74	8,21	11,00	63,64

По результатам оценки на тестовой выборке наилучшее соотношение показателей Success rate и скорости инференса продемонстрировала модель Gemma2 2B. В связи с этим данная модель была выбрана для дополнительного обучения на увеличенном количестве шагов (10000), что позволило дополнительно повысить стабильность и качество исправлений.

Выводы

В работе представлен большой корпус параллельных данных для задачи исправления грамматических ошибок в русском языке, ориентированный на обучение и оценку больших языковых моделей. Разработанный датасет содержит более 707 тысяч пар предложений вида «исходное предложение –исправленное предложение» и был сформирован на основе анонимизированных научно-исследовательских работ студентов МИЭМ НИУ ВШЭ, а также дополнен данными из открытых русскоязычных корпусов.

На основе собранного корпуса проведено экспериментальное исследование эффективности 9 современных языковых моделей различного масштаба, обученных с использованием методов параметрически-эффективного дообучения и 4-битной квантизации в среде Unsloth. Оценка качества моделей выполнена на отложенной тестовой выборке с использованием специализированных метрик, отражающих способность модели улучшать качество предложений без деградации исходного предложения. По результатам сравнительного анализа выбрана модель Gemma2 2B, показавшая наилучшее соотношение точности исправлений и скорости инференса, после чего проведено ее дополнительное обучение на увеличенном числе шагов. Итоговые модель и датасет опубликованы в открытом доступе на платформе Hugging Face [13].

Литература

1. Householder F. W. Apollonius Dyscolus and Herodian // Concise History of the Language Sciences. Pergamon, 1995. P. 111–115.
2. Householder F. W. On arguments from asterisks // Foundations of Language. 1973. Vol. 10. № 3. P. 365–376.
3. Федорова О. В. Об экспериментальном синтаксисе и о синтаксическом эксперименте в языкознании // Вопросы языкознания, 2013. — № 1. — С. 3–21.

4. Junczys-Dowmunt M., Grundkiewicz R., Guha S., Heafield K. Approaching Neural Grammatical Error Correction as a Low-Resource Machine Translation Task [Электронный ресурс] // arXiv.org, 2018. Дата обновления: 16.04.2018. URL: https://arxiv.org/abs/1804.05940 (дата обращения: 21.01.2026).
5. RuGECv1 // huggingface.co [Электронный ресурс]. URL: https://huggingface.co/datasets/p1746-lingua/ru-gec-v1 (дата обращения: 22.01.2026).
6. Rozovskaya A., Roth D. Grammar error correction in morphologically rich languages: The case of Russian // Transactions of the Association for Computational Linguistics, 2019. Vol. 7. P. 1–17.
7. Rothe S., Mallinson J., Malmi E., Krause S., Severyn A. A simple recipe for multilingual grammatical error correction [Электронный ресурс] // arXiv.org, 2022. Дата обновления: 09.08.2022. URL: https://arxiv.org/abs/2106.03830 (дата обращения: 21.01.2026).
8. Kosakin D. et al. Russian Learner Corpus: Towards Error-Cause Annotation for L2 Russian // Proceedings of the 2024 Joint International Conference on Computational Linguistics, Language Resources and Evaluation (LREC-COLING 2024), 2024. P. 14240–14258.
9. Открытые данные на Карте слов // github.com [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/dkulagin/kartaslov/tree/master (дата обращения: 21.01.2026).
10. Mikhailov V., Shamardina T., Ryabinin M., Pestova A., Smurov I., Artemova E. RuCoLA: Russian Corpus of Linguistic Acceptability // Proceedings of the 2022 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, 2022. P. 5207–5227.
11. Hugging Face // huggingface.co [Электронный ресурс]. URL: https://huggingface.co (дата обращения: 21.01.2026).
12. Gao D. et al. FashionGPT: LLM instruction fine-tuning with multiple LoRA-adapter fusion // Knowledge-Based Systems, 2024. Vol. 299. P. 112043.
13. Gemma2-2B-GEC-v1 // huggingface.co [Электронный ресурс]. URL: https://huggingface.co/p1746-lingua/gemma2-2b-gec-v1 (дата обращения: 22.01.2026).

УДК 004.27, 621.3.06, 621.382

Разработка архитектуры для on-chip обучения спайковой нейронной сети на основе мемристоров

Трунов К. Б., Зенкевич А. В., Ханас А. Р.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Предложена электрическая схема нейроморфной системы пресинаптический нейрон –синапс –постсинаптический нейрон с механизмом синаптической пластичности согласно правилу STDP. Система реализована экспериментально, продемонстрирован ее функционал.
Ключевые слова: Нейроморфные вычисления; STDP; схемотехника; мемристоры.

On-chip training architecture for a spiking neural network based on memristors

Trunov K. B., Zenkevich A. V., Khanas A. R.
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

An electrical circuit of a neuromorphic system presynaptic neuron –synapse –postsynaptic neuron with STDP-based synaptic plasticity has been proposed. The system was implemented experimentally and it's functionality was demonstrated.
Keywords: Neuromorphic computing; STDP; circuit design; threshold resistive switches; memristors.

В последние годы все больший интерес начинают представлять нейроморфные архитектуры. Одной из таких архитектур является Спайковая Нейронная Сеть (СНС), представляющая собой систему искусственных нейронов, соединенных между собой с помощью искусственных синапсов и передающих сигналы в виде временных рядов импульсов («спайков»). Вес синапса в ходе обучения СНС может изменяться согласно правилу STDP (Spike-Timing-Dependent Plasticity) –изменение зависит от знака и величины временной задержки между спайками, сгенерированными нейронами, которые соединяет данный синапс.

Один из наиболее перспективных путей энергоэффективной аппаратной реализации СНС состоит в разработке вычислительных систем на основе альтернативной компонентной базы –в частности, мемристоров. Известно множество работ по применению мемристоров для создания искусственных нейронов [1], а также одиночных синапсов с реализацией механизма STDP [2]. В то же время, проблема интеграции STDP-синапсов с нейронами на основе мемристоров в применимом на практике виде остается малоисследованной.

В данной работе предлагается вариант системы пресинаптический нейрон (пре-нейрон) –синапс –постсинаптический нейрон (пост-нейрон) на основе мемристоров со схемой обратной связи, позволяющей реализовать обучение СНС

по правилу STDP, используя минимальное число транзисторов (рис. 1). Синапс состоит из 4 транзисторов и мемристора с долгосрочной памятью и (квази-)непрерывным диапазоном состояний, спайки при этом распространяются от пре-нейрона к пост-нейрону, и за счет петли обратной связи на мемристоре образуется сигнал необходимой для STDP формы.

Схема была реализована экспериментально с использованием пороговых энергозависимых мемристоров на основе пленок диоксида ванадия для создания спайковых нейронов. Было продемонстрировано, как сопротивление синапса влияет на передачу спайка от пре-нейрона к пост-нейрону. Также на примере моделирования в среде LTSpice показано обучение без учителя (unsupervised learning) СНС размерности 4×2, состоящей из предлагаемых STDP-синапсов.

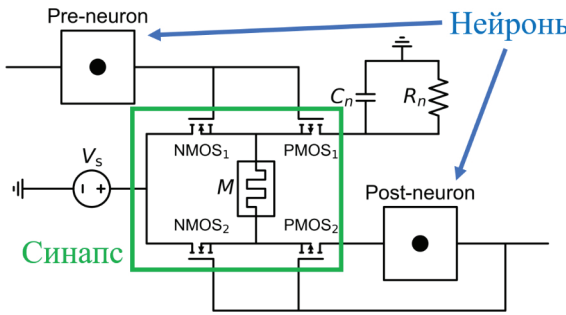


Рис. 1. Предлагаемая схема STDP-синапса, соединяющего пре-нейрон и пост-нейрон

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 26-19-00450).

Литература

1. Biological plausibility and stochasticity in scalable VO_2 active memristor neurons / Yi, W., Tsang, K.K., Lam, S.K. et al. // Nature communications, 2018. Vol. 9 (1): 4661. DOI: 10.1038/s41467-018-07052-w.
2. Matveyev Yu. et al. Resistive switching and synaptic properties of fully atomic layer deposition grown TiN/HfO2/TiN devices // Journal of Applied Physics, 2015. Vol. 117 (4). P. 044901. DOI: 10.1063/1.4905792.

УДК 004.032.26

Анализ влияния точности реализации матричных умножений при моделировании вычислительной системы на инференс и обучение нейросетей

Глаз Р.[1,2], Крюков П. И.[1,2]
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
glaz.rs@phystech.edu, pavel.kryukov@phystech.edu
[2] *ПАО «Сбербанк»*
121170, г. Москва, Кутузовский пр-т, 32

В работе исследовано влияние реализации матричного умножения при функциональном моделировании специализированной вычислительной системы на итоговую вычислительную точность при инференсе и обучении нейросетей. Разработаны аналитическая модель накопления вычислительных расхождений по слоям сети и измерительный конвейер, раздельно оценивающий вклад компилятора нейросетей и вклад реализации матричного умножения, а также определяющий тип ошибки — случайная или систематически смещенная. Измерения на компонентах современных трансформерных и сверточной архитектур показали, что главным источником расхождений выступает компилятор нейросетей, а не выбор реализации матричного умножения, вклад которой на 2–5 порядков меньше; поэтому относительно эталонной реализации на центральном процессоре перенос матричного умножения на графический процессор не ухудшает вычислительную точность. Показано, что в современных архитектурах вносимые по слоям расхождения не усиливаются, а остаются умеренными: нормализационные слои, нелинейности и усреднения действуют как стоки расхождений, сжимая возникающие возмущения. Установлено также, что характер накопления расхождений по слоям определяется типом ошибки сильнее, чем ее величиной.

Ключевые слова: функциональный симулятор; реализация матричного умножения; вычислительная точность; компилятор нейросетей; накопление погрешностей; инференс и обучение нейросетей.

Analysis of the impact of the accuracy of matrix multiplication implementation in computer system modeling on the inference and training of neural networks

Glaz R.[1,2], Kryukov P. I.[1,2]
[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
glaz.rs@phystech.edu, pavel.kryukov@phystech.edu
[2] *Sberbank PJSC*
32 Kutuzovsky Ave., Moscow, 121170, Russia

The paper examines the impact of the implementation of matrix multiplication in the functional modeling of a specialized computing system on the final computational

accuracy in the inference and training of neural networks. An analytical model for the accumulation of computational discrepancies across network layers and a measurement pipeline have been developed that separately evaluates the contribution of the neural network compiler and the contribution of the matrix multiplication implementation, as well as determining the type of error — random or systematically biased. Measurements on the components of modern transformer and convolutional architectures have shown that the main source of discrepancies is the neural network compiler, rather than the choice of matrix multiplication implementation, whose contribution is 2–5 orders of magnitude less; therefore, relative to the reference implementation on the central processor, transferring matrix multiplication to the GPU does not impair computational accuracy. It is shown that in modern architectures the discrepancies introduced by layers do not increase, but remain moderate: normalization layers, nonlinearities, and averages act as divergence sinks, compressing the resulting disturbances. It has also been established that the nature of the accumulation of discrepancies in layers is determined more strongly by the type of error than by its magnitude.

Keywords: functional simulator; implementation of matrix multiplication; computational accuracy; neural network compiler; accumulation of errors; inference and training of neural networks.

При разработке специализированных вычислительных систем используются функциональные симуляторы и симуляторы производительности, на каждый из которых существуют определенные требования по соответствию вычислительной точности симуляции с точностью вычислений самой системы. Моделирование матричных умножений является одним из узких мест в производительности симуляторов, что приводит к необходимости ускорения моделирования через использование графических процессоров и специализированных библиотек матричных операций, таких как cuBLAS [1] и CUDA [2].

Способ моделирования матричного умножения существенно сказывается на точности вычисления выходных тензоров слоев нейросети. В зависимости от архитектуры вычислительные расхождения распространяются на последующие слои (нормализации, нелинейные функции, последующие матричные умножения). При обучении градиенты обучаемых параметров вычисляются методом обратного распространения ошибки, что означает дополнительное распространение расхождений, включая порождаемые самими матричными умножениями.

В работе сравниваются три реализации матричного умножения в функциональном симуляторе: эталонная последовательная реализация на центральном процессоре, библиотека cuBLAS [1] и специализированное CUDA-ядро [2] с явным управлением порядком суммирования частичных произведений. Различия реализаций приводят к несовпадению результатов вследствие конечной точности арифметики с плавающей точкой [5], одним из проявлений которой является неассоциативность сложения. Перенос матричного умножения на графический процессор заметно ускоряет моделирование, причем выигрыш тем больше, чем выше доля матричных умножений в вычислительном графе модели: в проведенных экспериментах он составил от 2 до 4 раз в зависимости от типа нейросети.

Для оценки критичности влияния реализации матричного умножения на итоговую точность разработан алгоритм, выявляющий наиболее узкие по вычислительной точности места нейросети при инференсе и обучении, и реализован

инструмент анализа на основе библиотеки PyTorch [3] и компилятора нейросетей OpenXLA [4]. Инструмент послойно сравнивает эталонный и целевой запуски, методом послойного повтора с эталонным входом выделяет собственное расхождение каждого слоя без эффекта накопления, оценивает коэффициент накопления расхождений по слоям сети и за один прямой проход классифицирует тип ошибки. Установлено, что доминирующим источником расхождений является компилятор нейросетей, тогда как различие между GPU-реализациями матричного умножения на несколько порядков меньше и не ухудшает точность относительно реализации на центральном процессоре; при этом систематически смещенная ошибка способна накапливаться по слоям интенсивнее случайной даже при меньшей величине, что особенно существенно при обучении.

Литература

1. NVIDIA Corporation. cuBLAS Library User Guide. URL: https://docs.nvidia.com/cuda/cublas.
2. NVIDIA Corporation. CUDA C++ Programming Guide. URL: https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide.
3. PyTorch documentation. URL: https://docs.pytorch.org/docs/stable/index.html.
4. OpenXLA documentation. URL: https://openxla.org/xla/architecture.
5. Higham N.J. Accuracy and Stability of Numerical Algorithms. 2nd ed. Philadelphia: SIAM, 2002. 680 p.

УДК 621.3.049

Фоточувствительные мемристоры на основе композитного материала из поли-*n*-ксилилена и полупроводниковых частиц

Трофимов А. Д.[1], Емельянов А. В.[1,2,3], к. ф.-м. н., Мацукатова А. Н.[1], к. ф.-м. н., Несмелов А. А.[1]

[1] НИЦ «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
trofimov_ad@nrcki.ru, emelyanov_av@nrcki.ru, matcukatova_an@nrcki.ru, nesmelov_aa@nrcki.ru
[2] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Изучены эффекты резистивного переключения (**РП**), в том числе фоточувствительного, в мемристивных структурах на основе композита полупроводниковых наночастиц (MoO_x, PbTe) и полимера поли-*n*-ксилилена. Разработаны качественная и компактная модели **РП**, исследована возможность применения мемристоров для нейроморфных вычислений.
Ключевые слова: резистивное переключение; нанокомпозит; поли-*n*-ксилилен; фоточувствительные мемристоры; полупроводниковые наночастицы.

Photosensitive memristors based on a composite material of poly(p-xylylene) and semiconductor particles

Trofimov A. D.[1], Emelyanov A. V.[1,2,3], Ph.D, Matsukatova A. N.[1], Ph.D, Nesmelov A. A.[1]

[1] NRC «Kurchatov Institute»
1, Akademika Kurchatova Sq., Moscow, 123182, Russia
trofimov_ad@nrcki.ru, emelyanov_av@nrcki.ru, matcukatova_an@nrcki.ru, nesmelov_aa@nrcki.ru
[2] Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
[3] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

Resistive switching (RS) effects, including photosensitive ones, were studied in memristive structures based on a composite of semiconductor nanoparticles (MoOx, PbTe) and the polymer poly(p-xylylene). High-quality and compact RS models were developed, and the potential of using memristors for neuromorphic computing was explored.
Keywords: resistive switching; nanocomposite; poly(p-xylylene); photosensitive memristors; semiconductor particles

В настоящее время ведется разработка новых материалов для мемристора –перспективного элемента для создания искусственного синапса в нейромфных вычислительных системах. Особое внимание привлекают фоточувствительные

материалы, чтобы создать системы нейроморфного зрения, которые эффективно обрабатывают, передают и хранят оптическую информацию. Устройства на основе органического полимера поли-*n*-ксилилена (**парилена, ППК**), который обладает такими преимуществами, как низкая стоимость, технологическая простота, гибкость и биосовместимость, продемонстрировали хорошие мемристивные характеристики [1]. Однако из-за стохастической природы формирования проводящих каналов (филаментов) ППК–мемристоры характеризуются высокой вариабельностью параметров и значительным разбросом напряжений резистивного переключения (**РП**), что ограничивает их практическое применение. Также ППК не обладает чувствительностью к свету. Один из подходов для преодоления перечисленных недостатков –внедрение в матрицу ППК дополнительных наночастиц (**НЧ**), которые задают направление образования филаментов и влияют на оптические свойства.

В данной работе в качестве НЧ выступали полупроводниковые наночастицы MoO_x или PbTe. MoO_x обладает шириной запрещенной зоны *Eg* от 2,9 до 3,15 эВ в монокристаллах, значит должен реагировать на свет с $\lambda \lesssim 400$ нм. Узкозонный полупроводник PbTe (при размере гранулы PbTe ~4 нм $Eg \approx 0{,}5$ эВ), наоборот, фоточувствительный во всей видимой и ближней ИК-области спектра ($\lambda \lesssim 3$ мкм). На рис. 1 показаны полученные спектры поглощения композитных материалов. Композитный слой ППК с НЧ напылялся между верхним и нижним электродом. В качестве нижнего электрода использовался проводящий прозрачный материал –оксид индия-олова (ITO), который наносился сплошным слоем на подложку из стекла и позволял освещать образцы снизу, для верхних электродов использовались медь (Cu), серебро (Ag) или платина (Pt), напыленные с помощью магнетронного распыления через теневую маску 0,2×0,5 мм^2.

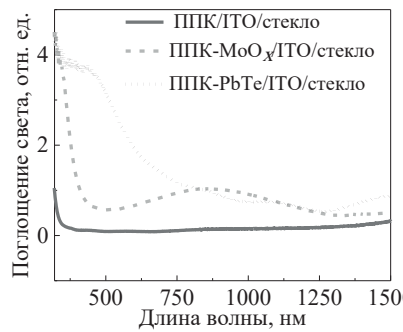
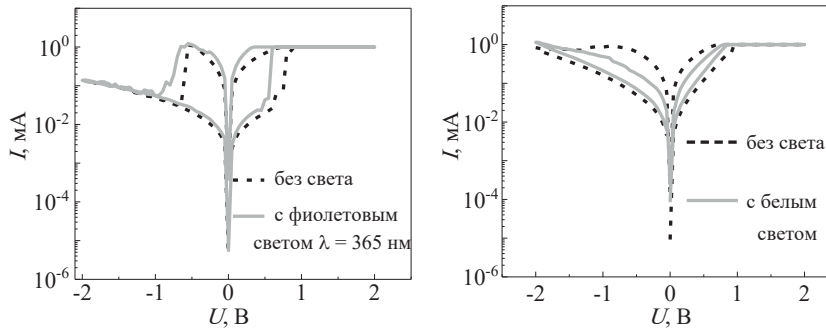


Рис. 1. Сравнение спектров поглощения структур ППК/ITO/стекло, ППК–PbTe/ITO/стекло и ППК–MoO_x/ITO/стекло

В ходе работы для образцов на основе ППК–MoO_x найден наиболее оптимальный материал верхнего электрода [2], был проведен анализ влияния толщины, концентрации наполнителя, отжига в разной атмосфере (без отжига, на воздухе и в вакууме) и с разной температурой (от 150 до 300 °C) после синтеза слоя на структурные, мемристивные и оптические свойства образцов с оптимальным верхним электродом. Установлены механизмы влияния света на РП (рис. 2*а*) [3]. Для образцов ППК–PbTe выявлено влияние отжига на мемристивные и оптические свойства,

исследовано влияние освещения белым светом на РП (рис. 2*б*), предложена модель данного воздействия [4].



а *б*

Рис. 2. Медианные по нескольким последовательным циклам вольт-амперные характеристики в условиях с и без освещения: *а*) структур Cu/ППК–MoO_x/ITO/стекло; *б*) структур Cu/ППК–PbTe/ITO/стекло

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-19-00200). Измерения выполнены на оборудовании ресурсных цетров (НИЦ КИ).

Литература

1. Minnekhanov A. A., Emelyanov A. V., Lapkin D. A. et al. Parylene Based Memristive Devices with Multilevel Resistive Switching for Neuromorphic Applications // Sci. Rep., 2019. Vol. 9. № 10800. P. 1–9.
2. Trofimov A. D., Emelyanov A. V. Influence of the Active Electrode Material on the Characteristics of Parylene–MoO_x-Based Memristors // Nanobiotechnol. Rep., 2025. Vol. 20. № 6. P. 936.
3. Trofimov A. D., Nesmelov A. A., Emelyanov A. V. Photosensitive Memristors Based on Nanocomposite Parylene-MoO_x // Conference proceedings 6 International conference Neurotechnologies and neurointerfaces, 2024. P. 241–243.
4. Трофимов А. Д., Николаев С. Н., Емельянов А. В. Особенности резистивного переключения мемристоров на основе ППК с наночастицами PbTe при фотовозбуждении // Микроэлектроника, 2025. — Т. 54. — № 6. — С. 478–486.

УДК 621.3.049

Детектирование аномалий в работе производственного оборудования

Шмаков В. Е.[1,2], Мещанинов Ф. П.[1,2] к. ф.-м. н., Жевненко Д. А.[2] к. ф.-м. н., Горнев Е. С.[1,2] чл.-корр. РАН, д. т. н., академик
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В данной работе описана и реализована реконструкционная модель для детектирования аномалий в многомерных временных рядах, основанная на цепочке конкурирующих автоэнкодеров. Представлен принцип взаимодействия автоэнкодеров в процессе обучения, а также проведено экспериментальное исследование эффективности предложенного подхода на задачах обнаружения аномалий промышленных данных.
Ключевые слова: детектирование аномалий; промышленная диагностика; временные ряды; глубокое обучение; автоэнкодер; соревновательное обучение.

Anomaly detection in industrial equipment operation

Shmakov V. E.[1,2], Meshchaninov F. P.[1,2], Ph.D, Zhevnenko D. A.[2], Ph.D, Gornev E. S.[1,2], Corr. Member of RAS, Sc.Di, Academician
[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

This paper describes and implements a reconstruction-based model for anomaly detection in multivariate time series, built as a chain of competing autoencoders. The interaction mechanism between the autoencoders during training is presented, and the effectiveness of the proposed approach is experimentally evaluated on industrial anomaly-detection tasks.
Keywords: anomaly detection; industrial diagnostics; time series; deep learning; autoencoder; competitive learning.

Постоянное усложнение технологических процессов в микроэлектронике требует разработки и внедрения новых методов контроля качества выпускаемой продукции и диагностики технического состояния производственного оборудования. Одним из наиболее активно развивающихся направлений является применение моделей детектирования аномалий [1–4]. Такие модели позволяют своевременно выявлять нарушения в работе оборудования и обнаруживать дефектные изделия на ранних этапах производства [5].

Модели детектирования аномалий могут быть реализованы на основе классических методов машинного обучения (*k* ближайших соседей [6], обобщенный изолированный лес [7], метод главных компонент [8]). Однако применение подобных

алгоритмов, как правило, требует выполнения предварительной обработки данных. Кроме того, их эффективность зачастую снижается при увеличении размерности пространства признаков.

В отличие от классических методов, модели глубокого обучения способны эффективно обрабатывать высокоразмерные данные, автоматически извлекая информативные признаки в процессе обучения. Это особенно важно для современных производственных систем, в которых технологическое оборудование оснащено большим количеством датчиков, генерирующих многомерные временные ряды.

Модели глубокого обучения, применяемые для детектирования аномалий во временных рядах, принято разделять на два основных класса: предиктивные и реконструкционные [9]. Предиктивные модели формируют прогноз последующих значений временного ряда на основе предшествующих наблюдений. При этом наличие аномалии определяется по величине ошибки прогнозирования: если отклонение между предсказанными и фактическими значениями превышает заданный порог, соответствующий участок временного ряда классифицируется как аномальный.

Реконструкционные модели основаны на восстановлении исходного временного ряда после его отображения в пространство меньшей размерности. Такие модели обучаются преимущественно на данных, соответствующих нормальному режиму функционирования системы, благодаря чему они способны с высокой точностью реконструировать только нормальное поведение. Вследствие этого аномальные участки временного ряда характеризуются повышенной ошибкой восстановления, которая и используется в качестве критерия обнаружения аномалий.

Предлагаемый подход основан на построении реконструкционной модели, представляющей собой последовательность из (k) автоэнкодеров, взаимодействующих между собой в соответствии с принципом конкурентного обучения, предложенным в работе [10]. Для каждого автоэнкодера вводится собственная функция потерь (L_i) (см. Формулу (1)).

$$L_i = \alpha(i,n)MSE\left(W, AE_i(W)\right) - \beta(i,n)MSE\left(W, AE_i\left(AE_{i-1}(W)\right)\right) + \\ +\gamma(i,n)MSE\left(W, AE_{i+1}\left(AE_i(W)\right)\right), \quad (1)$$

где $\alpha(i,n), \beta(i,n), \gamma(i,n): \mathbb{N}^2 \to \mathbb{R}$ – функции задающие вес слагаемых, включенных в L_i, в зависимости от номера автоэнкодера i и номера эпохи обучения n.

Взаимодействие автоэнкодеров в цепочке организовано следующим образом:

1. Первый автоэнкодер обучается реконструировать входные данные таким образом, чтобы реконструкция была максимально близка к исходным данным и при этом следующий автоэнкодер не мог отличить ее от реальных данных
2. Второй автоэнкодер одновременно решает две задачи: различает исходные данные и реконструкции, сформированные первым автоэнкодером, а также формирует собственную реконструкцию, максимально согласованную с исходными данными
3. Каждый последующий (i)-й автоэнкодер минимизирует ошибку реконструкции, стремится различать реальные и сгенерированные данные и одновременно формирует реконструкцию, неотличимую от реальных данных для следующего автоэнкодера цепочки

Таким образом, каждый автоэнкодер одновременно выступает в роли генератора по отношению к последующему элементу цепочки и дискриминатора по отношению к предыдущему.

Предложенный подход был протестирован на открытом наборе данных SMD. При $k = 3$ удалось получить метрики *Accuracy* = 0,91 и *F*1-*score*=0,74.

Литература

1. Jebril H. et al. An Autoencoder-Based Approach for Fault Detection in Multi-Stage Manufacturing: A Sputter Deposition and Rapid Thermal Processing Case Study // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2022. Vol. 35. P. 1–1.
2. Chen C.-Y. et al. Equipment Anomaly Detection for Semiconductor Manufacturing by Exploiting Unsupervised Learning from Sensory Data // Sensors, 2020. Vol. 20. № 19. P. 5650.
3. Fan S.-K.S. et al. Defective wafer detection using a denoising autoencoder for semiconductor manufacturing processes // Advanced Engineering Informatics, 2020. Vol. 46. P. 101166.
4. Bao Y.-Y. et al. Wafer Map Defect Classification Using Autoencoder-Based Data Augmentation and Convolutional Neural Network / arXiv:2411.11029 [cs]. arXiv, 2024.
5. Kim T.-Y. et al. Deep Learning-Based Detection of Defects in Wafer Buffer Zone During Semiconductor Packaging Process // Multiscale Science and Engineering, 2024. Vol. 6. № 1. P. 25–32.
6. Jain M. et al. A K-Means clustering and SVM based hybrid concept drift detection technique for network anomaly detection // Expert Systems with Applications, 2022. Vol. 193. P. 116510.
7. Lesouple J. et al. Generalized isolation forest for anomaly detection // Pattern Recognition Letters, 2021. Vol. 149. P. 109–119.
8. Shyu M.-L. et al. A Novel Anomaly Detection Scheme Based on Principal Component Classifier // Proceedings of International Conference on Data Mining, 2003.
9. Choi K. et al. Deep Learning for Anomaly Detection in Time-Series Data: Review, Analysis, and Guidelines // IEEE Access, 2021. Vol. 9. P. 120043–120065.
10. Audibert J. et al. USAD: UnSupervised Anomaly Detection on Multivariate Time Series // Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining: KDD '20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020. P. 3395–3404.

УДК 004.932

Анализ карты признаков YOLOv8 при детекции мелких деталей в системе визуального контроля

Мурин Я. С.
Казанский Федеральный Университет, Институт искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии
г. Казань
murin007@list.ru

Работа посвящена интеллектуальной системе визуального контроля на базе YOLOv8n для обнаружения крепежных элементов. Исследованы карты признаков P2-P5 и трекинг FRoG-MOT. Уровень P3 –единственный информативный для мелких деталей. Параметр MIN_HITS критически влияет на точность подсчета при высокоскоростном конвейере.
Ключевые слова: YOLOv8; карта признаков; мелкие объекты; FRoG-MOT; визуальный контроль.

Feature Map Analysis of YOLOv8 for Small Parts Detection in a Visual Inspection System

Murin Y. S.
Kazan Federal University, Institute of Artificial Intelligence, Robotics and System Engineering
Kazan
murin007@list.ru

The paper studies the intelligent visual control system system based on YOLOv8n for fastener detection. Feature maps at P2-P5 and FRoG-MOT tracking are analyzed. P3 is the only informative level for small parts. MIN_HITS critically affects counting accuracy at high conveyor speeds.
Keywords: YOLOv8; feature map; small object detection; FRoG-MOT; visual inspection.

Системы машинного зрения теряют точность на мелких объектах. Система обрабатывает поток 1280×720 при 30 FPS. Крепежный элемент занимает 400–900 пикселей –это категория «мелкого объекта» согласно условному стандарту MS COCO ($\leq 32^2$px).

Backbone YOLOv8n формирует карты признаков через блоки C2f с конкатенацией промежуточных состояний. Согласно табл. 1 на уровне P3 элемент занимает 2–3 активные ячейки. На P4 остается одна ячейка и структурные признаки теряются. На P5 сигнал сливается с фоном [1]. Шейный модуль FPN+PAN объединяет пространственные детали нижних уровней с семантикой верхних. Порог conf = 0,3 в screw_counting.json компенсирует слабый сигнал на P3, но повышает риск ложных срабатываний.

Детектированные крепежные элементы (класс 0) передаются в FRoG-MOT. Трекер ведет три предсказателя движения с $\alpha \in \{0{,}9;\ 0{,}7;\ 0{,}5\}$ [2] и активирует тот, у которого минимальная ошибка. Ассоциация треков выполняется венгерским

алгоритмом: при IoU > 0,3, иначе –комбинация IoU и расстояния центроидов. Зона подсчета 90px (7% кадра) при MIN_HITS = 3 дает задержку 100 мс. При скорости конвейера выше 0,5 м/с это приводит к пропускам.

Таблица 1. Уровни карты признаков YOLOv8n

Уровень / Разрешение	Страйд	Кодируемые данные
P2 / 160×160	/4	Текстуры, локальные паттерны
P3 / 80×80	/8	Форма головки, резьба шурупа
P4 / 40×40	/16	Силуэт объекта целиком
P5 / 20×20	/32	Глобальный контекст (SPPF)

Снижение MIN_HITS до 2 сокращает задержку до 67 мс. Расширение зоны подсчета с 7% до 15% снижает вероятность пропуска. Перспективно добавить детекционную голову на уровне –это позволит работать с объектами менее 16px без снижения порога уверенности.

Литература

1. Giri K.J. SO-YOLOv8: a novel deep learning-based approach for small object detection // Expert Systems with Applications, 2025. Vol. 280. DOI: 10.1016/j.eswa.2025.127447.
2. Ogawa T., Shibata T., Hosoi T. FRoG-MOT: Fast and Robust Generic Multiple-Object Tracking by IoU and Motion-State Associations // Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). IEEE, 2024. P. 6563–6572.

УДК 004.335

Разработка архитектуры синхронной бинарной двунаправленной ассоциативной памяти для распознавания образов в мультиагентных нейроморфных системах

Макаров И. И., Тельминов О. А.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
imakarov@niime.ru

Разработана архитектура устройства, обеспечивающего межмодальное взаимодействие в мультиагентных встраиваемых системах. На основе бинарной двунаправленной ассоциативной памяти реализована ассоциация визуальных и текстовых образов. Для построения аппаратной реализации предлагается использовать мемристорный кроссбар для хранения весов искусственных синапсов. Представленная архитектура позволяет легко масштабировать устройство за счет разбиения искусственных нейронов и синапсов на отдельные аппаратные блоки.
Ключевые слова: ассоциативная память; BAM; нейроморфные системы; мемристорный кроссбар; VHDL; RTL-моделирование.

Development of a synchronous binary bidirectional associative memory architecture for pattern recognition in multi-agent neuromorphic systems

Makarov I. I., Telminov O. A.
Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
imakarov@niime.ru

An architecture for a device enabling intermodal An architecture for a device enabling intermodal interaction in multi-agent embedded systems has been developed. Association of visual and textual images is implemented using binary bidirectional associative memory. A memristor crossbar is proposed for the hardware implementation to store the weights of artificial synapses. The presented architecture enables easy scalability of the device by partitioning the artificial neurons and synapses into separate hardware units. interaction in multi-agent embedded systems has been developed. Association of visual and textual images is implemented using binary bidirectional associative memory. A memristor crossbar is proposed for the hardware implementation to store the weights of artificial synapses. The presented architecture enables easy scalability of the device by partitioning the artificial neurons and synapses into separate hardware units.
Keywords: associative memory; BAM; neuromorphic systems; memristive crossbar; VHDL; RTL-modelling.

Ассоциативная память может решить проблему с быстродействием при общении процессора и ЗУ фон-неймановской архитектуры [1–3]. Помимо этого, нейроморфные системы позволяют реализовать и контентную адресацию, и восстановление

данных по неполным или искаженным входам, сохраняя притом сравнительно низкое потребление энергии [4].

Рассматривается разработка и моделирование мультимодальной ассоциативной памяти на базе двунаправленной АП (BAM) средствами языка VHDL и последующей интеграции с мемристорными структурами.

Авторы предлагают вариант параметризуемой RTL-модели устройства ДАП с масштабируемой архитектурой. В ходе работы реализована дискретная модель биполярных нейронов (состояния «-1», «+1»). Устройство проектировалось с расчетом на совместимость с мемристорными кроссбарами для хранения весов сети.

Сама же сеть работает по принципу прямого метода Ляпунова, таким образом сеть работает итеративно до сходимости. Математически функционирование можно описать так:

$$\begin{cases} y = sign(W \cdot x) \\ x = sign(W^T \cdot y) \end{cases},$$

где x, y — ассоциированные образы, W — матрица весов [5].

Предложенная модель может быть отображена как на мемристорные кроссбар-структуры, так и на аналого-цифровые интерфейсы. Основные результаты на текущий момент:

- разработана полностью параметризуемая модель BAM;
- подтверждена корректность ассоциативного восстановления;
- обеспечена масштабируемость архитектуры;
- произведен синтез структурной схемы устройства по RTL-описанию.

Предложенная архитектура пригодна для интеграции с нейроморфным аппаратным обеспечением и может быть использована как основа для дальнейших исследований в области мультиагентных систем и вычислений на основе мемристорных структур [6].

Литература

1. Simas, Rodrigo. Classification and generation of real-world data with an associative memory model / Rodrigo Simas, Luis Sa-Couto, Andreas Wichert // Neurocomputing, 2023. Vol. 551. P. 126514.
2. Associative memory realized by a reconfigurable memristive Hopfield neural network / SG Hu, Y Liu, Z Liu et al. // Nature communications, 2015. Vol. 6. № 1. P. 7522.
3. An analog-AI chip for energy-efficient speech recognition and transcription / Stefano Ambrogio, Pritish Narayanan, Atsuya Okazaki et al. // Nature, 2023. Vol. 620. № 7975. P. 768–775.
4. Krotov, Dmitry. Dense associative memory for pattern recognition / Dmitry Krotov, John J Hopfield // Advances in neural information processing systems, 2016. Vol. 29.
5. Kosko, Bart. Bidirectional associative memories: unsupervised Hebbian learning to bidirectional backpropagation / Bart Kosko // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021. Vol. 51. № 1. P. 103–115.
6. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологий и микроэлектроника. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020.

УДК 004.932.2

Повышение производительности разработки датасетов обучения и валидации моделей детекции объектов на видео для создания безопасной городской среды

Убушаева Я. А.
Научно-технологический университет «Сириус»
354340, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр-т, 1

В работе решается задача ускорения ручной разметки видеонаблюдения за счет автоматической предразметки объектов на кадрах и последующей корректировки аннотаций разметчиками в CVAT. Цель — повысить качество и производительность разметки для доменных классов (люди, транспорт и специализированные категории заказчика) по сравнению с использованием предобученной детекции без дообучения на целевых данных.
Ключевые слова: предобученные модели; умный город; разметка.

Improving the productivity of developing training datasets and validating object detection models in videos to create a safe urban environment.

Ubushaeva Y. A.
Sirius University of Science and Technology
1 Olimpiysky Ave., Federal Territory of Sirius, Krasnodar Krai, 354340, Russia

The work addresses the task of accelerating manual video surveillance annotation by automatically pre-labeling objects in frames and subsequently adjusting the annotations by annotators in CVAT. The goal is to improve the quality and productivity of annotation for domain classes (people, transport, and the customer's specialized categories) compared to using pre-trained detection without fine-tuning on target data.
Keywords: pre-trained models; smart city; annotation.

Предлагается каскадная схема формирования датасета, в которой первый этап предусматривает автоматическую предразметку кадров предобученной моделью детекции для грубых классов объектов. На этом этапе формируются bounding box-ы людей и транспортных средств, а также базовые маски или треки, которые затем передаются разметчикам для детального присвоения ситуационных меток. Второй этап включает ручную доразметку сложных классов, описывающих взаимодействия и поведение (драка, курение, инвалидность, нанесение граффити, спецтехника и т. п.), на основе уже подготовленных областей интереса. Такой подход позволяет встроить предобученную модель в конвейер работы с видеоданными без изменения существующего инструментария разметки, превращая ее в интеллектуальный фильтр и ускоритель. Кроме того, архитектура решения допускает замену или дообучение предобученных моделей без пересмотра общей методики формирования датасета.

Экспериментальные оценки показывают, что применение автоматической предразметки позволяет сократить время ручной разметки до 80 % за счет

уменьшения числа элементарных операций по выделению объектов. В типичном сценарии разметчик, который вручную успевает разметить несколько базовых классов на сотнях кадров за фиксированное время, при использовании предразметки может в том же интервале сфокусироваться на уточнении более широкого набора сложных классов и ситуаций. Это повышает итоговую выработку по числу размеченных экземпляров, не снижая, а зачастую и повышая согласованность разметки между исполнителями. Дополнительно рассматриваются вопросы интеграции данного подхода в существующие пайплайны подготовки данных и возможные метрики оценки качества предразметки. Такой подход соответственно создает основу до надежных масштабируемых систем в инфраструктуре городского наблюдения для создания безопасной среды.

Литература

1. Бесшапошников Н. О., Кузьменко М. А., Леонов А. Г., Матюшин М. А. Автоматизация разметки набора данных для нейронных сетей // Вестник кибернетики, 2018. — Т. 32. — № 4. — С. 204–210.
2. Гилязев Р. А., Турдаков Д. Ю. Активное обучение и краудсорсинг: обзор методов оптимизации разметки данных // Труды Института системного программирования РАН, 2018. — Т. 30. — № 2. — С. 93–120.

УДК 621.382; 004.383.8.032.6; 519.6

Разработка функциональных блоков мемристорных массивов для САПР биоморфного нейропроцессора

Николаева Е. А.[2,3], Писарев А. Д.[1,3]
[1] Тюменский индустриальный университет
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38
[2] ООО «НОВАТЭК НТЦ»
625031, г. Тюмень, ул. Пожарных и Спасателей, 7
[3] Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
evn.72@yandex.ru

На стандартных языках FBD диаграмм функциональных блоков и LD релейных диаграмм запрограммирована работа мемристорных массивов. Предложена методология интеграции FBD/LD в САПР как мост от программной искусственной нейронной сети к аппаратной ее реализации на основе биоморфного нейропроцессора.
Ключевые слова: САПР; биоморфный нейропроцессор; мемристор; искусственный интеллект.

Development of functional blocks of memristor arrays for the CAD of a biomorphic neuroprocessor

Nikolaeva E. A.[2,3], Pisarev A. D.[1,3]
[1] Tyumen Industrial University
38 Volodarsky St., Tyumen, 625000, Russia
[2] ООО «НОВАТЭК НТЦ»
7 Firefighters and Rescuers St., Tyumen, 625031, Russia
[3] Tyumen State University
68 Volodarsky St., Tyumen, 625003, Russia
evn.72@yandex.ru

The operation of memristor arrays is programmed using the standard FBD diagramming languages for functional block diagrams and LD relay diagrams. A methodology for integrating FBD/LD into CAD is proposed as a bridge from a software artificial neural network to its hardware implementation based on a biomorphic neuroprocessor.
Keywords: CAD; biomorphic neuroprocessor; memristor; artificial intelligence.

В настоящее время исследования мемристоров в составе биоморфных схем открывают новые широкие перспективы для микро- и наноэлектроники по созданию энергоэффективного и высокопроизводительного нейропроцессора, предназначенного для реализации алгоритмов биологически правдоподобных искусственных нейронных сетей (ИНС) с возможностью ассоциативного самообучения [1]. Мемристоры все чаще внедряют в инженерию и моделирование синаптических связей между искусственными электронными нейронами [2], либо часть нейронных функций реализуется за счет процессов в мемристорах. Мемристорное направление в нейроморфной электронике позволяет кардинально упростить схемотехнику

искусственных нейронов и дает возможность физически проектировать сложные биоморфные процессы ассоциативного самообучения в ИНС с помощью мемристорных, транзисторных, процессорных, функциональных и логических блоков с реализацией высокопроизводительных вычислений непосредственно в памяти на основе мемристорной ЭКБ.

Проблема повышения надежности работы мемристора и схем на его основе постепенно решается успехами в мемристивном материаловедении и путем разработок новых алгоритмов работы и обучения. Авторы статьи [3] сообщают о принципиальном решении проблемы связанной со стохастическим характером работы мемристорной ИНС путем вероятностного обучения EaPU, что обеспечивает повышение точности более чем на 60 % и снижает энергию обучения в миллион раз по сравнению с ИНС на графических процессорах (GPU). В связи со значительными достижениями в этой области актуальной задачей становится разработка специализированной системы автоматизированного проектирования (САПР) для синтеза биоморфного ИИ на базе мемристорных массивов, работающих в импульсном режиме. В настоящей работе авторы сообщают о разработке новых функциональных блоков на основе мемристорных кроссбаров нескольких размерностей с селективными диодными элементами, рассматривая их как последовательностный логический конечный автомат с энергонезависимой памятью, предназначенных для САПР биоморфного нейропроцессора –аппаратного носителя искусственного интеллекта (ИИ).

Для создания функциональных блоков мемристорных массивов в работе использованы стандартные языки МЭК 61131-3 (LD/FBD). Это решение снижает порог входа в нейроморфный «hardware» на мемристорах для разработчиков ИИ, использующих, в настоящее время, например, Python/TensorFlow или другие исключительно программные инструменты. Визуальные модули FBD мемристорных кроссбаров и LD сетей выглядят нагляднее, делая исследование ИНС таким же интуитивным, как в стандартной среде Python. С другой стороны, графические LD/FBD хорошо совместимы с LTSpice, сочетаются с физическими, с поведенческими моделями мемристоров и алгоритмами эмуляторов мемристоров для искусственных нейронов. Кроме этого САПР, работающий со стандартными языками LD/FBD, автоматизировано может выполнить перенос проекта на Verilog с использованием PDK конкретной фабрики для мемристорных интегральных схем и КМОП-технологий.

Таким образом, успех в разработке нового поколения интегральных схем с адаптивной памятью зависит не только от внедрения современных КМОП-технологий и использования мемристоров, но и от создания специализированного математического и программного обеспечения САПР, которое учитывает специфику данной области. Сейчас уже существуют наработки маршрута для проектирования биполярных мемристоров на языке Verilog-A [4]. Комплексный подход позволяет обеспечить эффективную автоматизацию проектирования, моделирования и аппаратной реализации нейроморфных и адаптивных вычислительных систем на базе мемристорных массивов.

Литература

1. Писарев А. Д., Удовиченко С. Ю. Биоморфный нейропроцессор на основе наноразмерного комбинированного мемристорно-диодного кроссбара. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — 228 с.
2. Суражевский И. А., Рыльков В. В., Демин В. А. Компактная поведенческая модель нанокомпозитного мемристора //Радиотехника и электроника, 2023. — Т. 68. — № 11. — С. 1140–1146.
3. Liu Jinchang, Lu Jian, Tang Shuangzhu, Zhou Ruixi, Ma Huiqin, Lyu Bo, Tian Yang, Shi Tuo, Liu Qi. Error-aware probabilistic training for memristive neural networks. Nature Communications. 16. (2025).
4. Teplov G. S., Gornev E. S. Multilevel bipolar memristor model considering deviations of switching parameters in the Verilog-A language // Russian Microelectronics, 2019. Vol. 48. № 3. P. 131–142.

УДК 537.9

Термическая стабильность мемристивных структур M/НК/Д1/Д2/M

Шакуров А. Р.[1,2],Ситников А. В.[1,2], д. ф.-м. н., Бабкина И. В.[1], к. ф.-м. н., Никонов А. Е.[1,2], к. ф.-м. н.
[1] Воронежский государственный технический университет
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
Aleks.shakurov@mail.ru
[2] НИЦ «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Исследовано влияние термической обработки до 500 °C на комплекс основных мемристивных и селекторных свойств структур конденсаторного типа нанокомпозит — диэлектрик с добавлением туннельно-прозрачных диэлектрических прослоек Ta_2O_5 и a-Si
Ключевые слова: Мемристор; нанокомпозит; ReRam; резистивное переключение

Thermal stability of memristive structures M/NC/D1/D2/M

Shakurov A. R.[1,2], Sitnikov A. V.[1,2], Ph.D, Babkina I. V.[1], Ph.D, Nikonov A. E.[1,2], Ph.D
[1] Voronezh State Technical University
84 20 letiya Oktyabrya St., Voronezh, 123182, Russia,
Aleks.shakurov@mail.ru
[2] NRC «Kurchatov Institute»
1, Akademika Kurchatova Sq., Moscow, 123182, Russia

The effect of heat treatment up to 500 °C on the complex of basic memristive and selector properties of nanocomposite-dielectric capacitor-type structures with the addition of tunnel-transparent dielectric layers Ta_2O_5 and a-Si has been studied.
Keywords: Memristors; nanocomposites; ReRam; resitive switching

Для практического применения мемристивные функциональные элементы объединяют в большие массивы в конфигурации перекрестной матрицы (кроссбар структуры), что позволяет достичь максимально возможной эффективности использования пространства и плотности хранения данных. Однако наличие токов утечки является серьезной проблемой в таких конфигурациях. В настоящее время разрабатываются два подхода решающие данную проблему. Наиболее распространенным способом является объединение мемристоров с МОП-транзисторами (1T1R). Другой путь — это использование элемента селектора последовательно включенном с мемристивным элементом (1S1R). Наиболее интересны в плане практического применения самокорректирующихся устройств, когда функция нелинейности мемристора определяется его внутренним устройством. При этом перспективным подходом для реализации таких элементов является использование структур, где одним из электродов мемристора выступает нанокомпозит. Вместе с тем, в связи с технологическими особенностями процессов формирования современных полупроводниковых приборов, важным направлением исследований

является обеспечение стабильности мемристивных и селекторных свойств синтезируемых структур в процессе термической обработки.

В работе исследована термическая устойчивость при отжигах до 500 °C мемристивных и селекторных свойства структур металл/нанокомпозит/диэлектрик1/диэлектрик2/металл (M/НК/Д1/Д2/M): $Cu/(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{33,4}(SiO_2)_{66,6}/LiNbO_3/Si/Cr/Cu/Cr$/ситалл, $Cu/(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{33,4}(SiO_2)_{66,6}/LiNbO_3/Ta_2O_5/Cr/Cu/Cr$/ситалл, $Cu/(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{33,4}(SiO_2)_{66,6}/ZrYO_2/Si/Cr/Cu/Cr$/ситалл, $Cu/(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{33,4}(SiO_2)_{66,6}/ZrYO_2/Ta_2O_5/Cr/Cu/Cr$/ситалл, $Cu/CoFe\text{-}SiO_2/ZrYO_2/Ta_2O_5/Cr/Cu/Cr$ и $Cu/(Co)_{33,4}(SiO_2)_{66,6}/ZrYO_2/Ta_2O_5/Cr/Cu/Cr$/ситалл. Образцы получены методом ионно-лучевого распыления с использованием теневых масок.

Проведение данных исследований показало, что мемристивная структура (CoFeB)(SiO)/LiNbO/Si обладает биполярным резистивным переключением с отношением Roff/Ron≈7, значениями I(U)/I(U/2) порядка 38 единиц при отжигах в 250 °C, удовлетворительной временной стабильностью и пластичностью индуцированных резистивных состояний. Наблюдается увеличение циклической выносливости исследуемой структуры с отжигами, но даже при оптимальной термообработке 350 °C она составляет порядка 9000 циклов обратимого резистивного переключения. В структуре $(CoFeB)(SiO_2/LiNbO_3/Ta_2O_5$ в диапазоне температур от 250 °C до 400 °C удается провести формование образцов с I(U)/I(U/2) порядка 64 единицы при отношении Roff/Ron = 300. Оптимальным для данной структуры является отжиг 300 °C — при этом наблюдается хорошая временная стабильность резистивных состояний, пластичность структуры, количество циклов переключений более 10^4. Для структурах $CoFeB\text{-}SiO_2/ZrYO_2/Ta_2O_5$ и $(Co)(SiO_2)/ZrYO2$/ установлено, что отжиг при 250 °C улучшает диэлектрические свойства прослойки Ta_2O_5, увеличивая циклическую выносливость до значений более 10^4 раз, уменьшает величину токов утечки в низкоомном резистивном состоянии при низких значениях тока измерения и повышает значения отношения I(U)/I(U/2) в данных структурах до 150 и 50 единиц соответственно. В структурах $CoFe\text{-}SiO_2/ZrYO_2/Ta_2O_5$ биполярное резистивное переключение возможно сформировать только при их термической обработке в диапазоне температур от 250 до 350 °C. При этом наблюдаются отношение Roff/Ron больше 60 и значения I(U)/I(U/2) порядка 15. В структурах $CoFeB\text{-}SiO_2/ZrYO_2$ биполярное резистивное переключение в образце проявляется при токах формовки не менее 0,08 А. Оптимальной температурой отжига для увеличения нелинейности низкоомной ветви ВАХ составляет 200–250 °C. При этом отношение I(U)/I(U/2) достигает 25 единиц при напряжении считывания 3,5 В. При этом повышение температуры отжига от 200 до 400 °C понижает циклическую выносливость исследуемых мемристивных структур, что по всей видимости связано с изменениями в прослойки α-Si.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда в рамках проекта № 25-29-00215.

УДК 004.932

Сегментация и классификация дефектов на кремниевых пластинах с использованием глубокого обучения

Титов А. Е., Жевненко Д. А., Мещанинов Ф. П.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Модель, обученная на открытом датасете WM-811K, достигла точности восстановления карты по признаковому описанию с помощью автоэнкодера 0,976 IoU против 0,659 IoU в исследовании 2025 года по этой же теме. Благодаря использованию трансформера точность классификации достигла F1-score 0,989.
Ключевые слова: кремниевые пластины; интегральная схема; сегментация дефектов; глубокое обучение; дефекты пластины; контроль качества; сегментация изображений; автоэнкодер; трансформер; механизм внимания.

Deep learning driven silicon wafer defect segmentation and classification

Titov A. E., Jevnenko D. A., Meschaninov F. P.
Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

The model, trained on the open WM-811K dataset, achieved a map reconstruction accuracy of 0.976 IoU (Intersection over Union — the ratio of the intersection of the predicted and real bound-box to their union in the sense of pixel sets) using an autoencoder, compared to 0.659 IoU in a 2025 study on the same topic. By using a transformer, the classification accuracy reached an F1-score of 0.989.
Keywords: silicon wafers; integrated circuit; defect segmentation; deep learning; wafer defects; quality management; image segmentation; autoencoder; transformer; attention mechanism.

На кремниевых пластинах могут появляться дефекты, обнаружение которых требует баланса между скоростью работы и точностью. Модели с большим количеством параметров обеспечивают высокую точность при значительных временных затратах, тогда как модели с малым числом параметров могут иметь более низкие показатели точности.

Мы предлагаем модель, сочетающую визуальный трансформер и автоэнкодер. Архитектура трансформера на базе механизма внимания обеспечивает целевые показатели точности при ограниченном количестве параметров, а сверточная сеть формирует признаковое описание пластины.

Отслеживание дефектов на кремниевых пластинах является этапом производства полупроводниковых компонентов (2). Наличие дефектов в партии ведет к финансовым издержкам. Существующие подходы к детекции и классификации дефектов характеризуются либо высокой точностью при значительных временных затратах на обработку (3), либо высокой скоростью работы при сниженной точности(4). Задачей данного исследования является повышение качества предсказания, используя легкую модель.

Мы предлагаем модель, предназначенную для извлечения признаковых описаний из изображений пластин и классификации дефектов в условиях дисбаланса классов. Автоэнкодер формирует карты признаков и сохраняет информацию о локальной структуре пластины (рис. 1); трансформер сопоставляет полученные признаки с типами дефектов и определяет вид неисправности (рис. 2). Сочетание сверточных слоев для обработки изображений и трансформера для связки признаков с выходом позволяет классифицировать неполадки на производстве с низкой задержкой. IoU((Intersection over Union — отношение пересечения предсказанных и реальных прямоугольных границ объекта к их объединению) автоэнкодера на используемом наборе данных — 0,976, F1-score классификации — 0,989.

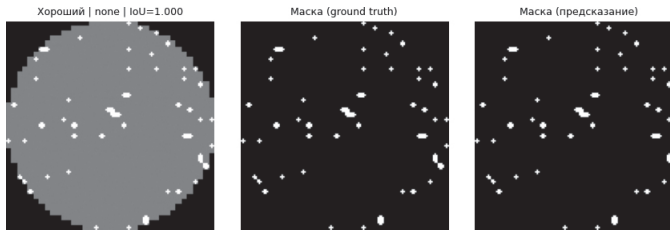


Рис. 1. Пример работы автоэнкодера. Слева –исходное изображение пластины, по центру – истинная карта дефектов, справа –карта, восстановленная автоэнкодером.

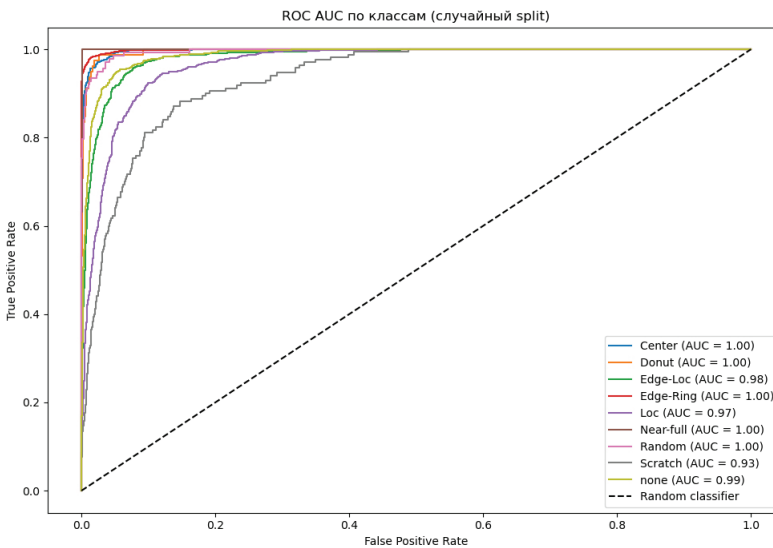


Рис. 2. ROC-AUC классификатора

Литература

1. Semiconductor SEM Image Defect Classification Using Supervised and Semi-Supervised Learning with Vision Transformers / C.-F. Huang, K. Sieg, L. Karlinksy, N. Flores, R. Sheraw, X. Zhang // 36th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC). Albany, NY, USA, 2025. P. 1–6. DOI:10.1109/ASMC64512.2025.11010396.
2. A Comparative Analysis of Semiconductor Wafer Map Defect Detection with Image Transformer / S. Nath // arXiv:2512.11977 [cs.CV], 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2512.11977.
3. A Deep Convolutional Neural Network-Based Multi-Class Image Classification for Automatic Wafer Map Failure Recognition in Semiconductor Manufacturing / Zheng H., Sherazi S., Son S., Lee J. // 2021. DOI: 10.3390. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/20/9769.
4. Wafer map defect patterns classification based on a lightweight network and data augmentation / Yu N., Chen H., Xu Q., Hasan M. // 2022. DOI: 10.1049/cit2.12126. URL: https://www.researchgate.net/publication/362109883_Wafer_map_defect_patterns_classification_based_on_a_lightweight_network_and_data_augmentation.

УДК 004.896:621.3.049.77

Применение semi-supervised learning на базе Tiny Vision Transformer для классификации дефектов на полупроводниковых пластинах

Помазков М. А., Мещанинов Ф. П., Жевненко Д. А., Горнев Е. С.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

При классификации дефектов на пластинах нехватка размеченных данных и дисбаланс классов представляют собой серьезные проблемы, особенно для CNN-моделей. Мы предлагаем semi-supervised подход с EMA Teacher на базе двух ViT-Tiny, эффективно использующий неразмеченные данные. На датасете WM-38k средняя метрика F1 нашей модели превышает 0,97.
Ключевые слова: дефекты полупроводниковых пластин; классификация изображений; Vision Transformer; ViT-Tiny; semi-supervised learning; учитель–ученик; pseudo-labeling; глубокое обучение.

Application of Semi-Supervised Learning Based on Tiny Vision Transformer for Classification of Defects on Semiconductor Wafers

Pomazkov M. A., Meshchaninov F. P., Zhevnenko D. A., Gornev E. S.
Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

In the classification of defects on wafers, the lack of labeled data and class imbalance represent serious problems, especially for CNN-based models. We propose a semi-supervised approach with an EMA teacher based on two ViT-Tiny models, which effectively utilizes unlabeled data. On the WM-38k dataset, the average F1-score of our model exceeds 0.97.
Keywords: semiconductor wafer defects; image classification; Vision Transformer; ViT-Tiny; semi-supervised learning; Teacher–Student; pseudo-labeling; deep learning.

Автоматическая классификация дефектов полупроводников пластин существенно ускоряет и удешевляет процесс их производства. В то же время ручная разметка большого количества данных, необходимых для традиционных методов машинного обучения, крайне трудозатратна. При применении моделей на основе сверточных нейронных сетей (CNN) существенной проблемой становится дисбаланс классов [1, 3].

Мы предлагаем использовать ViT-Tiny (легкие версии визуальных трансформеров) в качестве моделей учитель и ученик в рамках метода EMA Teacher (Exponential Moving Average Teacher) [2]. Этот метод позволяет при сравнительно небольшом количестве размеченных данных достигать высокой точности предсказания даже при наличия сильного дисбаланса классов. Эксперимент, проведенный на датасете WM-38k показал, что предлагаемое решение может выдавать метрику F1 не менее 0,97, что сравнимо с передовыми моделями в этой области. Пайплайн обучения нашей модели представлены на рис. 1.

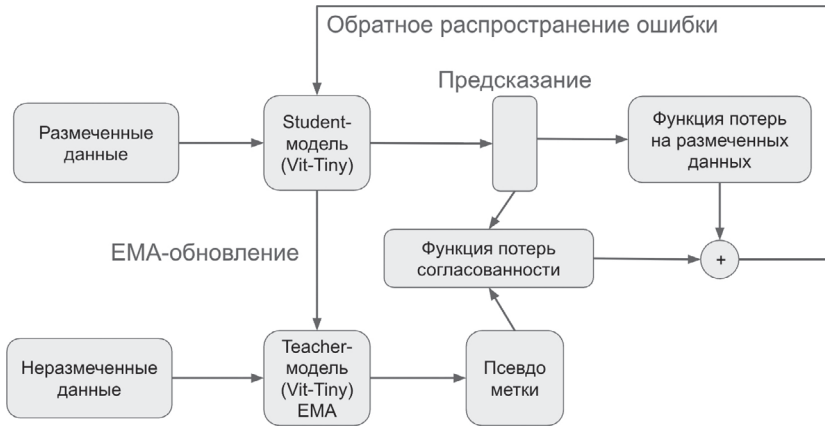


Рис. 1. Пайплайн обучения предлагаемой модели: размеченные данные используются для подсчета первой функции потерь; Teacher-модель генерирует псевдометки для неразмеченных данных, которые используются для вычисления функции потерь согласованности; веса Student-модели обновляются градиентным спуском по сумме двух функций потерь, веса Teacher-модели — с помощью EMA-обновления по параметрам Student-модели

Литература

1. Semiconductor SEM Image Defect Classification Using Supervised and Semi-Supervised Learning with Vision Transformers / C.-F. Huang, K. Sieg, L. Karlinksy, N. Flores, R. Sheraw, X. Zhang // 36th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC). Albany, NY, USA, 2025. P. 1–6. DOI: 10.1109/ASMC64512.2025.11010396.
2. Utilizing the Mean Teacher with Supcontrast Loss for Wafer Pattern Recognition / Q. Wei, X. Xu, Z. Zeng, X. Yang // arXiv:2411.18533 [cs.CV], 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2411.18533.
3. Semiconductor Wafer Map Defect Classification with Tiny Vision Transformers / F. Mohammad, D. Ryu // arXiv:2504.02494 [cs.CV], 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2504.02494.

УДК 004.272.3

Ускорение моделирования производительности вычислительных систем с сохранением точности

Шибина П. С.[1,2], Королев К. А.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
shibina.ps@phystech.edu
[2] ПАО «Сбербанк»
121170, г. Москва, ул. Поклонная, 3, корп. 1, 1 этаж, пом. 3
KAleksKorolev@sberbank.ru

Предложены методы ускорения симуляции нейросетей без потери точности: параллельное исполнение интервалов инструкций и моделирование уникальных блоков трансформеров. Получено ускорение до шесть раз при ошибке 0,02 % и три раза при 0,3 %. Методы позволяют существенно сократить время оценки производительности сложных гетерогенных архитектур.
Ключевые слова: моделирование; симулятор производительности; сохранение точности; нейронная сеть; гетерогенная архитектура.

Accelerating Performance Modeling of Computational Systems While Preserving Accuracy\

Shibina P. S.[1,2], Korolev K. A.[2]
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
shibina.ps@phystech.edu
[2] PJSC Sberbank
3 Poklonnaya St., Bldg. 1, 1st Floor, Office 3, Moscow, 121170, Russia
KAleksKorolev@sberbank.ru

We propose methods for accelerating neural network simulation without accuracy loss: parallel execution of instruction intervals and modeling of unique transformer blocks. Speedups of up to 6× with 0.02 % error and 3× with 0.3 % error are achieved. The methods significantly reduce the time required for performance evaluation of complex heterogeneous architectures.
Keywords: performance modeling; performance simulator; accuracy preservation; neural networks; heterogeneous architectures.

Современный этап развития вычислительной техники характеризуется устойчивым переходом от гомогенных архитектур к сложным гетерогенным системам [1], объединяющим многоядерные CPU и графические ускорители (GPU). Проектирование современных высокопроизводительных вычислительных систем невозможно без этапа предварительной архитектурной оценки. Для корректного выбора решений до выпуска кремниевого прототипа критически важно использовать инструменты моделирования, позволяющие прогнозировать поведение будущего

устройства на ранних стадиях разработки. При этом архитектура нейронных сетей принципиально отличается от классических вычислительных задач для процессоров общего назначения. Их внутренняя структура предъявляет новые требования к аппаратному обеспечению. Это вызывает необходимость перехода к специализированным ускорителям, требующим разработки новых подходов к моделированию, адаптированных под специфику подобных нагрузок.

В рамках данной работы под симулятором понимается компьютерная программа, способная имитировать работу некоторой вычислительной системы. В зависимости от решаемых задач выделяют два основных класса: симулятор производительности — это микроархитектурный симулятор, который моделирует время выполнения каждой инструкции в программе [2], и функциональный симулятор, который предназначен для тестирования логики работы программы, где скорость моделирования не обязательно должна соответствовать реальному времени работы процессора [3]. Под гетерогенной вычислительной системой понимается вычислительная система, построенная на базе архитектуры, объединяющей разнородные вычислительные узлы, взаимодействующие посредством единой системы межсоединений и управляемые общей программно-аппаратной моделью.

Ключевым ограничением современных инструментов моделирования производительности является разрыв между временем выполнения задач на реальном оборудовании и на детальных симуляторах производительности. Если современные вычислительные ускорители демонстрируют производительность порядка триллионов инструкций в секунду (TIPS), то симуляторы производительности обрабатывают от единиц до нескольких сотен тысяч инструкций в секунду. Этот разрыв в несколько порядков означает, что моделирование медленнее на несколько часов или даже суток, чем исполнение на реальном ускорителе [4]. В связи с этим большой интерес представляет исследование ускорения процесса моделирования исполнения нейронных сетей на гетерогенных платформах с сохранением точности.

Исследования с ускорением моделирования нейронных сетей уже проводились ранее. Например, в статье [5] рассмотрен метод кластеризации инструкций с последующей экстраполяцией результатов, а в источнике [4] описан подход оценки производительности в ходе симуляции сгруппированной выборки задач. Однако эти работы были сфокусированы на моделировании однородных архитектур (изолированных ускорителей или GPU) и не учитывали накладные расходы на передачу данных и синхронизацию, присущие гетерогенным системам. В данной статье мы исследуем новые методы ускорения моделирования нейронных сетей с учетом специфики гетерогенного взаимодействия. В качестве первого решения рассматривается разбиение исходной большой программы на непрерывные интервалы инструкций и ускорение исполнения за счет распараллеливания интервалов между разнородными вычислительными узлами. Второй метод применим для сетей-трансформеров –архитектуры с высокой повторяемостью интервалов инструкций. В этом случае моделирование можно ускорить, исполняя только уникальные интервалы, что позволяет избежать дублирования вычислений при прохождении данных через гетерогенную среду.

Рассмотрим первый метод ускорения моделирования нейронных сетей –параллельное исполнение интервалов. Основной задачей являлось разделение исходной сети на интервалы. Мы использовали промежуточное представление сети без

условных переходов или циклов. Атомарным блоком инструкций будем называть участок программы, в конце которого все промежуточные результаты вычислены и сохранены в памяти устройства. Интервал –это непрерывный участок исходной программы, включающий в себя целое число атомарных блоков инструкций.

Разделив нейронную сеть на интервалы, мы произвели их моделирование. Каждый интервал исполнялся следующим образом: код от начала программы до начала интервала моделировался на функциональном симуляторе. Далее архитектурное состояние системы на момент начала целевого интервала переносилось из функционального симулятора на симулятор производительности, в конце целевой интервал исполнялся на симуляторе производительности.

Рассмотрим результаты применения первого метода ускорения. При разбиении исходной сети на интервалы, каждый из которых исполнялся на своем вычислительном потоке, мы увидели, что при увеличении числа разнородных вычислительных узлов исполнения ускорение исполнения также увеличилось от 1,5 до шесть раз. При этом ошибка моделируемого времени исполнения интервалов относительно сети целиком составила в среднем 0,02 %. Результаты представлены на рис. 1:

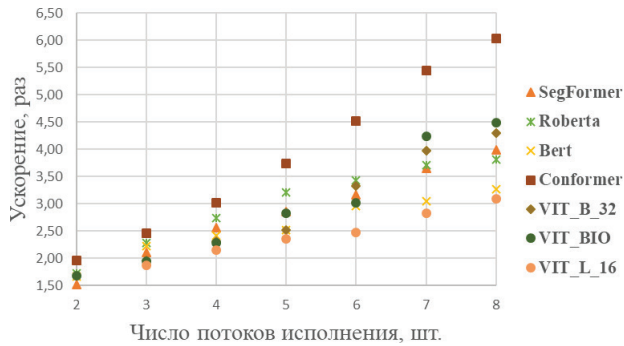


Рис. 1. График зависимости ускорения при параллельном запуске интервалов от числа потоков исполнения

Далее перейдем к рассмотрению второго метода ускорения моделирования, который применим к нейронным сетям-трансформерам. Так как представители этого типа архитектуры нейронных сетей обладают высокой повторяемостью интервалов инструкций, то в первую очередь было необходимо статически выделить одинаковые интервалы и оценить их количество. Поэтому нами был разработан инструмент, который по промежуточному представлению сети определял повторяющиеся блоки инструкций. Благодаря этому мы выяснили, что рассматриваемые сети можно разделить на три уникальных интервала: первый –входной интервал с инициализацией; второй –основное тело сети, состоящее из большого числа повторяющихся блоков инструкций; третий –заключительный интервал. Для сетей-трансформеров были произведены запуски уникальных интервалов последовательно в одном потоке, при этом из основного тела сети был запущен только 1 интервал, который являлся представителем повторяющихся интервалов инструкций.

В результате применения второго метода ускорения ошибка моделируемого времени исполнения интервалов относительно сети целиком составила в среднем 0,3 %, а ускорение – в три раза. Результаты представлены на графике ниже:

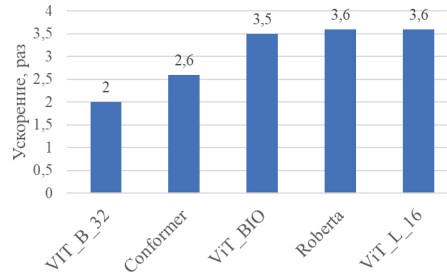


Рис. 2. График зависимости ускорения при запуске трех уникальных интервалов для сетей-трансформеров

Литература

1. Zahran, M. Heterogeneous Computing: Here to Stay / M. Zahran // Communications of the ACM, 2017. Vol. 60. № 3. P. 42–45.
2. Butko, A. Accuracy evaluation of GEM5 simulator system / A. Butko et al. // 2012 8th International Workshop on Reconfigurable and Communication-Centric Systems on-Chip (ReCoSoC), 2012. P. 1–8.
3. University of Cambridge, Computer Laboratory. ECAD and Architecture Practical Classes — Tutorial 5: RISC-V, 2025. Accessed: 27.02.2026. https://www.cl. cam.ac.uk/teaching/2526/ECAD+Arch/riscvtutorial.html.
4. Avalos Baddouh C. et al. Principal Kernel Analysis: A Tractable Methodology to Simulate Scaled GPU Workloads // *54th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO)*, 2021. P. 724–737. DOI: 10.1145/3466752.3480100.
5. Naderan-Tahan M., SeyyedAghaei H., Eeckhout L. Sieve: Stratified GPU-Compute Workload Sampling // 2023 IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS), 2023. P. 224–234. DOI: 10.1109/ISPASS57527.2023.00030.

УДК 681.3

Портирование RISC-V микроконтроллеров в операционную систему RIOT

Дубленский Д. С., Сатина А. П., Подшивалов А. А., Попов Д. А., к. т. н., Семион А. А., к. т. н.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
dsdublenskiy@edu.hse.ru

В работе проведен обзор решений в контексте операционной системы RIOT при применении вычислительного устройства на основе архитектуры RISC-V. Реализуется портирование программных инструментов отечественного RISC-V микроконтроллера К1921ВГ015 в операционную систему RIOT, в частности реализуется архитектура подсистемы управления прерываниями, а также разрабатывается поддержка управления GPIO, таймеров и интерфейсов.
Ключевые слова: RISC-V; RIOT; К1921ВГ015; IoT; Микроконтроллер.

Porting RISC-V Microcontrollers to the RIOT Operating System

Dublensky D. S., Satina A. P., Podshivalov A. A., Popov D. A., Ph.D, Semion A. A., Ph.D
National Research University Higher School of Economics (Moscow Institute of Electronics and Mathematics)
34 Tallinskaya St., 123458, Moscow
dsdublenskiy@edu.hse.ru

This paper reviews solutions within the RIOT operating system for computing devices based on the RISC-V architecture. It addresses the porting of software components for the domestic RISC-V microcontroller K1921VG015 to RIOT OS. In particular, the architecture of the interrupt handling subsystem is implemented, and support for GPIO control, timers, and communication interfaces is developed.
Keywords: RISC-V; RIOT; K1921ВГ015; IoT; Microcontroller.

Для ресурсно-ограниченных устройств Интернета вещей критически важны малое потребление памяти и планирование задач в реальном времени [1]. Этим требованиям удовлетворяет ОС RIOT, ядро которой способно работать в объемах от 2,8 КБ ОЗУ и 3,2 КБ ПЗУ. Однако наиболее объемный сценарий может потребовать 29,1 КБ ОЗУ и 166,2 КБ ПЗУ. [2].

Аппаратной основой для подобных решений часто служит архитектура RISC-V [3–6]. Специфика ее применения с RIOT, включая организацию прерываний через контроллеры CLINT и CLIC, рассмотрена в работе [7, 8].

В данном исследовании проводится сравнение RISC-V поддерживаемых в RIOT микроконтроллеров, а также перспективных для операционных систем отечественных микроконтроллеров по объему памяти и типу контроллера прерываний. Итого в исследовании участвуют:

- ESP32-C3 [9], контроллер прерываний –Espressif Matrix, ОЗУ –400 КБ, ПЗУ –384 КБ;

- GD32VF103 [10], контроллер прерываний –ECLIC, ОЗУ –32 КБ, ПЗУ –128 КБ;
- FE310 [11], контроллер прерываний –CLINT, PLIC, ОЗУ –64 КБ, ПЗУ –отсутствует;
- К1921ВГ015 [12], контроллер прерываний –CLINT, PLIC, ОЗУ –256 КБ, ПЗУ –1024 КБ;
- МІК32 АМУР [13], контроллер прерываний –EPIC, ОЗУ –16 КБ, ПЗУ –8 КБ.

В рамках архитектуры RISC-V наблюдаются случаи применения как стандартных контроллеров прерываний, так и фирменных решений, используемых в специализированных образцах, например ESP32-C3 и МІК32 АМУР. Анализ требований к объему памяти показывает, что минимальным условиям в 2,8 КБ оперативной и 3,2 КБ постоянной памяти соответствуют все перечисленные устройства за исключением FE310, который требует подключения внешней памяти. Наиболее ресурсоемкий сценарий с потреблением 29,1 КБ ОЗУ и 166,2 КБ ПЗУ существенно ограничивает круг возможных кандидатов, оставляя лишь ESP32-C3 и К1921ВГ015. Микроконтроллер FE310 также может достичь соответствия при условии корректного подбора внешней памяти. Следует отметить, что приведенные граничные значения относятся исключительно к требованиям ядра операционной системы и не учитывают дополнительный объем памяти, необходимый для конкретной реализации.

На основе сформулированных критериев обосновывается актуальность портирования операционной системы RIOT на отечественный микроконтроллер К1921ВГ015. Данное устройство обладает значительным резервом памяти как постоянного, так и оперативного типа, а его стандартный набор контроллеров прерываний соответствует конфигурации FE310. Последующее исследование будет направлено на практическую разработку указанного решения.

Литература

1. AlDossary N., AlQahtani S., AlUbaidan H. A survey on resource management and security issues in IoT operating systems // 2022 Fifth International Conference of Women in Data Science at Prince Sultan University (WiDS PSU). –IEEE, 2022. P. 26–30.
2. Baccelli E. et al. RIOT: An open source operating system for low-end embedded devices in the IoT // IEEE Internet of Things Journal, 2018. Vol. 5. № 6. P. 4428–4440.
3. Saidova J. RISC-V architecture and its role in the near future // Journal of Advanced Scientific Research (ISSN: 0976-9595), 2024. Vol. 5. № 9.
4. Liu Y., Ye K., Xu C. Z. Performance evaluation of various risc processor systems: A case study on arm, mips and risc-v // International Conference on Cloud Computing. – Cham: Springer International Publishing, 2021. P. 61–74.
5. Cui E., Li T., Wei Q. Risc-v instruction set architecture extensions: A survey // IEEE Access, 2023. Vol. 11. P. 24696–24711.
6. Volkov V., Romanova I. Development of Robotic Platform on MIK32 AMUR // 2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). –IEEE, 2025. P. 461–466.
7. Balas R., Ottaviano A., Benini L. Cv32rt: Enabling fast interrupt and context switching for risc-v microcontrollers // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2024. Vol. 32. № 6. P. 1032–1044.

8. Pfau L. Measuring the Performance Overhead of RIOT Running in RISC-V User-Mode // Adresse: https://www. inet. haw-hamburg. de/teaching/ws-2023-24/project-class/prl_lars_pfau. pdf.
9. ESP32-C3 Series Datasheet. Version 1.7 [Электронный ресурс] // Espressif Systems. — URL: https://documentation.espressif.com/esp32-c3_datasheet_en.pdf (дата обращения: 07.04.2026).
10. GD32VF103 RISC-V 32-bit MCU Datasheet. Rev 1.7 [Электронный ресурс] // GigaDevice Semiconductor Inc. — URL: https://www.gd32mcu.com/data/documents/datasheet/GD32VF103_Datasheet_Rev1.7.pdf (дата обращения: 07.04.2026).
11. SiFive FE310-G003 Datasheet. Version 1.0.1 [Электронный ресурс] // SiFive, Inc, 2021. — URL: https://pages.hmc.edu/harris/class/e85/old/spring23/fe310-g003-datasheet-v1p1.pdf (дата обращения: 01.04.2026).
12. Микросхемы [Электронный ресурс] // АО «Микрон». — URL: https://www.mcu.mikron.ru/#!/tab/671393539-3 (дата обращения: 01.04.2026).
13. Микросхема интегральная К1921ВГ015. Руководство пользователя. Версия от 16.10.2025 [Электронный ресурс] // АО «НИИЭТ», 2025. — URL: https://niiet.ru/product/%D0%BA1921%D0%B2%D0%B3015/ (дата обращения: 15.03.2026).

УДК 681.537

Высокотоковый электронный регулятор на базе RISC-V микроконтроллера МИК32 Амур

Шилов Л. Б., Торопов П. М., Логинов Г. Р., Тютин В. А.
АО «НПП «Исток» им. А. И. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

Разработан высокотоковый электронный регулятор скорости (ESC) для бесщеточного двигателя постоянного тока (BLDC) на базе отечественного RISC-V микроконтроллера МИК32 «Амур». Показано программное обеспечение разрабатываемого регулятора, включая алгоритмы управления бесщеточным двигателем.
Ключевые слова: RISC-V; МИК32 «Амур»; электронный регулятор скорости; ESC.

A high-current electronic controller based on the RISC-V microcontroller MIK32 Amur

Shilov L. B., Toropov P. M., Loginov G. R., Tyutin V. A.
"RPC "Istok" named after A. I. Shokin" JSC
2A Vokzalnaya St., Fryazino, 141190, Russia

A high-current electronic speed controller (ESC) has been developed for a brushless direct current (BLDC) motor, utilizing a domestic RISC-V microcontroller MIK32 Amur as its core component. The developed regulator features comprehensive software, which incorporates advanced control algorithms specifically designed for brushless motor operation.
Keywords: RISC-V; MIK32 Amur; electronic speed controller; ESC.

Электронный регулятор скорости [1] — это устройство для управления BLDC двигателями (бесщеточные двигатели постоянного тока). Бесщеточные двигатели постоянного тока (BLDC) широко используются в разных сферах из-за их высокой энергоэффективности, надежности и небольших размеров.

При этом почти никто не делает крупные беспилотники на RISC-V микроконтроллерах — эта архитектура пока редко встречается в мощной силовой электронике. Кроме того, сейчас нет базы прошивок для RISC-V микроконтроллеров, в отличие от ARM, где существует наработанная база (например BLHeli).

В рамках работ по практической реализации электронного регулятора скорости на базе RISC-V микроконтроллера первого уровня МИК32 «Амур» были спроектированы печатные платы и корпуса, а также написано программное обеспечение для управления BLDC-двигателями. Данные работы проводились в рамках инвестиционной программы ГК «Ростех». В результате специалистам АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина» удалось успешно создать две линейки регуляторов и разработать специализированное ПО для их эффективного управления. Линейки регуляторов состоят из двух изделий ESC60A и ESC100A.

Регулятор ESC60A обладает параметрами:

- Номинальный непрерывный ток 45 А;

- Поддерживаемое напряжение питания 6-12S

Регулятор ESC100A обладает параметрами:

- Номинальный непрерывный ток 85 А;
- Поддерживаемое напряжение питания 6-12S

Литература

1. ESC регуляторы оборотов: эффективный способ управления бесколлекторными двигателями беспилотных летательных аппаратов./Иванов М. В., Зайцев В. Е., Галиев Р. Д., Хакимьянов А. Р. // Вестник Тувинского Государственного университета. Технические науки.

УДК 004.272.44

Добавление поддержки атомарных инструкций в RISC-V GPGPU Vortex

Шаехмитов Ш. Р.
Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
samilsaehmitov@gmail.com

Рассмотрена задача добавления поддержки атомарных операций в открытую GPGPU-платформу Vortex на базе архитектуры RISC-V. Описаны архитектура аппаратного модуля атомарных операций, реализованного в RTL-описании устройства, а также внесенные изменения в компилятор PoCL. Предложены оптимизации, сокращающие число обращений к памяти при выполнении атомарных операций.
Ключевые слова: RISC-V; GPGPU; Vortex; атомарные операции; OpenCL; FPGA; RTL.

Adding Support for Atomic Instructions in the RISC-V GPGPU Vortex

Shaehmitov S. R.
Saint Petersburg State University
7–9 Universitetskaya Embankment, St. Petersburg, 199034
samilsaehmitov@gmail.com

This paper addresses the problem of adding support for atomic operations to the open-source GPGPU platform Vortex, based on the RISC-V architecture. The architecture of a hardware atomic operations module, implemented in the RTL description of the device, is described, along with the changes made to the PoCL compiler. Optimizations are proposed to reduce the number of memory accesses when performing atomic operations.
Keywords: RISC-V; GPGPU; Vortex; atomic operations; OpenCL; FPGA; RTL.

Vortex [1, 2] — открытая конфигурируемая GPGPU-платформа на базе архитектуры RISC-V, представляющая интерес для исследований в области высокопроизводительных вычислений. В ходе работы по запуску библиотеки разреженной линейной алгебры SPLA [3, 4] на Vortex было выявлено две ключевые проблемы: отсутствие поддержки атомарных операций в компиляторе PoCL для Vortex, а также отсутствие поддержки RISC-V расширения A для атомарных операций в RTL-описании устройства. Поскольку SPLA использует атомарные операции в своих OpenCL-ядрах, это не позволяло запустить и провести тестирование производительности на FPGA.

Целью работы является устранение ограничений, которые мешают запустить SPLA на Vortex. Для достижения этой цели решались следующие задачи.

1) добавление поддержки атомарных операций в компилятор PoCL;
2) проектирование и реализация аппаратного модуля атомарных операций в RTL-описании Vortex.

Первым шагом стало добавление в компилятор PoCL полной поддержки атомарных операций стандарта OpenCL 1.2. Это позволило запускать OpenCL-ядра с атомарными операциями на программном симуляторе Vortex (simx).

Для поддержки атомарных операций на уровне RTL была спроектирована следующая архитектура. Каждый LSU (load/store unit) ядра оснащается выделенным модулем атомарных операций. Для обеспечения взаимного исключения глобальная память разбивается на регионы, каждому из которых соответствует арбитр блокировки (рис. 1). Аналогичный арбитр предусмотрен для локальной памяти в ядрах с несколькими LSU.

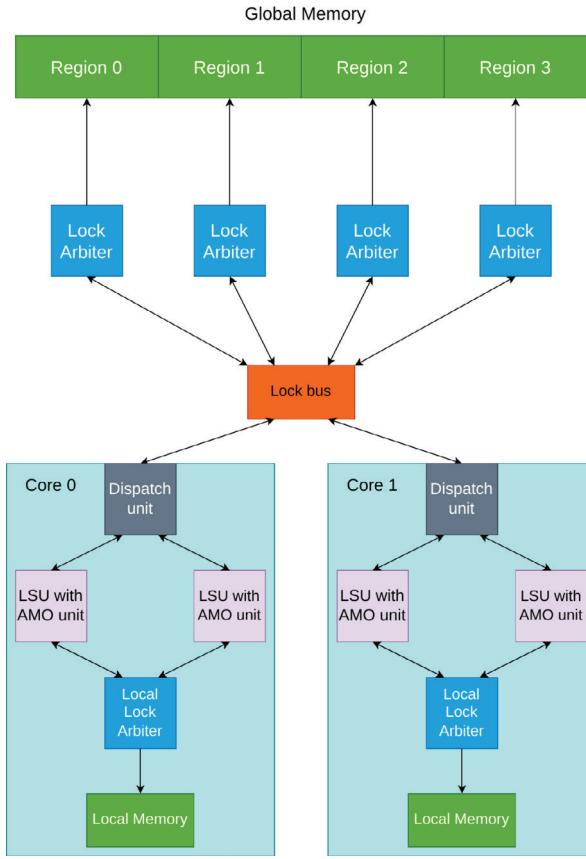


Рис. 1. Архитектура модуля атомарных операций в Vortex

Сам модуль реализован в виде конечного автомата, работающего по принципу Read-Modify-Write: после получения блокировки на регион модуль выполняет чтение, модификацию и запись. Перед снятием блокировки автомат переходит

в состояние FENCE — повторное чтение по тому же адресу, что гарантирует завершение записи предыдущей операции. Реализованный модуль поддерживает операции, определенные в A-расширении RISC-V (AMO): LR/SC и все AMO-инструкции (AMOADD, AMOSWAP, AMOOR, AMOAND, AMOXOR, AMOMIN, AMOMAX и их беззнаковые варианты). На уровне OpenCL это обеспечивает поддержку полного набора атомарных операций стандарта OpenCL 1.2. Для запуска алгоритмов SPLA достаточно подмножества из atomic_inc и atomic_add, однако возможности модуля не ограничены этими операциями.

Для сокращения числа обращений к памяти реализованы две оптимизации. Первая — группировка атомарных операций по регионам блокировки, что уменьшает количество переходов в состояние FENCE и, следовательно, число избыточных чтений. Вторая — объединение последовательных атомарных операций над одним адресом: чтение выполняется только для первой операции в цепочке, запись — только для последней, а промежуточные обращения к памяти пропускаются. Корректность при этом обеспечивается тем, что вся цепочка выполняется под единой блокировкой региона.

Проведенная работа [5] позволяет запустить SPLA на ПЛИС, однако перед этим необходимо провести более объемное тестирование, чтобы обеспечить корректность операций, а также оценить ресурсы, которые потребляет полученное решение. Полученные результаты открывают возможность запуска на Vortex программ, использующих атомарные операции, и создают основу для дальнейшего исследования пригодности платформы в сравнении с проприетарными GPGPU-решениями.

Литература

1. Blaise T. et al. Vortex: An Open Source Reconfigurable RISC-V GPGPU Accelerator for Architecture Research // Hot Chips, 2020. Vol. 32.
2. Vortex RISC-V GPGPU [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/vortexgpgpu/vortex (дата обращения: 09.04.2026).
3. Библиотека анализа графов SPLA [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/SparseLinearAlgebra/spla (дата обращения: 09.04.2026).
4. Орачев Е. С. Generalized sparse linear algebra library with vendor-agnostic GPUs acceleration [Электронный ресурс]. URL: https://dspace.spbu.ru/items/2aa43d43-60f5-465d-981d-a8078c69297c (дата обращения: 09.04.2026).
5. Реализация атомарного модуля [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/talubik/vortex/tree/amo_unit_rtl (дата обращения 10.04.2026).

УДК 004.318

Исследование влияния блока предсказания переходов на производительность современных процессоров

Панченко Д. В.
Новосибирский государственный университет (НГУ)
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1
das_panch@mail.ru

В статье представлена разработка автономного функционального симулятора блока предсказания переходов (Branch Prediction Unit) для архитектуры RISC-V. Симулятор моделирует работу предсказателя независимо от конвейера, позволяя собирать детальную статистику для различных конфигураций Branch Target Buffer (BTB) и алгоритмов предсказания. Проведена количественная оценка влияния размера и организации BTB на производительность.
Ключевые слова: функциональный симулятор; предсказание переходов; Branch Target Buffer; BTB; RISC-V; производительность процессора; динамическое предсказание.

Study of the Impact of the Branch Prediction Unit on the Performance of Modern Processors

Panchenko D. V.
Novosibirsk State University (NSU)
1 Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia
das_panch@mail.ru

This paper presents the development of a standalone functional simulator of a Branch Prediction Unit (BPU) for the RISC-V architecture. The simulator models the operation of the branch predictor independently from the pipeline, enabling the collection of detailed statistics for various Branch Target Buffer (BTB) configurations and prediction algorithms. A quantitative evaluation of the impact of BTB size and organization on performance is conducted.
Keywords: functional simulator; branch prediction; Branch Target Buffer; BTB; RISC-V; processor performance; dynamic prediction.

Современные конвейерные процессоры не могут эффективно работать без предсказания переходов. Ложные предсказания приводят к сбросу конвейера и потере тактов, что критически сказывается на общей производительности. В условиях роста тактовых частот и глубины конвейера важность точной работы предсказателя переходов постоянно возрастает. Однако исследование их работы «в железе» сложно из-за закрытости архитектур и сложности сбора статистики, что делает особенно актуальным сравнительное изучение разных типов предикторов.

Целью данной работы является количественная оценка влияния различных алгоритмов предсказания переходов на производительность процессора. Основное внимание в работе сосредоточено на динамических методиках предсказания, включая двухуровневые адаптивные схемы [5] и комбинированные предсказатели [1]. Для достижения цели был разработан специализированный функциональный

симулятор, работающий в полностью изолированном режиме: он моделирует работу предсказателя независимо от остальных этапов конвейера. Такой автономный подход позволяет изучать эффективность именно логики предсказания в чистом виде. При этом в первую очередь ведется сбор статистики для различных вариантов буфера адресов переходов (BTB) — от простейших прямоотображенных до многоканальных ассоциативных структур [2, 3], что позволяет оценить влияние конфигурации BTB на точность предсказания и частоту конфликтов, включая сценарии с ограничениями по памяти [4].

Для сбора входных данных (трасс выполнения) была разработана система сборки под архитектуру RISC-V. Это позволило получить реальные последовательности команд и паттерны переходов, характерные для выполняемых программ. Разработанный изолированный симулятор и реализованные в нем предсказатели могут быть использованы для дальнейшего исследования более сложных алгоритмов и оптимизации архитектурных решений.

Литература

1. McFarling, S. (1993). Combining Branch Predictors. Digital Western Research Lab Technical Report, TN-36.
2. Perais A., Sheikh R. (2023). Branch Target Buffer Organizations. 56th IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO 2023), Toronto, Canada.
3. Bray, B. K., Flynn M.J. (1991). Strategies for Branch Target Buffers. Stanford University Technical Report.
4. Asheim T., Grot, B., Kumar, R. (2023). A Storage-Effective BTB Organization for Servers. 29th IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture (HPCA).
5. Yeh, T.-Y., Patt Y.N. (1991). Two-Level Adaptive Training Branch Prediction. Proceedings of the 24th Annual International Symposium on Microarchitecture (MICRO 24).

УДК 004.318

Реализация и сравнение различных видов BPU для микроконтроллера на архитектуре RISC-V

Матвиенко М. К.[1,2], Уткин С. Ф.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
matvienko.mk@phystech.edu
[2] ПАО «Сбербанк»
121170, г. Москва, Кутузовский пр-т, 32 кА

В данной работе представлены результаты исследования прироста производительности микроконтроллера (MCU) на архитектуре RISC-V при реализации различных видов предсказателей переходов (BPU) — статических и динамических, проанализирована целесообразность их применения с точки зрения соотношения «производительность –аппаратные затраты».
Ключевые слова: предсказатель переходов; BPU; ядро микроконтроллера.

Implementation and comparison of various BPU types for a RISC-V microcontroller

Matvienko M. K.[1,2], Utkin S. F.[2]
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
matvienko.mk @phystech.edu
[2] Sberbank of Russia, PJSC
32A Kutuzovsky Ave., Moscow, 121170, Russia

This work explores the performance enhancement of an MCU-class RISC-V core employing static and dynamic BPUs. A qualitative analysis is performed to evaluate the cost-effectiveness of each BPU type by comparing the obtained speedup against the incurred hardware overhead.
Keywords: RISC-V; microprocessor core; microarchitecture; branch prediction.

В настоящее время во всех высокопроизводительных процессорах центрального назначения (CPU) используется предсказатель переходов [1]. Он заранее угадывает адрес следующей команды, когда во время исполнения программы встречаются инструкции условного или безусловного переходов. Это позволяет современным CPU выполнять выборку большого количества параллельных команд, что обеспечивает высокие показатели производительности. В микроконтроллерах используется меньше исполняющей аппаратуры, по сравнению с CPU. Из-за этого BPU занимает более существенную часть площади в MCU, давая меньший прирост в производительности. Тогда может возникнуть вопрос о целесообразности использования BPU в MCU.

Всего существует 2 вида BPU –статические и динамические. Первые делают частичное декодирование команды (определяют тип, наличие перехода и целевой

адрес), на основе чего выдают предсказание по переходу. В данной работе для условных переходов используется следующая эвристика: если целевой адрес перехода меньше адреса инструкции перехода, то предсказывается взятие, иначе — нет перехода. Динамические предсказатели состоят из таблицы адресов инструкций перехода и их целевого адреса (BTB –Branch Target Buffer) и таблицы истории переходов (BHT –Branch History Table или PHT –Pattern History Table). Обычно история переходов инструкций реализуется в виде 2 битового счетчика с 4 состояниями, на основе которых делается предсказание [2].

Динамические BPU требуют больше аппаратных затрат, но при этом дают больший прирост производительности в сравнении со статическими. Цель работы — определить, при каких конфигурациях (размерах BTB и BHT) применение динамических предсказателей переходов становится оправданным в условиях ограниченных аппаратных ресурсов микроконтроллеров, а при каких — более целесообразным остается статическое предсказание.

В данной работе реализовано 2 статических [4] и 2 динамических BPU. Статические отличаются расположением в ядре. Forward BPU находится до буфера инструкций, и делает предсказание сразу, как была получена транзакция. Другой статический предсказатель –backward –делает предсказание, когда инструкции читаются из очереди инструкций. Так как forward делает предсказание раннее, то он должен давать больший прирост производительности, но требует больше ресурсов, так как он получает не готовую инструкцию, а транзакцию из памяти инструкций, в которой могут находиться несколько инструкций или их части.

Из динамических BPU были реализованы бимодальный и GShare [3] предсказатели. Главное отличие GShare от бимодального предиктора, обеспечивающее ему более высокую точность предсказаний, заключается в использовании глобальной истории переходов (GHR) для формирования индекса таблицы предсказаний (BHT/PHT) посредством операции XOR.

Оценка производительности проводилась с использованием бенчмарка coremark, отражающего типичные вычислительные задачи микроконтроллеров. Критерием прироста производительности служило сокращение времени выполнения теста.

Литература

1. Agner Fog The microarchitecture of Intel, AMD and VIA CPUs. URL: https://www.cs.utexas.edu/~hunt/class/2016-spring/cs350c/documents/Agner-Fog/microarchitecture.pdf.
2. James E. Smith A Study of Branch Prediction Strategies. URL: https://www.academia.edu/10848452/A_Study_of_Branch_Prediction_Strategies
3. Scott McFarling Combining Branch Predictors. URL: https://safari.ethz.ch/architecture/fall2017/lib/exe/fetch.php?media=combining.pdf
4. Thomas Ball, James R. Larus Branch Prediction for Free. URL: https://safari.ethz.ch/digitaltechnik/spring2019/lib/exe/fetch.php?media=brfree.pdf.

УДК 004.318

Исследование оптимальной архитектуры систолического массива с возможностью восстановления его работоспособности в онлайн-режиме

Острый А. В.[1,2], Парсегова В. С.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
ostryi.av@phystech.edu
[2] ПАО Сбербанк
121170, г. Москва, Кутузовский пр-т, 32 кА

В статье исследуются три архитектуры с возможностью восстановления работоспособности в онлайн-режиме: FORTALESA, архитектура, основанная на избыточности одного PE-элемента на несколько строк и столбцов, и архитектура, основанная на избыточных целых столбцах и строках вычислительных PE-блоков. В работе выполнен сравнительный анализ задержек вычислений, покрытия ремонтных сценариев и увеличения площади массива.
Ключевые слова: архитектура систолического массива; онлайн-ремонт; отказоустойчивая архитектура.

Investigation of the optimal architecture of a systolic array with the possibility of restoring its operability online.

Ostroy A. V.[1,2], Parsegova V. S.2
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutsky Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
ostryi.av@phystech.edu
[2] Sberbank
32 Kutuzovsky Ave., Moscow, 121170, Russia

The article explores three architectures with the ability to restore online performance: FORTALESA, an architecture based on redundancy of one PE element for several rows and columns, and an architecture based on redundant whole columns and rows of computing PE blocks. The paper provides a comparative analysis of computing delays, coverage of repair scenarios and an increase in the area of the array.
Keywords: systolic array architecture; online repair; fault-tolerant architecture.

Систолический массив — способ организации вычислительного устройства, представляющий однородную сетку вычислительных элементов (processing element, PE), соединенных только с соседями, каждый из которых считывает входные данные, вычисляет функцию умножения и сохраняет результат в локальной памяти [1]. В настоящее время этот способ получил широкое распространение для умножения матриц –основной операции алгоритмов нейронных сетей и машинного обучения [2].

Поскольку замена устройства при возникновении неисправностей PE невыгодна, актуальным является создание архитектуры с обнаружением и устранением

неисправностей в онлайн-режиме за счет обхода отказавших элементов и наличия избыточных PE — что, в отличие от офлайн-подхода, обеспечивает непрерывную работу и продлевает срок эксплуатации устройства.

Целью работы является сравнительное исследование архитектур систолического массива с возможностью восстановления работоспособности в онлайн-режиме — выявление преимуществ и недостатков каждого подхода — с перспективой аппаратной реализации наиболее эффективной из них. Сравниваются три архитектуры: FORTALESA [3], основанная на избыточности одного PE-элемента на несколько строк и столбцов [4], и основанная на избыточных целых столбцах и строках PE-блоков. Анализируются покрытие сценариев неисправности и увеличение площади массива.

FORTALESA предполагает незначительное увеличение числа PE-блоков и рассматривается в конфигурации: с тройным (TRG) резервированием. При оценке покрытия сценариев неисправности определялся процент ремонтопригодных случаев при заданном числе отказавших PE с равной вероятностью отказа для каждого из них.

В ходе исследования были выявлены преимущества и недостатки каждой из рассмотренных архитектур. Архитектура FORTALESA обеспечивает встроенное обнаружение ошибок без необходимости дополнительной тестирующей логики; конфигурация TRG дополнительно позволяет устранять неисправности без прерывания работы устройства. Архитектура с избыточностью одного PE-элемента на несколько строк и столбцов характеризуется высоким увеличением площади кристалла, однако демонстрирует значительно лучший результат в покрытии ремонтных сценариев .

Литература

1. Kung H. T. et al. Why systolic arrays? 1982.
2. Jouppi N. P. et al. In-datacenter performance analysis of a tensor processing unit // Proceedings of the 44th annual international symposium on computer architecture, 2017. P. 1–12.
3. Cherezova N., Jutman A., Jenihhin M. FORTALESA: Fault-tolerant reconfigurable systolic array for DNN inference // Microprocessors and Microsystems, 2025. P. 105222.
4. Cho K. et al. Efficient systolic-array redundancy architecture for offline/online repair // Electronics, 2020. Vol. 9. № 2. P. 338.

УДК 004.23

Автоматическая генерация универсальных декодеров RISC-V ISA на основе Unified Database

Челомов С. Н.[1,2], Крюков П. И.[1,2]
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
chelomov.sn@phystech.edu, pavel.kryukov@phystech.edu
[2] *ПАО «Сбербанк»*
121170, г. Москва, Кутузовский пр-т, 32 кА

Одним из вызовов при разработке симуляторов является декодирование набора инструкций RISC-V. Инструменты кодогенерации в ведущих симуляторах связаны с их кодовой базой и смешивают логику разных стадий конвейера процессора. Для решения проблемы предложен универсальный генератор кода, использующий базу спецификаций RISC-V Unified Database. Метод обеспечивает разделение стадий декодирования и исполнения инструкций. Сгенерированный C++ код не зависит от API конкретного симулятора, поэтому генератор может быть использован в разных проектах.
Ключевые слова: генерация кода; декодеры; RISC-V Unified Database; симуляторы.

Automatic Generation of Universal RISC-V ISA Decoders Based on a Unified Database

Chelomov S. N.[1,2], Kryukov P. I.[1,2]
[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
chelomov.sn@phystech.edu, pavel.kryukov@phystech.edu
[2] *Sberbank of Russia, PJSC*
32A Kutuzovsky Ave., Moscow, 121170, Russia

One of the challenges in developing simulators is decoding the RISC-V instruction set. Code generation tools in leading simulators are tied to their codebases and mix logic from different stages of the processor pipeline. To address this issue, a universal code generator based on the RISC-V Unified Database specification is proposed. The method ensures separation of instruction decoding and execution stages. The generated C++ code is independent of any particular simulator API, making the generator reusable across different projects.
Keywords: code generation; decoders; RISC-V Unified Database; simulators.

На сегодняшний день один из вызовов при разработке симуляторов состоит в сложности декодирования RISC-V ISA. Особенность RISC-V заключается в ее модульности, помимо базового набора инструкций, существуют десятки стандартных и вендорских расширений. Отсутствие автоматического декодирования для такого объема спецификаций приводит к долгому ручному написанию кода и ошибкам

из-за человеческого фактора (ошибки в битовых масках, вычислениях сдвигов), а также к сложности поддержки новых для симулятора расширений.

Другая проблема состоит в том, что при разработке симуляторов часто не соблюдается изоляция стадий конвейера процессора: логика исполнения и декодирования битов, назначение портов функциональных устройств (ALU, FPU и т. д.) смешиваются. Нарушается принцип единственной ответственности (SRP) [1].

Была поставлена задача по разработке универсального решения для декодирования ISA.

Для решения указанных проблем предлагается использовать инструменты кодогенерации, которые могут быть применены одновременно в разных проектах.

Были рассмотрены решения ведущих симуляторов, в которых задача декодирования ISA решается по-разному, но всегда с помощью кодогенерации.

Подход QEMU [2] — использует собственный Python-скрипт (decodetree.py), который принимает файлы со спецификацией (.decode), генерируя файлы декодера. Однако в генераторе QEMU отсутствует информация необходимая для работы потактового симулятора.

Подход gem5 [3] — более сложный DSL и собственный формат .isa с необходимой спецификацией. ISA Parser (Python скрипт) генерирует уникальные C++ классы для каждой инструкции. Эти классы содержат логику исполнения, зависимости по регистрам и т. д.

Оба инструмента интегрированы в кодовую базу своих проектов, то есть монолитны. Их нельзя использовать в стороннем симуляторе без переноса инфраструктурного кода других симуляторов.

Для решения описанных проблем предложен собственный генератор кода.

В качестве источника информации была выбрана RISC-V Unified Database [4] (UDB) — база данных, содержащая необходимую информацию о расширениях, кодировках, форматах и логике инструкций в формате YAML. UDB всегда находится в актуальном состоянии.

Предложенный метод работает следующим образом:

Генератор разбирает YAML-файлы спецификации из UDB.

С помощью регулярных выражений производится назначение портов функциональных устройств и привязка к функции исполнения для каждой инструкции.

Генерируется C++ код, который не связан с конкретным API симулятора и может быть использован в разных проектах (в отличие от методов QEMU/gem5).

Разрабатывается универсальное решение, которое можно использовать в разных симуляторах, с минимальным изменением кодовой базы.

Литература

1. The Practical Guide to Structured Systems Design, 2d. ed., Meilir PageJones, Yourdon Press Computing Series, 1988.
2. Jokela, A. C. (22 July 2023). “The History, Use and Technical Details of QEMU”
3. Lowe-Power J, Ahmad AM, Akram A, Alian M, Amslinger R, Andreozzi M, Armejach A, Asmussen N, Beckmann B, Bharadwaj S, Black G, Bloom G, Bruce BR et al. (2020). “The gem5 simulator: Version 20.0+”
4. riscv-unified-db // GitHub: https://github.com/riscv/riscv-unified-db

УДК 004.457

Инструмент Amphimixis для оценки готовности проектов к миграции на RISC-V с использованием LLM-агентов

Адодина Ю. В., Бзычкин Е. М., Бордуков Д. А., Мишин М. О., Новик М. А., Чурикова В. С., Смирнов К. К.
Санкт-Петербургский государственный университет, Математико-механический факультет, кафедра Системного программирования и кафедра Информационно-аналитических систем 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9 juliaadod@mail.ru, bzychkin.egor@gmail.com, dabordukov@mail.ru, mishamishin17@gmail.com, novikmaria36@gmail.com, curikovalera3@gmail.com, k.k.smirnov@spbu.ru

Разработан инструмент с открытым исходным кодом Amphimixis для оценки готовности проектов к миграции на RISC-V. Он собирает проект на разных платформах и с разными конфигурациями, профилирует их с помощью perf и сопоставляет полученные трассы между сборками, выявляет узкие места, а LLM анализирует результаты профилирования и дает рекомендации по оптимизации.
Ключевые слова: RISC-V; LLM-агент; миграция; профилирование; Amphimixis; Opencode; кросс-компиляция; открытый исходный код.

A tool Amphimixis for assessing project readiness for migration to RISC-V using LLM agents

Adodina J. V., Bzychkin E. M., Bordukov D. A., Mishin M. O., Novik M. A., Churikova V. S., Smirnov K. K.
St. Petersburg State University, Faculty of Mathematics and Mechanics, Department of Software Engineering and Department of Analitical information Systems 7–9, Universitetskaya Embankment, St. Petersburg, 199034, Russia juliaadod@mail.ru, bzychkin.egor@gmail.com, dabordukov@mail.ru, mishamishin17@gmail.com, novikmaria36@gmail.com, curikovalera3@gmail.com, k.k.smirnov@spbu.ru

Developed open source tool Amphimixis to assess the readiness of projects for migration to RISC-V. It builds the project on different platforms and with different configurations, profiling them using perf and compares the obtained traces between builds, identifies bottlenecks, a LLM analyzes the profiling results and provides recommendations for optimization.
Keywords: RISC-V; LLM agent; migration; profiling; Amphimixis; Opencode; cross compilation; open source.

Анализ готовности приложений к миграции на архитектуру RISC-V требует многократной сборки, тестирования и измерения производительности. Разработчику приходится вручную сопоставлять счетчик perf, искать «горячие» участки кода и самостоятельно придумывать способы его улучшения, что отнимает много времени.

Для автоматизации этих задач создан инструмент Amphimixis [1]. Он реализован на Python как консольное приложение: пользователь описывает сборки в конфигурационном файле в формате YAML (машины для сборки и профилирования, тулчейны, флаги конфигурации и компиляции), инструмент выполняет сборку (включая кросс-компиляцию под RISC-V), профилирование через perf и формирует таблицы сравнения трасс по счетчикам BPU. В работе рассмотрены два способа использования приложения. Первый: пользователь взаимодействует с Amphimixis через командную строку, инструмент выполняет сборку и профилирование, а затем выводит таблицы с результатами сравнения трасс. Анализ этих таблиц и поиск оптимизаций разработчик проводит самостоятельно. Этот способ предусматривает опциональное обращение к LLM-агентам для анализа репозитория и получения рекомендаций по улучшению кода. Второй способ — через среду LLM-агента Opencode, которая позволяет расширять функциональность с помощью пользовательских инструментов, субагентов и skills. На базе Opencode сконфигурирован LLM-агент, выполняющий задачи Amphimixis. В системном запросе описан сценарий работы: агент сам анализирует репозиторий проекта, вызывает инструменты сборки и профилирования, составляет таблицы, интерпретирует расхождения в производительности и выдает конкретные рекомендации по оптимизации исходного кода.

Было проведено тестирование на проектах tinyxml2, yaml-cpp и nlohmann/json. Проверка на тестовых проектах подтвердила работоспособность всех модулей как локально, так и при подключении к удаленным машинам по SSH. Описываемое решение было показано техническим специалистам: положительно оценена кросс-таблица трасс, дополнительно было предложено искать явную векторизацию в исходном коде и автовекторизацию, порожденную компилятором, в двоичном коде. Предложен пакетный сценарий работы, в котором анализируется сразу несколько проектов.

В настоящее время ведется работа над реализацией решений, предложенных на апробации, а также над поставкой тулчейнов для кросс-компиляции под RISC-V, автоматическим развертыванием QEMU-окружений с RISC-V, автоматическим повтором сборки при сбоях с фиксацией логов, созданием skill для LLM-агента по поиску актуального репозитория проекта по его названию.

Работа выполнена в Лаборатории технологий программирования инфраструктурных решений СПбГУ.

Литература

1. GitHub-репозиторий Amphimixis [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/Amphimixis/amphimixis.
2. Rocha T., Neves N., Roma N., Tomás P., Sousa L. RVEBS: Event-Based Sampling on RISC-V // 2025 Design, Automation & Test in Europe Conference (DATE). P. 1–6.
3. Gregg B. Linux Performance Analysis and Tools, 2021 [Электронный ресурс]. URL: https://www.brendangregg.com/linuxperf.html.

УДК 004.4'4

Построение проверяемой bootstrap-цепочки для архитектуры RISC-V

Пивкин Ю. В., Смолин Д. Л., Токарев М. Р., Тумилевич В. А.
Новосибирский государственный университет (НГУ)
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1
y.pivkin@g.nsu.ru, d.smolin@g.nsu.ru, m.tokarev4@g.nsu.ru, v.tumilevich@g.nsu.ru

Проект решает проблему доверия к системному ПО (уязвимость «Trusting Trust») на RISC-V. Разработана воспроизводимая bootstrap-цепочка: от минимального загрузчика до трансляторов (hex0, hex1). Создается база для Си-компилятора внутри доверенной среды без сторонних бинарных сборщиков.
Ключевые слова: RISC-V; bootstrap; атака Томпсона; компилятор; доверенная загрузка.

Implementation of trusted environment on RISC-V architecture

Pivkin Yu. V., Smolin D. L., Tokarev M. R., Tumilevich V. A.
Novosibirsk State University (NSU)
Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia
y.pivkin@g.nsu.ru, d.smolin@g.nsu.ru, m.tokarev4@g.nsu.ru, v.tumilevich@g.nsu.ru

This project addresses the issue of trust in system software (the "Trusting Trust" vulnerability) on RISC-V. A reproducible bootstrap chain has been developed, ranging from a minimal loader to translators (hex0, hex1). It establishes a foundation for a C compiler within a trusted environment without the need for third-party binary build tools.
Keywords: RISC-V; bootstrap; Thompson attack; compiler; trusted boot.

Невозможность полной ручной проверки современных компиляторов порождает риск наличия самовоспроизводящихся закладок («атака Томпсона»[1]). Для защиты инфраструктуры требуется минимальное доверенное звено, верифицируемое вручную. Наша цель — построение проверяемой bootstrap-цепочки(вдохновленной проектом live-bootstrap [2]), обеспечивающей раздельную компиляцию внутри доверенного окружения. Выбор открытой архитектуры RISC-V позволяет производить собственные процессоры, исключая аппаратные закладки и замыкая контур безопасности на физическом уровне.

Архитектура строится на принципе поэтапного усложнения, где каждая стадия компилируется инструментами предыдущей. На данный момент реализованы и спроектированы следующие этапы:

- Stage 0 (hex0): Корневое звено (seed). Тривиально верифицируемый транслятор, побайтово преобразующий текстовое 16-ричное представление инструкций напрямую в машинный код RISC-V;
- Stage 1 (Bootloader): Ассемблерный загрузчик. В отличие от Stage 0, напрямую управляет аппаратурой: инициализирует память, стек и готовит безопасное окружение для передачи управления ядру;
- Stage 2 (Ядро Simon): Базовая операционная среда. В отличие от загрузчика, предоставляет рантайм-инфраструктуру: файловую систему в памяти,

UART, оболочку и перехват ошибок (Kernel Panic). Это доверенный хост для последующих стадий;

- Stage 3 (hex1): Двухпроходный ассемблер. Отличие от hex0 — добавление поддержки работы с символьными метками, ссылками на них и игнорированием комментариев;
- Stage 4 (hex2): Расширенный ассемблер. Отличие от hex1 — поддержка вычисления относительных смещений, констант и базовых макросов, что радикально сокращает объем рутинного кода;
- Stage 5 (M0) (в планах): Простейший макроассемблер. Отличие от hex2 — переход к использованию переменных и продвинутой макро-логике, абстрагирующей разработчика от прямых машинных инструкций RISC-V;
- Stage 6 (cc_riscv) (в планах): Минимальный компилятор Си (аналог cc_x86), написанный на M0. Отличие от M0 — качественный скачок: переход к структурному программированию на языке высокого уровня;
- Stage 7 (M2-Planet) (в планах): Полноценный компилятор подмножества языка Си. Отличие от cc_riscv — поддержка широкого стандарта Си, достаточного для сборки сложных программ. Самокомпилирующийся компилятор.

Надежность системы контролируется интеграционными тестами на Python (unittest, pytest). Взаимодействие с ядром внутри эмулятора QEMU осуществляется через библиотеку rexpect. Тестируется чистота сборки, обработка команд, перехват ошибок и компиляция трансляторами hex0/hex1.Помимо программной эмуляции, работоспособность системы на реальном аппаратном обеспечении подтверждена успешным запуском программы на плате архитектуры RISC-V, включая платы LicheePi 4A, BananoPi.

Отдельным этапом станет верификация будущих Си-компиляторов (cc_riscv и M2-Planet). Для доказательства того, что инструменты реализуют полноценный стандарт Си, а не являются узкоспециализированными парсерами, будет внедрено тестирование на базе эталонных наборов. Проверке подвергнутся синтаксические конструкции, математические операции, работа с указателями и генерация валидного машинного кода RISC-V.

Созданный фундамент доказывает жизнеспособность раздельной компиляции на RISC-V, устраняя зависимость от «черных ящиков» и формируя базу для защиты от «атаки Томпсона».

Литература

1. Thompson, K. Reflections on Trusting Trust // Communications of the ACM, 1984. Vol. 27. №8. P. 761–763.
2. Проект live-bootstrap [Электронный ресурс]. — URL: https://github.com/fosslinux/live-bootstrap.

УДК 004.31

Масштабируемый учебно-исследовательский стенд удаленного доступа для исследования защищенного шлюза CAN FD-Ethernet на базе архитектуры RISC-V и потоковой передачи телеметрии

Везелев М. В., Романова И. И.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
mvvezelev@edu.hse.ru, iromanova@hse.ru

Представлена архитектура удаленного учебно-исследовательского стенда для изучения защищенного шлюза CAN FD–Ethernet на базе отечественного микроконтроллера К1921ВГ1Т (архитектура RISC-V). Экспериментальный прототип позволяет переключать внешний Ethernet-контроллер: ENC28J60 (тракт 10BASE-T half-duplex) или W5500 (тракт 10/100BASE-T). Оба контроллера подключаются по SPI1 и работают через единый программный стек ARP/IPv4/ICMP/UDP, при этом W5500 использует Socket 0 в режиме MACRAW. Это позволяет сравнивать пропускную способность, задержку и устойчивость обмена по единой методике измерений, отдельно учитывая ошибки CAN FD, ARP, SPI и самого Ethernet-контроллера. Архитектура также включает веб-интерфейс, серверную ячейку и резервируемые аппаратные стенды.
Ключевые слова: RISC-V; CAN FD; ENC28J60; W5500; MACRAW; SPI; 10/100BASE-T; удаленный лабораторный стенд; потоковая телеметрия; вибродиагностика; встраиваемые системы; защищенный обмен данными.

A Scalable Remote-Access Educational and Research Testbed for Studying a Secure CAN FD-Ethernet Gateway Based on RISC-V Architecture and Streaming Telemetry

Vezelev M. V., Romanova I. I.
National Research University Higher School of Economics
34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia
mvvezelev@edu.hse.ru, iromanova@hse.ru

This paper presents the architecture of a remote educational and research testbed for studying a secure CAN FD–Ethernet gateway, built around the domestic K1921VG1T microcontroller (RISC-V architecture). The experimental prototype supports a switchable external Ethernet controller: ENC28J60 for a 10BASE-T half-duplex link or W5500 for a 10/100BASE-T link. Both controllers connect via SPI and share the same software stack, with W5500 operating through Socket 0 in MACRAW mode. This makes it possible to compare throughput, latency, and exchange stability under a common measurement methodology, with CAN FD, ARP, SPI, and Ethernet-controller errors tracked separately. The architecture also includes a user web interface, a server cell, and reservable hardware testbeds.

Keywords: RISC-V; CAN FD; ENC28J60; W5500; MACRAW; SPI; 10/100BASE-T; remote laboratory testbed; streaming telemetry; vibration diagnostics; embedded systems; secure data exchange.

В работе представлена архитектура масштабируемого учебно-исследовательского стенда удаленного доступа для изучения защищенного обмена данными в промышленных и встраиваемых системах. Тема актуальна: растут требования к шлюзам, которые преобразуют трафик CAN/CAN FD и Ethernet, поддерживают конфигурируемую маршрутизацию, контролируют состояние оборудования и обеспечивают защищенное взаимодействие [1–4].

Система состоит из клиентского и инженерно-сетевого уровней. Пользователь заходит на стенд через веб-интерфейс, и на время сеанса за ним закрепляется одна из аппаратных установок. На серверной стороне разворачиваются виртуальные рабочие пространства, а сетевой узел связывает несколько стендов и обеспечивает масштабирование системы. Вычислительное ядро стенда — отечественный микроконтроллер К1921ВГ1Т; физический Ethernet-интерфейс реализуется одним из двух внешних модулей, ENC28J60 или W5500.

В качестве нагрузки используются реальные сигналы датчика и эмулируемые потоки телеметрии. ENC28J60 и W5500 подключаются к одной и той же группе выводов SPI1 (PA4–PA7), а нужный низкоуровневый драйвер выбирается отдельной сборкой прошивки. W5500 работает в режиме MACRAW через Socket 0, поэтому в обоих вариантах кадры CAN FD преобразуются в UDP-пакеты одним и тем же программным стеком. Встречный UDP-трафик задается на уровне 0–100 % от фактически согласованной скорости Ethernet-линии с учетом служебных полей Ethernet, IPv4 и UDP. Измеряются сквозная полезная пропускная способность, задержка до подтвержденного завершения передачи, p99-задержка, потери и диагностические счетчики контроллера; для ENC28J60 дополнительно регистрируются повторные передачи и поздние коллизии, а для W5500, где эти показатели аппаратно недоступны, они помечаются как неприменимые. В метаданные каждого прогона записываются тип контроллера, скорость и дуплекс линии.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: архитектура удаленного стенда с веб-доступом, виртуальными рабочими пространствами и резервированием установок; воспроизводимая методика сквозного исследования шлюза CAN FD–Ethernet на К1921ВГ1Т с различными контроллерами ENC28J60 и W5500 при неизменном программном сетевом стеке; раздельная регистрация сетевых отказов и оценка накладных расходов механизмов защиты. Веб-слой реализован пока для одного стенда — кластерное масштабирование остается направлением дальнейшего развития.

Предложенная архитектура применима для дистанционных лабораторных работ по встраиваемым системам и промышленным интерфейсам, а также для экспериментальной оценки шлюза CAN FD–Ethernet. Переключение между ENC28J60 и W5500 не требует замены протоколов верхнего уровня, но измерения по-прежнему хранятся раздельно — с учетом частоты SPI, режима PHY, объема буферов и особенностей конкретного контроллера.

Благодарности

Публикация подготовлена в ходе проведения исследования (№ 26-00-037 «Разработка удаленной автоматизированной исследовательской образовательной

платформы по проектированию цифровых устройств и встраиваемых систем с применением аппаратных средств и искусственного интеллекта») в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)».

Литература

1. Luo F., Hu Q. Security Mechanisms Design for In-Vehicle Network Gateway // SAE Technical Paper 2018-01-0018. 2018. DOI: 10.4271/2018-01-0018.
2. Kern A., Reinhard D., Streichert T., Teich J. Gateway Strategies for Embedding of Automotive CAN-Frames into Ethernet-Packets and Vice Versa // Architecture of Computing Systems — ARCS 2011. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6566. Springer, 2011. P. 259–270. DOI: 10.1007/978-3-642-19137-4_22.
3. Halenar I., Halenarova L., Tanuska P., Vazan P. Machine Condition Monitoring System Based on Edge Computing Technology // Sensors, 2025. Vol. 25. № 1. Art. 180. DOI: 10.3390/s25010180.
4. Kim J. H., Seo S.-H., Hai N. T., Cheon B. M., Lee Y. S., Jeon J. W. Gateway Framework for In-Vehicle Networks Based on CAN, FlexRay, and Ethernet // IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015. Vol. 64. № 10. P. 4472–4486. DOI: 10.1109/TVT.2014.2371470.

УДК 004.428

Особенности разработки и функционирования связующего программного обеспечения для программно-аппаратной платформы «Эльбрус»

Суминов К. А.
АО «МЦСТ»
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 51
suminov_k@mcst.ru

Рассмотрены практические аспекты разработки связующего программного обеспечения на базе ROS Noetic и ROS 2 Galactic под отечественную платформу «Эльбрус» для использования в бортовых вычислительных системах робототехнических комплексов. Рассмотрены варианты функционирования с использованием бинарной трансляции и нативной сборки, а также совместная работа ROS 1 и ROS 2, запущенных в различных режимах через ros1_bridge.
Ключевые слова: бортовые вычислительные системы; ROS; ROS 2; АПП Эльбрус; системное ПО; портирование; бинарная трансляция; нативная сборка; ros1_bridge.

Specific features of Middleware development and operation for the Elbrus Hardware–Software Platform

Suminov K. A.
MCST JSC
51 Leninsky Ave., Moscow, 119049, Russia
suminov_k@mcst.ru

This paper considers practical aspects of developing middleware software based on ROS Noetic and ROS 2 Galactic for the domestic Elbrus hardware–software platform, intended for use in onboard computing systems of robotic complexes. Different operation modes are analyzed, including application-level binary translation and fully native compilation, as well as the joint operation of ROS 1 and ROS 2 running in various configurations via ros1_bridge.
Keywords: onboard computing systems; ROS; ROS 2; Elbrus hardware–software platform; system software; software porting; binary translation; native compilation; ros1_bridge.

Импортозамещение вычислительных систем и программного обеспечения является ключевым направлением развития современной отечественной робототехники, особенно при создании бортовых вычислительных систем (БВС) робототехнических комплексов (РТК). Несмотря на появление высокопроизводительных отечественных многоядерных процессоров семейства «Эльбрус», таких как «Эльбрус-2С3» [1] и «Эльбрус 8С2» [2], их применение ограничено недостаточным уровнем развития программной экосистемы, включая отсутствие поддержки распространенных фреймворков. В частности, системы ROS (Robot Operating System) и ROS 2 ориентированы на архитектуры x86 и ARM. Для их использования на отечественных платформах необходима адаптация.

В работе рассматриваются особенности разработки и функционирования связующего программного обеспечения РТК на базе ROS Noetic и ROS 2 Galactic для платформы «Эльбрус». Основное внимание уделено практическим аспектам портирования и интеграции фреймворков в среду ОС «Эльбрус Линукс 8.0», а также обеспечению их совместной работы.

Реализация включала два взаимодополняющих подхода. На первом этапе использовалась бинарная трансляция уровня приложений, позволяющая быстро запускать существующие x86-сборки ROS и выполнять первичную проверку работоспособности. На втором этапе выполнено нативное портирование, включающее адаптацию архитектурно-зависимого кода (ассемблерные вставки, выравнивание данных, размеры типов), модификацию CMake/Make-скриптов, разрешение конфликтов версий библиотек между ROS 1 и ROS 2, а также локализацию внешних зависимостей. Для ускорения развертывания сформированы deb-пакеты с учетом структуры ОС «Эльбрус» [4].

Экспериментальные исследования проведены на вычислительном комплексе из двух модулей на базе «Эльбрус-2С3» и «Эльбрус-8С2», объединенных локальной сетью и имитирующих распределенную БВС РТК [3]. Рассмотрены различные сценарии функционирования: совместный и распределенный запуск, смешанные режимы (ROS 1 — нативно, ROS 2 — через трансляцию), а также полностью нативная конфигурация.

Функциональное тестирование включало проверку, сервисов, действий и взаимодействия ROS 1 и ROS 2 через ros1_bridge. Показано, что нативная реализация обеспечивает меньшую задержку и более высокую устойчивую частоту обмена. При использовании бинарной трансляции рост времени обмена и функционирования составляет 10–25 %, при этом повышается совместимость и упрощается развертывание.

Полученные результаты подтверждают возможность создания эффективного связующего программного обеспечения для РТК на базе платформы «Эльбрус», обеспечивающего совместную работу различных поколений программных средств. Практическая значимость работы заключается в расширении инструментальной базы разработки и снижении технологической зависимости при создании бортовых систем управления.

Литература

1. Чучко, П. А. Проблема унификации модулей на основе процессора «Эльбрус-2С3» / П. А. Чучко, И. Н. Бычков, Е. Г. Панченко // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № S8-1(113). — С. 37–38. — DOI: 10.22184/1993-8578.2022.15.8s.37.38.
2. Бочаров, Н.А. Возможности микропроцессоров Эльбрус-8С и Эльбрус-8СВ для решения задач робототехники / Н. А. Бочаров, А. С. Гладких, Н. Б. Парамонов, С. В. Сенченков // Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации: Сборник статей V военно-научной конференции, Анапа, 29–30 июля 2020 года. Том 1. –Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение.

3. Суминов, К. А. Оценка аппаратного состава бортовых вычислительных систем робототехнических комплексов на основе решаемых задач / К.А. Суминов, Н.А. Бочаров, М.А. Кирилюк // Известия ЮФУ. Технические науки, 2025. — №2 (244). — С. 279–289. — DOI: 10.18522/2311-3103-2025-2-279-289. — EDN QLGORV.
4. Тачков, А. А. Особенности портирования Robot Operating System на программно-аппаратную платформу “Эльбрус” / А.А. Тачков, А.В. Козов, А.Ю. Вуколов // Программные продукты и системы, 2019. — №4. — С. 655–664. — EDN TVJSXJ.

УДК 004.031.6

Развитие реконфигурируемого программно-аппаратного комплекса для работы с отладочными платами

Фролов К. Д., Мирошниченко Л. И., Американов А. А., к. т. н.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
kdfrolov@edu.hse.ru, limiroshnichenko@edu.hse.ru, aamerikanov@edu.hse.ru

Работа развивает конструкцию и функционал реконфигурируемой программно-аппаратной платформы для дистанционного взаимодействия с различными отладочными платами, использующей ПЛИС для коммутации соединений между отладочными платами и периферией. Предлагается внедрение печатных плат, новых интерфейсов периферии и расширенного пользовательского интерфейса для взаимодействия с системой.
Ключевые слова: удаленный стенд; ПЛИС; онлайн образование; отладочные платы; удаленный доступ.

Further development of a reconfigurable software-hardware platform for working with development boards

Frolov K. D., Miroshnichenko L. I., Amerikanov A. A., Ph.D
HSE University
20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russia
kdfrolov@edu.hse.ru, limiroshnichenko@edu.hse.ru, aamerikanov@edu.hse.ru

The study advances the architecture and functionality of a reconfigurable software-hardware platform designed for remote interaction with various development boards. The platform employs an FPGA to switch connections between the development boards and peripheral devices. The proposed enhancements include the introduction of printed circuit boards, new peripheral interfaces, and an extended user interface for system operation.
Keywords: remote laboratory; FPGA; online education; development boards; remote access.

Появление сети Интернет и развитие коммуникационных технологий открывают новые возможности для развития удаленных лабораторий, позволяющих студентам, преподавателям, инженерам и исследователям проводить эксперименты и разработки без физического присутствия в лаборатории. Удаленные лаборатории играют важную роль в образовании, научных исследованиях и промышленных разработках [1].

Рост числа научных публикаций, посвященных удаленным лабораториям на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [2], указывает на востребованность и актуальность разработок в области удаленного доступа к оборудованию. Технологии ПЛИС открывают возможности для проектирования более сложных и комплексных систем удаленных лабораторий.

В предыдущей работе был проведен обзор существующих решений для удаленной работы с оборудованием, предложена архитектура реконфигурируемого

удаленного комплекса, устраняющего недостатки аналогов, и реализован прототип удаленной лаборатории на основе предложенной архитектуры [3].

В настоящей работе представлено дальнейшее развитие удаленной лаборатории при сохранении ранее разработанной архитектуры. Разработан новый пользовательский интерфейс с улучшенной визуализацией, отдельным меню с расширенной библиотекой периферийных устройств, в состав которой включены новые компоненты, в частности датчик освещенности, работающий по протоколу SPI. Реализованы сохранение и загрузка пользовательской конфигурации стенда, что позволяет формировать схему подключений и использовать ее позднее без повторной конфигурации.

Для разграничения доступа к функциям системы разработана ролевая модель пользователей, включающая роли «Пользователь», «Лаборант» и «Администратор». В базовом режиме взаимодействие со стендом осуществляется в роли «Пользователь», в рамках этой роли доступны выбор и подключение необходимых периферийных устройств к выводам исследуемой платы, загрузка пользовательской прошивки на плату, а также сохранение и загрузка сформированной конфигурации подключений. Получение ролей «Лаборант» и «Администратор» требует отдельной авторизации с использованием соответствующих учетных данных. Роль «Лаборант» предоставляет возможность ограничивать набор периферийных устройств, доступных пользователю, без изменения конфигурации приложения, описывающей физическую коммутацию стенда. Такой режим может использоваться преподавателем для задания ограничений при выполнении практических работ. Роль «Администратор» предназначена для изменения конфигурации самого стенда, а именно для редактирования таблиц, описывающих физическую коммутацию компонентов. Такой режим необходим при первичной настройке системы, а также при последующем изменении аппаратной структуры стенда.

Кроме того, разработаны специализированные печатные платы для размещения периферийных устройств и преобразователей напряжения взамен базовых макетных плат. Такой подход позволяет повысить надежность и компактность аппаратной части стенда. Для автоматизации установки и обновления программного обеспечения на серверном компьютере разработаны и интегрированы Ansible-сценарии, обеспечивающие воспроизводимость и масштабируемость системы.

Литература

1. Ortelt T. R. et al. Concepts of the International Manufacturing Remote Lab (MINT-ReLab) –Combination of a MOOC and a Remote Lab for a Manufacturing Technology Online Course // Engineering Education 4.0. Springer, Cham, 2016. P. 547–558.
2. Lens.org. Lens FPGA Remote Lab [Electronic resource]. URL: https://www.lens.org/lens/search/patent/list?q=(fpga%20remote%20lab)&p=0&n=10&s=_score&d=%2B&f=false&e=false&l=en&authorField=author&dateFilterField=publishedDate&orderBy=%2B_score&presentation=false&preview=true&stemmed=true&useAuthorId=false (accessed: 01.04.2025).
3. Фролов К. Д., Американов А. А., Мирошниченко Л. И., Романова И. И., Евтушенко Л. Г. Разработка реконфигурируемого программно-аппаратного комплекса для работы с отладочными платами // Наноиндустрия, 2026. — Т. 19, С. 835–840.

УДК 004.383.5

Оптимальные подходы к имплементации алгоритма шумоподавления изображений Non-Local Means на ПЛИС

Вологин В. В., Зарипов Р. А.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В современных системах обработки видео блок шумоподавления является обязательным этапом обработки, от которого напрямую зависят качество конечного видео. Одним из наиболее оптимальных методов с точки зрения соотношения качества обработки и требуемых ресурсов является алгоритм Non-Local Means, он же является стандартом де-факто. Вместе с тем в научной и прикладной литературе представлено ограниченное число работ, посвященных его реализации на языках описания аппаратуры. В настоящей работе предложены две концептуально различные реализации алгоритма на ПЛИС. Проведен сравнительный анализ двух реализаций. Показано, что каждая из двух реализаций может быть востребована в зависимости от ограничений и условий конкретной задачи.
Ключевые слова: Non-Local Means; шумоподавление изображений; ПЛИС; аппаратная реализация; потоковая обработка.

Optimal approaches to hardware implementation of the Non-Local Means image denoising algorithm on FPGA

Vologin V. V., Zaripov R. A.
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

In modern video processing systems, denoising is a mandatory processing stage that directly affects the quality of the resulting video. Non-Local Means is one of the most efficient algorithms in terms of the trade-off between processing quality and required resources, and is a de facto standard. However, the scientific and applied literature offers a limited number of works on its implementation in hardware description languages. This paper proposes two conceptually different FPGA implementations of the algorithm. A comparative analysis of the two implementations is carried out. It is shown that each implementation can be preferable depending on the constraints and conditions of a specific task.
Keywords: Non-Local Means; image denoising; FPGA; hardware implementation; streaming processing.

Введение

Алгоритм шумоподавления Non-Local Means (NLM) широко используется для подавления шума на изображениях за счет усреднения пикселей или фрагментов изображения с учетом их структурного сходства. В отличие от локальных методов фильтрации, NLM использует информацию не только из ближайшей окрестности,

но и из более широкой области поиска, что позволяет эффективнее сохранять мелкие детали, текстуры и границы объектов. Однако высокая вычислительная сложность алгоритма, обусловленная необходимостью многократного сравнения фрагментов изображения и вычисления весовых коэффициентов, затрудняет его применение в системах реального времени.

Особую актуальность задача приобретает в приложениях, требующих высокой производительности и ограниченного энергопотребления, таких как системы технического зрения, видеонаблюдение, медицинская визуализация и встроенные устройства обработки изображений. Одним из перспективных способов ускорения NLM является реализация на ПЛИС, позволяющая организовать параллельную и потоковую обработку данных, обеспечить предсказуемую задержку и достичь высокой энергоэффективности по сравнению с программными реализациями на универсальных процессорах.

В данной работе рассматриваются оптимальные подходы к аппаратной имплементации алгоритма Non-Local Means на ПЛИС, направленные на снижение вычислительной и аппаратной сложности при сохранении качества шумоподавления. Цель работы состоит в разработке архитектурных решений, обеспечивающих обработку изображений в реальном времени, в том числе для формата Full HD (1920×1080) при тактовой частоте не менее 148,5 МГц, а также в анализе компромиссов между качеством фильтрации, производительностью и потреблением аппаратных ресурсов.

Анализ существующих решений

Алгоритм выглядит следующим образом: для каждого пикселя изображения выбираются две окрестности размера N×N и M×M (N, M — нечетные, N > M) так, что пиксель находится в центре обеих окрестностей. Большая из областей далее называется окном поиска, меньшая — референсным или опорным блоком (патчем). Далее внутри окна поиска необходимо сравнить по метрике SSD [1] референсный блок с остальными патчами, полностью входящими в окно поиска. Таким образом, необходимо выполнить $(N - M + 1)^2$ вычитаний и умножений для каждого пикселя. Далее, получив расстояния между блоками, необходимо вычислить от них экспоненты, таким образом вычисляются веса пикселей в окне поиска. Последним логическим шагом является вычисление средневзвешенного по всему окну поиска значения. Новый пиксель равен именно этому значению. В работе [3] расстояние между блоками вычисляется только для одного смещения, т.е. для каждого опорного блока — только одно расстояние; для полного покрытия области поиска при параметрах N и M требуется $(N - M + 1)^2$ прогонов изображения через алгоритм, что неприемлемо для вычислений в режиме реального времени. Для этого нужно вычислять каждое смещение одновременно, но тогда вместо M^2 умножителей потребуется $(N - M + 1)^2 \cdot M^2$; для N = 21 и M = 7 это около 11 025 только для вычисления весов, что недоступно для многих ПЛИС. В статье [4] архитектура предполагает последовательную обработку каждого фрагмента с длинной задержкой L порядка $(N - M + 1)^2$, что неприемлемо для работы в режиме реального времени. Для потоковой обработки необходимо параллельно вычислять L независимых фрагментов. Итого, для минимального размера фрагмента, равного размеру окна поиска, потребуется $(N - M + 1)^2 \cdot M^2$ умножителей. В работе [5] описан алгоритм 3D-шумоподавления для ПЛИС, работающий в режиме реального времени. Кадры

обрабатываются в формате 720×576 PAL с частотой 25 кадров в секунду. Опорные блоки выбираются с шагом 6 по горизонтали и по вертикали, что отрицательно влияет на качество шумоподавления. Итого, характеристики данного решения для нашей постановки задачи оказываются недостаточными. В статье [6] описана авторская реализация алгоритма шумоподавления для изображений Non-Local Means. Авторам удалось достичь 78 fps при разрешении 640×480, задействовав при этом 87 DSP при частоте 335,4 МГц. При этом было использовано 63 блока RAM (стандартный блок RAM в ПЛИС — 36 Кбит), т. е. задействовано примерно 0,3 МБ. В качестве размеров окон использовались значения 7 и 3. С учетом малого разрешения и малых размеров окон это решение не удовлетворяет современным требованиям к разрешению и качеству шумоподавления; задействует слишком много аппаратных ресурсов по сравнению с предлагаемым решением. Таким образом, существующие решения либо слишком ресурсоемкие, либо обладают слишком высокой задержкой.

Предлагаемый подход

В рамках работы будет рассмотрено 2 реализации алгоритма. Первая — наиболее похожа на стандартные решения и потребует $(N - M + 1)^2 \cdot M^2$ умножений на этапе вычисления весов (здесь и далее не учитываются умножения весов на значения пикселей для вычисления взвешенной суммы, так как во всех случаях это одно и то же значение $(N - M + 1)^2$). Модуль полностью конвейерный, что позволяет достичь удовлетворительного результата при небольших значениях M и N.

Второй подход достигается максимальными оптимизациями первого по количеству умножений. Каждый такт для вычисления расстояний от текущего референсного пикселя до соседних пикселей нужно выполнить $(N - M + 1)^2 \cdot M^2$ умножений. Однако большая часть из этих умножений уже были сделаны для предыдущих по вертикали и горизонтали референсных блоков. Итого уникальными остаются только $(N - M + 1)^2$ умножений на каждый пиксель. Следующая оптимизация — учесть, что если мы посчитали расстояние от референсного блока A до блока B, то расстояние от референсного блока B до блока A вычислять уже не нужно. Из этого следует, что для каждого пикселя необходимо считать расстояния только до предыдущих пикселей. Таким образом, каждый новый пиксель считаем верхним левым пикселем для референсного блока. Рассматриваем все блоки, расстояние до которых нужно вычислить для этого опорного блока. Нужно перемножить новый пиксель на верхние левые пиксели каждого блока. Таких пикселей $(\lfloor N/2 \rfloor - \lfloor M/2 \rfloor)$ строк по $(N - \lfloor M/2 \rfloor)$ и остаток на текущей строке $(\lfloor N/2 \rfloor - \lfloor M/2 \rfloor)$. Итого теоретически минимальное число умножителей (без выборочного перебора опорных патчей) определяется как $(\lfloor N/2 \rfloor - \lfloor M/2 \rfloor) \cdot (N - \lfloor M/2 \rfloor + 1)$ (здесь $\lfloor \cdot \rfloor$ — округление вниз к целому). Каждое умножение при этом используется только один раз. Для $N = 21$ и $M = 7$ это дает 133 умножителя, что уже приемлемо для современных ПЛИС. Снижение числа умножителей достигается ценой увеличения объема используемой памяти для хранения промежуточных результатов, однако общий баланс ресурсов оказывается существенно лучше, чем у известных решений.

Выводы

Разработаны 2 архитектуры аппаратного блока шумоподавления Non-Local Means с потоковой обработкой при скольжении окна поиска и переиспользовании умножений и частичных сумм. Теоретическая оценка показывает сокращение числа

умножителей более чем на порядок по сравнению с [3, 4] при сохранении пропускной способности. Для проверки качества полученного алгоритма с помощью высокоуровневой модели был обработан датасет из изображений разной степени зашумленности. Для сравнения использовалась реализация NLM из библиотеки OpenCV [9] (алгоритм [7]). Различие по метрике PSNR [8] составило не более 1 дБ.

Литература

1. Paramkusam A. V., Reddy V. S. K. An efficient fast full search block matching algorithm with SSD criterion // 2011 Annual IEEE India Conference (INDICON). Hyderabad, India, 2011. DOI: 10.1109/INDCON.2011.6139485.
2. Huang Y.-W., Chen C.-Y., Tsai C.-H., Shen C.-F., Chen L.-G. Survey on Block Matching Motion Estimation Algorithms and Architectures with New Results // Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology, 2006. Vol. 42. P. 297–320. DOI: 10.1007/s11265-006-4190-4.
3. Pizarro Solar R. U. L., Pleskowicz M. Block-matching in FPGA // arXiv preprint arXiv:2006.14105, 2020. URL: https://arxiv.org/abs/2006.14105.
4. Exploring efficient adder compressors for power-efficient sum of squared differences design // IEEE Xplore. Document 9294915. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9294915.
5. Zhang H., Liu W., Wang R., Liu T., Rong M. Hardware Architecture Design of Block-Matching and 3D-Filtering Denoising Algorithm // J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.), 2016. Vol. 21. № 2. P. 173–183. DOI: 10.1007/s12204-016-1709-0.
6. Koizumi H., Maruyama T. An Implementation of Non-Local Means Algorithm on FPGA // Parallel Computing: Technology Trends (Advances in Parallel Computing. Vol. 36) / I. Foster et al. (Eds.). IOS Press, 2020. P. 681–690. DOI: 10.3233/APC200098.
7. Buades A., Coll B., Morel J.-M. Non-Local Means Denoising // Image Processing On Line, 2011. Vol. 1. P. 208–212. DOI: 10.5201/ipol.2011.bcm_nlm.
8. Horé A., Ziou D. Image Quality Metrics: PSNR vs. SSIM // 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). Istanbul, 2010. P. 2366–2369. DOI: 10.1109/ICPR.2010.579.
9. Bradski G. The OpenCV Library // Dr. Dobb's Journal of Software Tools, 2000.

УДК 004.254

Исследование путей развития предвыборщика BERTI

Диденко И. А.

В работе рассматриваются возможности совершенствования архитектуры предвыборщика данных BERTI. Целью исследования является анализ существующих направлений его развития и оценка возможности их интеграции в рамках единой архитектуры. Предполагается провести сравнительное исследование базового BERTI и его модификаций в среде ChampSim.
Ключевые слова: подсистема памяти; аппаратная предвыборка данных; предвыборщик данных; BERTI; кэш первого уровня.

Research into development path of the BERTI prefetcher

Didenko I. A.

This paper examines opportunities for enhancing the architecture of the BERTI data prefetcher. The study aims to analyze existing development trends and evaluate the feasibility of integrating them into a unified architecture. A comparative study of the baseline BERTI and its modified versions will be conducted using the ChampSim environment.
Keywords: memory subsystem; hardware data prefetching; data prefetcher; BERTI; L1 cache.

Разрыв между производительностью вычислительных ядер и задержкой подсистемы памяти сохраняет высокую актуальность аппаратной предвыборки данных. Для современных процессоров уже недостаточно просто предсказать адрес следующего обращения: предвыборщик должен подавать данные своевременно, обеспечивать приемлемые точность и покрытие, а также ограничивать количество избыточных предсказаний. В этом контексте особый интерес представляет BERTI [1], ориентированный на первый уровень кэша данных и использующий идею своевременных местных смещений.

В последние годы BERTI развивается по нескольким направлениям. После исходной работы [1] появились исследования, развивающие основную идею [2]. Показателен Data Prefetching Championship 4 (Четвертый Чемпионат по Предвыборщикам Данных) [3], где были представлены BERTI-ориентированные решения, направленные на повышение контекстной чувствительности, расширение числа распознаваемых закономерностей и улучшение своевременности [4–6]. Это показывает, что BERTI в настоящее время рассматривается не как завершенный механизм, а как развивающееся семейство идей.

При этом существующие работы в основном рассматривают отдельные направления развития BERTI по отдельности. Вопрос о том, могут ли такие улучшения быть совместно использованы в рамках одной архитектуры и дают ли они реальный суммарный эффект по сравнению с базовым алгоритмом, остается открытым. Именно эта задача и определяет содержание данного исследования.

Целью работы является анализ существующих и инновационных направлений развития BERTI и оценка возможности их интеграции в рамках единой архитектуры предвыборщика данных. Для этого предполагается систематизировать

уже предложенные модификации, выделить среди них совместимые и потенциально конфликтующие решения, реализовать базовый вариант BERTI и выбранные расширения в симуляционной среде ChampSim, а затем провести их сравнительное исследование. Оценка будет выполняться по методологии DPC-4.

Литература

1. Navarro-Torres A. et al. Berti: An Accurate Local-Delta Data Prefetcher // MICRO, 2022.
2. Navarro-Torres A. et al. A Complexity-Effective Local Delta Prefetcher // IEEE Trans. Comput., 2025.
3. DPC4 [электронный ресурс]. URL: https://github.com/CMU-SAFARI/DPC-4 (дата обращения: 11.04.2026).
4. Singh S., Navarro-Torres A., Ros A. Pushing the Limits of the Berti Prefetcher // DPC-4, 2026.
5. Posluns G., Jeffrey M. C. Global Berti: Simultaneous Streaming and Spatial Prefetching // DPC-4, 2026.
6. Navarro-Torres A. et al. The Entangling Data Prefetcher // DPC-4, 2026.

УДК 004.052.2

Современные подходы к обеспечению надежности архитектуры комплексных систем

Дьяков Л. И.
Научно-технологический университет «Сириус»
354340, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр-т, 1

Исследуются современные подходы к обеспечению надежности архитектуры сложных систем, анализируются критерии, метрики и методы оценки, сравниваются подходы и предлагается иерархическая систематизация уровней надежности архитектуры.
Ключевые слова: надежность; архитектура комплексных систем; отказоустойчивость.

Modern approaches to ensuring the reliability of complex systems architecture

Dyakov L. I.
Sirius University of Science and Technology
1 Olympic Ave., Sirius Federal Territory, Krasnodar Krai, 354340, Russia

The paper studies modern approaches to ensuring the reliability of complex systems architecture, analyzes the criteria, metrics, and assessment methods, compares the approaches, and proposes a hierarchical systematization of architecture reliability levels.
Keywords: reliability; complex systems architecture; fault tolerance

В работе рассматриваются существующие подходы к обеспечению надежности архитектуры комплексных систем, а также критерии, методики оценки и метрики, применяемые в данной предметной области. Показано, что существующие подходы позволяют оценивать ключевые свойства надежности, однако в полной мере не учитывают ограничения по памяти, вычислительной нагрузке и времени отклика. Для решения сформировавшейся проблемы предлагается подход к систематизации предметной области на основе выделения уровней рассмотрения надежности архитектуры. С последующим выделением ключевых аспектов необходимых для формирования численной оценки надежности.

В качестве результата проведенной работы предлагается структурирование модели надежности архитектуры комплексной системы согласно иерархии уровней рассмотрения, что позволяет систематизировать направления дальнейших исследований для обеспечения ресурсно-эффективной оценки надежности архитектуры комплексной системы.

Литература

1. ISO/IEC 25010:2023. Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Product quality model. — Geneva: ISO, 2023.

2. Dobrica L., Niemelä E. A Survey on Software Architecture Analysis Methods // IEEE Transactions on Software Engineering, 2002. Vol. 28. № 7. P. 638–653. DOI: 10.1109/TSE.2002.1019479.
3. Subramanium L., Hassan S., Osman M. H., Zulzalil H. Reliability Risk Assessment Approaches in Software Engineering: A Review Structured by Software Development LifeCycle (SDLC) Phases and Reliable Sub-Characteristics // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 2025. Vol. 16. № 9. P. 92–102. DOI: 10.14569/IJACSA.2025.0160910.

УДК 004.4'2

Реализация алгоритма Борувки поиска минимального остовного дерева, с использованием библиотеки Spla

Угарова П. П., Кутуев В. А.
Санкт-Петербургский государственный университет, математико-механический факультет, кафедра системного программирования
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

Реализован алгоритм Борувки, в терминах линейной алгебры, с помощью библиотеки Spla, с поддержкой OpenCl, использующий примитивы библиотеки. Реализована поддержка нового примитивного типа в Spla, необходимого для алгоритма. Произведена серия экспериментов с реализованным алгоритмом на разных платформах для сравнения производительности с LaGraph [5] на CPU на плате с RISC-V.
Ключевые слова: Spla; линейная алгебра; алгоритм Борувки; минимальное остовное дерево; OpenCl.

Implementation of Borůvka's Algorithm for Minimum Spanning Tree Using the Spla Library

Ugarova P. P., Kutuev V. A.
Saint Petersburg State University, Faculty of Mathematics and Mechanics, Department of Systems Programming
7–9 Universitetskaya Embankment, Saint Petersburg, 199034, Russia

Borůvka's algorithm for finding the minimum spanning tree has been implemented in terms of linear algebra using the Spla library with OpenCL support, employing the library's primitives. Support for a new primitive type in Spla, required for the algorithm, has been implemented. A series of experiments with the implemented algorithm was conducted on different platforms to compare performance with LAGraph [5] on CPU on a RISC-V board.
Keywords: Spla; linear algebra; Borůvka's algorithm; minimum spanning tree; OpenCL.

Библиотека Spla [1, 2] — это библиотека обобщенной разреженной линейной алгебры с открытым исходным кодом и по на графических процессорах (GPGPU). Использование OpenCL (Open Computing Language) —- открытого стандарта для написания программ, которые используют параллельные вычисления на различных устройствах —- позволяет Spla работать на GPGPU различных производителей, а также на многоядерных процессорах. Spla использует идеи GrpahBLAS [3] и нацелена на разработку алгоритмов анализа графов.

В рамках Spla уже реализован набор алгоритмов анализа, содержащий такие алгоритмы как обход в ширину и PageRank, однако в ней отсутствует алгоритм для поиска минимального остовного леса, который и был реализован в рамках данной работы. Для реализации был выбран алгоритм Борувки, так как он предоставляет естестественные возможности для параллельной реализации через операции линейной алгебры.

В ходе работы был поддержан новый скалярный тип в Spla: пара из номера вершины и веса ребра, для работы со взвешенными графами. А также операции над ним:

1) выбор пары с минимальным весом

$\oplus$ — *min((w1, v1), (w2, v2))*

2) комбинирование, которое берет вес из первой пары, а вершину — из второй

$\otimes$ — *comb((w1, v1), (w2, v2)) = (w1, v2)*

Вместе данные операции образуют то, что в GraphBLAS называется полукольцом, что позволяет выполнять умножение разреженной матрицы на вектор —- операция, необходимая для реализации алгоритма Борувки.

Произведенные с использованием graph-bench [4] замеры производительности (время выполнения считается как среднее значение за 5 запусков алгоритма) показали, что Spla успешно использует параллелизм GPU — на всех устройствах SPLA быстрее CPU-версии, корректно работает на всех тестовых графах, переносима между разными OpenCL-платформами на системе с RISC-V CPU (PowerVR GPGPU, AMD GPGPU, многоядерный RISC-V CPU). Наблюдается существенное отставание от оптимизированной LAGraph реализации (в 30–260 раз). Основной причиной низкой производительности предложенного решения по сравнению с LaGraph является недостаточный набор эффективных примитивов для работы с матрицами и векторами в Spla, что открывает направления для дальнейшей работы.

Литература

1. Egor Orachev, Generalized sparse linear algebra library with vendor-agnostic GPUs acceleration. https://dspace.spbu.ru/items/2aa43d43-60f5-465d-981d-a8078c69297c.
2. Исходный код библиотеки Spla [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/SparseLinearAlgebra/spla.
3. Buluç A. et al. Design of the GraphBLAS API for C // 2017 IEEE international parallel and distributed processing symposium workshops (IPDPSW). –IEEE, 2017. P. 643–652.
4. Исходный код библиотеки graph-bench [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/EgorOrachyov/graph-bench.
5. Исходный код библиотеки LAGraph [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/GraphBLAS/LAGraph.

УДК 004.4'22

Оптимизация произведения Кронекера для библиотеки SuiteSparse:GraphBLAS

Арзамасцева Е. А., Кутуев В. А.
Санкт-Петербургский государственный университет, математико-механический факультет, кафедра системного программирования
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Добавлена фильтрация нулевых элементов на этапе вычисления в алгоритм произведения Кронекера для разреженных матриц в SuiteSparse:GraphBLAS. Реализовано JIT-ядро для актуальной версии библиотеки. В результате снижено пиковое потребление памяти произведением Кронекера.
Ключевые слова: SuiteSparse:GraphBLAS; произведение Кронекера; разреженные матрицы; JIT-компиляция; статический анализ кода.

Kronecker Product Optimization for the SuiteSparse:GraphBLAS Library

Arzamastseva E. A., Kutuev V. A.
Saint Petersburg State University, Faculty of Mathematics and Mechanics, Department of Systems Programming
7–9 Universitetskaya Embankment, Saint Petersburg, 199034, Russia

Zero-element filtering at the computation stage has been added to the Kronecker product algorithm for sparse matrices in SuiteSparse:GraphBLAS. A specialized JIT kernel has been implemented for the current version of the library. As a result, the peak memory consumption of the Kronecker product has been reduced.
Keywords: SuiteSparse:GraphBLAS; Kronecker product; sparse matrices; JIT compilation; static code analysis.

Алгоритмы достижимости с ограничениями в виде контекстно-свободных языков, основанные на операциях линейной алгебры и использующиеся для статического анализа кода, могут быть основаны на произведении Кронекера [1]. При вычислении произведения Кронекера для разреженных матриц возникает проблема избыточного потребления памяти: результирующая матрица содержит большое число нулевых элементов, которые требуют выделения большого объема памяти. В актуальной версии библиотеки SuiteSparse:GraphBLAS [2] фильтрация ненулевых элементов выполняется после построения результата, что приводит к высокому пиковому потреблению памяти и ограничивает применимость алгоритмов на больших графах.

В работе предложен алгоритм вычисления произведения Кронекера с ранней фильтрацией элементов. Основная идея заключается в предварительной оценке количества ненулевых значений результирующей матрицы и выделении памяти только под них. Таким образом, выделение памяти выполняется только под значащие элементы результата, что позволяет избежать избыточного потребления памяти [3]. Для сохранения преимуществ JIT-компиляции, реализованной в SuiteSparse:GraphBLAS, добавлено специализированное JIT-ядро. Алгоритм

адаптирован к актуальной версии библиотеки SuiteSparse:GraphBLAS и учитывает особенности ее внутреннего представления разреженных матриц.

Проведенное экспериментальное исследование алгоритма показало, что на данных, характерных для различных задач статического анализа кода (например alias analysis и points-to анализ) удается снизить пиковое потребление памяти и уменьшить время выполнения операции по сравнению со стандартной реализацией, при сохранении корректности результатов и стабильности работы на различных наборах входных данных (графы программ и рекурсивные автоматы). Экспериментальное исследование заключалось в проведении 40 запусков алгоритма на входном наборе матриц, полученных в результате работы алгоритма статического анализа на реальных программах. Результаты замеров сгруппированы по названию анализируемого проекта (ось X графиков). На графиках время неоптимизированной версии считается как сумма времени на вычисление Кронекера и время на фильтрацию ненулевых элементов.

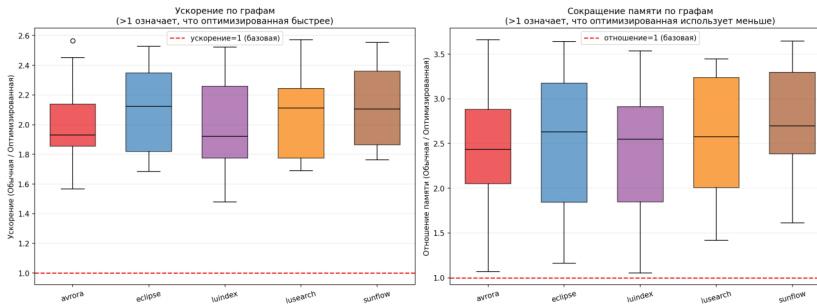


Рис. 1. Результаты экспериментов на RISC-V (Banana Pi BPI-F3)

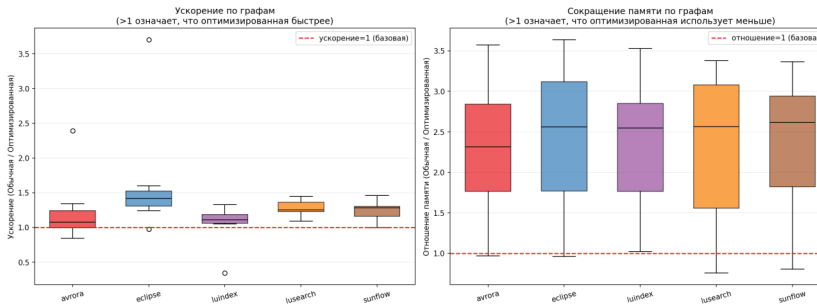


Рис. 2. Результаты экспериментов на Intel Core i5 1340P

Предложенное решение повышает практическую применимость алгоритмов, основанных на произведении Кронекера, для анализа больших графов и может быть использовано при дальнейшем развитии библиотек линейной алгебры для задач анализа программ.

Литература

1. Orachev, E., Epelbaum, I., Azimov, R., Grigorev, S. (2020). Context-Free Path Querying by Kronecker Product. In: Darmont, J., Novikov, B., Wrembel, R. (eds) Advances in Databases and Information Systems. ADBIS 2020. Lecture Notes in Computer Science (), vol 12245. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54832-2_6.
2. Исходный код библиотеки SuiteSparse:GraphBLAS [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/SparseLinearAlgebra/GraphBLAS.
3. Experimental investigation of context-free-language reachability algorithms as applied to static code analysis. Kutuev Vladimir. URL: https://dspace.spbu.ru/items/36014e9c-fae5-4793-9f17-7c1ddfc3421c.

УДК 004.4(2), ГСНТИ 50.41.25

Веб-интегрированная среда разработки LABCDE для автоматизированной проверки лабораторных работ по программированию

Остроушко М. В., Романова И. И., к. т. н. Американов А. А.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
miviostroushko@edu.hse.ru, iromanova@hse.ru, aamerikanov@hse.ru

Представлена веб–IDE LABCDE для обучения C, C++ и Python: единое браузерное компиляторное окружение, автоматизированная система тестирования, поддержка CMake, Doxygen и Git. Автопроверка сокращает время оценки лабораторной работы с 10–15 минут до 30 секунд.
Ключевые слова: веб–IDE; автопроверка кода; изолированное выполнение; CMake; Doxygen; Git–интеграция; обучение программированию.

Web-integrated development environment LABCDE for automated assessment of programming assignments

Ostroushko M. V.[1], Romanova I. I.[1], Amerikanov A. A.[1], Ph.D
National Research University Higher School of Economics (Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics)
34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia
miviostroushko@edu.hse.ru, iromanova@hse.ru, aamerikanov@hse.ru

A web-based IDE, LABCDE, for teaching C, C++ and Python is presented: a unified browser-based compiler environment, an automated testing system, and support for CMake, Doxygen and Git. Automated assessment reduces the evaluation time of a laboratory assignment from 10–15 minutes to 30 seconds.
Keywords: web-IDE; automated code assessment; sandboxed execution; CMake; Doxygen; Git integration; programming education.

Систематическое освоение C, C++ и Python осложняется инфраструктурными барьерами: настройка компиляторных цепочек занимает значительное время и требует компетенций, не связанных с дисциплиной; неравенство вычислительных ресурсов порождает различия в среде выполнения; проверка работ в разнородных окружениях занимает 10–15 минут на каждую [1–2].

LABCDE –веб–IDE, доступная через браузер без локальной установки. Серверная часть построена на Sanic (Python 3.10+) с микросервисной архитектурой; компиляция выполняется GCC 11.x и Python 3.10+; данные хранятся в MongoDB. Редактор Ace Editor поддерживает C11, C++17 и Python 3.x с автодополнением и автосохранением; вывод передается через WebSocket в реальном времени [3].

В рамках исследования решены задачи: проектирование асинхронной веб–IDE с минимальной латентностью; разработка многоуровневой системы безопасности выполнения кода (AST–анализ, ресурсные ограничения); реализация системы автотестирования с экспортом результатов в CSV и PDF.

Дополнительно реализованы: поддержка CMake и генерация документации Doxygen; интеграция с Git (push, ветки, ZIP–экспорт); административный раздел с ролевой моделью и синхронизацией со средой BuildIn; метрики выполнения (CPU, память); поддержка PWA через manifest и service worker [4].

Сравнительная оценка LABCDE с аналогами (OnlineGDB, ideone, Codeforces) методом функционального анализа выявила преимущество по образовательно–ориентированным характеристикам: системе проектов, истории запусков, автотестированию и CMake–сборке. Время компиляции –0,5–2 с; автопроверка сокращает оценку с 10–15 минут до 30 секунд. Платформа внедряется в МИЭМ НИУ ВШЭ.

Новизна

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: (1) архитектура образовательной веб–IDE с изолированным многоязыковым окружением (C, C++, Python) и латентностью компиляции 0,5–2 с без локальной установки ПО; (2) многоуровневая система безопасности выполнения кода: AST–анализ для Python, проверка вызовов для C/C++, ресурсные ограничения; (3) система автотестирования, сокращающая оценку лабораторной работы с 10–15 минут до 30 секунд.

Благодарности

Публикация подготовлена в ходе проведения исследования (№ 26-00-037 «Разработка удаленной автоматизированной исследовательской образовательной платформы по проектированию цифровых устройств и встраиваемых систем с применением аппаратных средств и искусственного интеллекта») в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)».

Литература

1. Ihantola P. et al. Review of Recent Systems for Automatic Assessment of Programming Assignments // Koli Calling. –ACM, 2010. P. 86–93.
2. Ala–Mutka K. M. A Survey of Automated Assessment Approaches for Programming Assignments // Computer Science Education, 2005. Vol. 15. № 2. P. 83–102.
3. Dosilovic H. Z., Mekterovic I. Robust and scalable online code execution system // MIPRO. –IEEE, 2020. P. 1627–1632.
4. Majchrzak T. A. et al. Progressive Web Apps: the Definite Approach to Cross–Platform Development? // HICSS. –IEEE, 2018. P. 5735–5744.

УДК 004.272.43

Разработка легковесных арбитров на основе характеристик пакетов сетей на кристалле

Маликов М. А., д. т. н., доц. Романов А. Ю.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
mmalikov@hse.ru, a.romanov@hse.ru

Представлены новые легковесные арбитры, учитывающие количество переходов и расстояние до адресата в сети на кристалле. Проведен их сравнительный анализ, определены лучшие легковесные арбитры, а также сильные и слабые стороны каждого из них.
Ключевые слова: сеть на кристалле; СтнК; арбитр; арбитраж; маршрутизация; маршрутизатор; моделирование.

Development of lightweight network-on-chip arbiters based on packet characteristics

Malikov M. A., Sc.D, Assoc. Prof. Romanov A. Yu.
HSE University
20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russia
mmalikov@hse.ru, a.romanov@hse.ru

New lightweight arbiters that consider the number of hops and the distance to the destination address in a network-on-chip are presented. Their comparative analysis is carried out, the best lightweight arbiters are identified, as well as the strengths and weaknesses of each of them.
Keywords: network-on-chip; NoC; arbiter; arbitration; routing; router; simulation.

Сеть на кристалле (СтнК) в отличие от классических шин [1] используется для одновременного выполнения множества передач данных между ядрами. Для разрешения конфликтов при одновременных запросах одного порта маршрутизатора сети используются арбитры [2].

Основой для большинства простых арбитров служат схемы с циклическим приоритетом (Round-Robin, RR). Их главное преимущество заключается в том, что они гарантируют, что ни один активный вход не останется без обслуживания, при этом они просты в реализации и потребляют мало ресурсов [3]. Но арбитры на основе RR не всегда эффективны, а усложнение схем приводит к увеличению аппаратных затрат по площади и энергопотреблению.

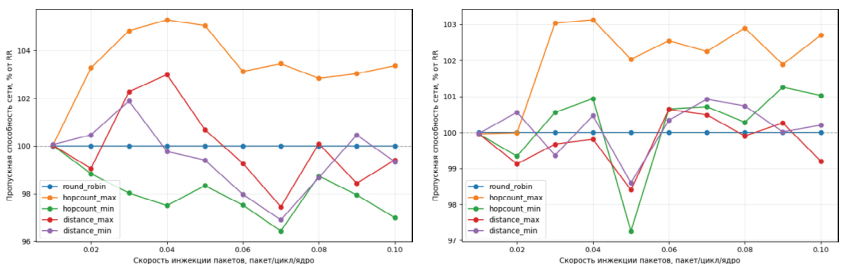
В данной работе рассматриваются новые легковесные аппаратно-реализуемые алгоритмы арбитража для СтнК, анализируется их влияние на характеристики сети, а также обсуждаются их преимущества и ограничения. Для повышения производительности СтнК без изменения аппаратных затрат используются характеристики пакетов в сети. В данной работе предлагаются 4 новых легковесных арбитра для СтнК на основе характеристик пакетов:

1. Hopcount-max (приоритет пакетам с максимальным количеством пройденных переходов);

2. Hopcount-min (приоритет пакетам с минимальным количеством пройденных переходов);
3. Distance-max (приоритет пакетам с максимальным расстоянием до адресата);
4. Distance-min (приоритет пакетам с минимальным расстоянием до адресата).

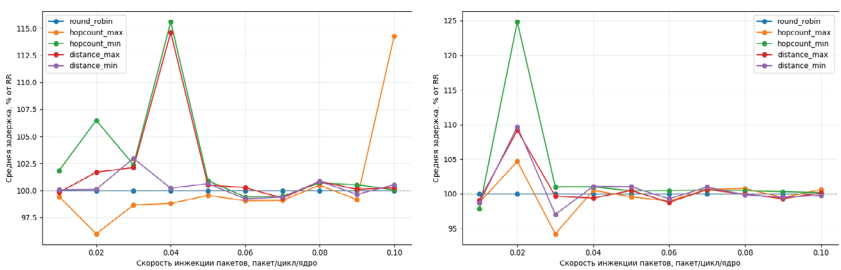
Для исследования арбитров был выбран симулятор СтнК Booksim2.0 [4], т. к. в нем есть все необходимые настройки, а также готовые классы для арбитров. Моделирование проводилось для СтнК с топологией mesh, были рассмотрены все синтетические распределения трафика при различной загруженности сети.

В результате проведенного моделирования было показано, что новые арбитры позволяют улучшить характеристики СтнК, такие как средняя задержка и пропускная способность. Наибольшее улучшение достигается при использовании арбитра hopcount-max, который отдает приоритет пакетам с максимальным количеством переходов. Данное улучшение показано на рис. 1–2.



а *б*

Рис. 1. Зависимость пропускной способности сети от скорости инжекции пакетов при трафике (*а*) transpose, (*б*) shuffle



а *б*

Рис. 2. Зависимость средней задержки в сети от скорости инжекции пакетов при трафике (*а*) transpose, (*б*) shuffle

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

5) предложенные арбитры требуют аппаратных затрат, сопоставимых затратам на реализацию классического round-robin;
6) предложенные арбитры позволяют повысить производительность СтнК;
7) наибольшее улучшение производительности достигается при использовании арбитра с приоритетом для пакетов, которые прошли наибольшее количество переходов;
8) адаптивный выбор из нескольких арбитров может повысить производительность СтнК при различных условиях.

Результаты данного исследования были получены в рамках гранта РНФ № 25-11-00248, https://rscf.ru/project/25-11-00248.

Литература

1. Benini L., De Micheli G. Networks on chips: a new SoC paradigm // Computer, 2002. Vol. 35. № 1. P. 70–78.
2. Jain K. et al. Problems encountered in various arbitration techniques used in NOC router: A survey // 2015 International Conference on Electronic Design, Computer Networks & Automated Verification (EDCAV). IEEE, 2015. P. 62–67.
3. Debbarma J., Banik R., Debbarma D. Energy-efficient network-on-chip routers using a power gated Round Robin arbiter ensuring minimal impact on latency // Results Eng, 2025. Vol. 28. P. 108148.
4. Jiang N. et al. A detailed and flexible cycle-accurate Network-on-Chip simulator // 2013 IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS). IEEE, 2013. P. 86–96.

УДК 536.37

Композитные теплораспределяющие элементы и искусственные подложки на основе алмаза. Обзор

Козлов В. А., к. ф.-м. н.
[1] *АО «ПК «ФИД-Техника»*
124223, г. Санкт-Петербург, пр-т Тореза, 68 В
kozlov@fidtech.com
[2] *Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук*
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
(ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Рассмотрены особенности характеристик и технологий производства высокотеплопроводных композиционных материалов на основе алмаза (композитов класса алмаз-металл, композитов класса алмаз-полупроводник, композитов класса алмаз-диэлектрик) и искусственных подложек со слоями алмаза. Сделан обзор состояния работок и производства теплораспределяющих элементов на основе алмазных материалов в мире и в России.
Ключевые слова: теплораспределяющие элементы; композиты алмаз-металл; композиты алмаз — полупроводник; композиты алмаз- диэлектрик; теплопроводность; температуропроводность; кремний; карбид кремния; нитрид алюминия.

Diamond-based composite heat spreader elements and engineered substrates. A review

Kozlov V. A.[1,2], Ph.D
[1] *PK "FID-Tekhnika" JSC*
68B Toreza Ave., Saint Petersburg, 124223, Russia
kozlov@fidtech.com
[2] *Ioffe Institute*
26 Politekhnicheskaya St., Saint Petersburg, 194021, Russia

This article examines the characteristics and production technologies of highly thermally conductive diamond-based composite materials (diamond-metal composites, diamond-semiconductor composites, and diamond-insulator composites) and engineered substrates with diamond layers. It also reviews the current state of development and production of diamond-based heat spreader elements worldwide and in Russia as well.
Keywords: heat spreader elements; diamond-metal composites; diamond-semiconductor composites; diamond-insulator ceramic composites; thermal conductivity; thermal diffusivity.

По мере того как полупроводниковые устройства становятся все мощнее и эффективнее, а размеры кристаллов продолжают снижаться, уровень тепловой мощности, которую необходимо отводить от полупроводниковых элементов, неуклонно возрастает. Наиболее остро проблемы отвода тепла от кристаллов встают сегодня для полупроводниковых приборов СВЧ-электроники в составе фазированных

антенных решеток. Так для мощных «GaN-on-SiC» СВЧ- транзисторов уже реально достжимы рабочие плотности мощности в 30–40 Вт/мм. При этом известно, что при использовании обычных медных теплоотводов и традиционных технологий сборки даже при уровне в 10 Вт/мм пиковая импульсная температура канала в таких СВЧ-транзисторах может превышать 300 °C. Такой высокий уровень перегрева кристалла снижает надежность транзисторов и ограничивает их время наработки до отказов уровнем не более 100 часов. Поэтому для реализации потенциальных возможностей современных СВЧ-транзисторов, а также полупроводниковых приборов силовой электроники, мощных полупроводниковых излучателей и высокопроизводительных процессоров сегодня требуются новые технологии охлаждения и материалы, способные обеспечить отвод тепла от кристаллов с мощностью тепловыделения вплоть до 10 кВт/см^2 [1].

Важнейшими условиями достижения высокой эффективности и надежности систем отвода тепла от полупроводниковых кристаллов является использование материалов с предельно высокими значениями теплопроводности и температуропроводности. При этом коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) материала теплораспределяющих элементов (теплоотводов) должен быть предельно близким к КЛТР полупроводникового кристалла, монтируемого на этот теплоотвод. Поэтому только алмаз и композиты на его основе рассматриваются сегодня наиболее реальными кандидатами для практической реализации систем охлаждения с мощностью теплоотводов превышающей уровень 5 кВт/см^2 при температуре кристалла не более 170–250 °C.

В настоящем обзоре дается краткий анализ состояния работ и характеристик новых алмазных материалов для отвода тепла от приборов полупроводниковой электроники. В первой части доклада рассмотрены три основные группы композитов на основе синтетических алмазов: композиты алмаз — металл (медь-алмаз, серебро-алмаз и алюминий-алмаз), композиты алмаз-полупроводник (алмаз-карбид кремния- кремний и алмаз-карбид кремния) и композиты алмаз-диэлектрик (алмаз-нитрид алюминия). Рассмотрены основные особенности характеристик, достоинства и недостатки данных материалов, а также технологии их изготовления и обработки. Особое внимание уделяется отечественным композитам и в особенности- классу алмазных «полупроводниковых» композитов АКК «Скелетон» [2]. Данный класс алмазных композитов наиболее изучен и уже освоен в опытном производстве при изготовлении перспективных изделий оптики и механики. В обзоре будут рассмотрены перспективы использования этого материала в полупроводниковой электронике. Также будут представлены примеры изготовления различных теплоотводов и теплораспределяющих элементов из композитов АКК «Скелетон» [3] и «Медь-Алмаз» [4] от отечественных разработчиков (ЦНИИМ им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербургского государственного технологического института, ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, АО «ПК «ФИД-Техника», Учреждения Науки «ИКЦ СЭКТ»), а также и от зарубежных компаний-производителей алмазных композитов (MA.L.M.T. Corp., Coherent Corp., SemiXicon LLC, Element Six of Oxford — the De Beers Group, Nano Materials International Corporation (NMIC), Tecnisco. Ltd., Tomoe Engineering Co., Diamond Semicon, CrysCarbon Technology...).

Вторая часть доклада посвящена краткому рассмотрению возможных вариантов изготовления искусственных алмазно-композитных подложек (engineered substrates) для производства теплоотводящих элементов и приборных структур

полупроводниковой электроники. Такие подложки могут быть выполнены на основе комбинации из опорной пластины алмазного композита (например — АКК «Скелетон») и нанесенного на ее поверхность тонкого слоя полупроводника (например- поликристаллического кремния). В последующем, в зависимости от дальнейших конкретных применений, к этому слою кремния на основе из АКК «Скелетон» могут быть присоеденены монокристаллические пленки других полупроводниковых материалов (алмаза, карбида кремния, нитрида галлия, и других) с использованием технологий Wafer Bonding и Smart-Cut. В заключении доклада будут сформулированы задачи, которые требуют решения для организации в России опытного и серийного производства алмазных композитов и искусственных подложек (проведение необходимых дополнительных НИР и/или ОКР, разработка СТО, апробация использования новых алмазных материалов и оборудования для решения перспективных задач конкретных промышленных организаций — потребителей теплоотводов и теплораспределяющих элементов.

Литература

1. Ao S., Shau N., Xu B., Chen Z. Micrometer-scale composite pin-fin diamond microchannel heat sink for near-10-kilowatt-level chip thermal management // Energy, 2025. 333, Article 137392.
2. Гордеев С. К. Алмазокарбидокремниевые композиционные материалы АКК «Скелетон» (Обзор) // Вопросы материаловедения, 2024. — № 1 (117). — С. 99–116.
3. Kidalov S. V., Shakhov F. M. Thermal Conductivity of Diamond Composites A Reviev) // Materials, 2009. № 2. P. 2467–2495.

УДК 621.375

Исследование тепловых и электрических характеристик СВЧ-усилителя мощности в корпусе QFN

Шеденко В. В., Увайсов С. У., д. т. н.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78
shedenkovv@mail.ru, uvajsov@mirea.ru

Исследован теплоотвод СВЧ-усилителей мощности в корпусах QFN. Проведен анализ влияния параметров конструкции и материалов на тепловое сопротивление кристалла. Проанализировано влияние конструктивно-технологических факторов на тепловое сопротивление кристалла. Предложен подход к оптимизации тепловых и паразитных электрических параметров, повышающий надежность полупроводниковых приборов.
Ключевые слова: СВЧ-усилитель мощности; тепловые режимы; конфигурации корпуса; электрические паразитные параметры; эквивалентное тепловое сопротивление.

Thermal and Electrical Characterization of Microwave Power Amplifiers in QFN Packages

Shedenko V. V., Uvaysov S. U., Doctor of Engineering Sciences, Professor
MIREA — Russian Technological University
78 Vernadskogo Ave., Moscow, 119454, Russia
shedenkovv@mail.ru, uvajsov@mirea.ru

The heat dissipation of microwave power amplifiers in QFN packages is investigated. The impact of structural and technological factors on the thermal resistance of the chip is analyzed. An approach for optimizing thermal and parasitic electrical parameters is proposed to improve the reliability of semiconductor devices.
Keywords: microwave power amplifier; thermal performance; package configurations; parasitic electrical parameters; equivalent thermal resistance.

Усилители мощности СВЧ-диапазона являются ключевыми элементами современных радиотехнических и телекоммуникационных систем, включая радиолокацию, спутниковую связь, системы беспроводной передачи данных и силовую электронику высокочастотного диапазона. В условиях роста выходной мощности и уменьшения габаритов приборов существенно возрастает плотность тепловыделения, что приводит к перегреву активной области кристалла, деградации параметров и снижению надежности устройства [1]. Проблема теплоотвода наиболее критична для компактных корпусов QFN. Компактное исполнение, обеспечивающее удобство монтажа, одновременно затрудняет рассеивание мощности. В связи с этим актуальной задачей является разработка конструктивных решений, направленных на снижение теплового сопротивления системы «кристалл–корпус–печатная плата» с учетом используемых материалов и технологических ограничений, а также обеспечение согласованности тепловых и электрических характеристик СВЧ-приборов [2].

В рамках исследования были проанализированы несколько вариантов конструктивного исполнения SMD-корпуса, отличающихся параметрами теплопроводящих элементов. Рассматривались базовая конфигурация корпуса, а также модификации с увеличенным диаметром и количеством тепловых переходных отверстий, с увеличенной толщиной металлического основания и с увеличенной площадью центральной тепловой площадки. Отдельно исследована конфигурация с утолщенной центральной тепловой площадкой, проходящей через вырез в металлической печатной плате и обеспечивающей непосредственный тепловой контакт с теплоотводом. Такой набор конфигураций позволил оценить влияние геометрических параметров корпуса на эквивалентное тепловое сопротивление теплового тракта и температурный режим усилителя мощности СВЧ.

Также в рамках работы проведен анализ электрических параметров усилителя мощности СВЧ с учетом выбранных конструктивных решений корпуса. Моделирование электрических характеристик выполнялось в системе автоматизированного проектирования ADS Keysight.

Литература

1. Thermal management and packaging of wide and ultra-wide bandgap power devices: a review and perspective / Y. Qin, B. Albano, J. Spencer et al. // Journal of Physics D: Applied Physics, 2023. Vol. 56. № 9. № 093001. URL: https://doi.org/10.1088/1361-6463/acb4ff (дата обращения: 06.05.2026).
2. Yuan, Z. Effect of thermal via design on heat dissipation of high-lead QFN packages mounted on PCB / Z. Yuan, D. Ding, W. Zhang // Applied Sciences, 2023. Vol. 13. № 23. № 12653. URL: https://doi.org/10.3390/app132312653 (дата обращения: 08.05.2026).

УДК 621.382.323

Модель порогового напряжения силового МДП-транзистора щелевого типа на основе GaN

Беляев А. О.[1,2,3], Баранов Г. В.[1,2,3], к. ф.-м. н., Дорофеев А. А.[2,3], Леоненков Е. И.[2], Емельяненко Ю. А.[1,2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
abelyaev@niime.ru, gbaranov@niime.ru, adorofeev@niime.ru, eleonenkov@niime.ru, yuemelyanenko@niime.ru
[3] ООО «НИИМЭ-МД»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В работе анализируются модельные представления для объяснения эффекта заниженного значения порогового напряжения в GaN МДП-транзисторе щелевого типа. Разработана и валидирована модель, учитывающая неоднородную активацию атомов Mg при распаде комплексов Mg-H в процессе термического отжига.
Ключевые слова: GaN; trench MISFET; частичная ионизация; пороговое напряжение; моделирование.

A Threshold Voltage Model for GaN Trench-Gate Power MISFETs

Belyaev A. O.[1,2,3], Baranov G. V.[1,2,3], Ph.D, Dorofeev A. A.[2,3], Leonenkov E. I.[2], Emelyanenko Yu. A.[1,2]
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
abelyaev@niime.ru, gbaranov@niime.ru, adorofeev@niime.ru, eleonenkov@niime.ru, yuemelyanenko@niime.ru
[3] MERI-MD, LLC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

This work analyzes modeling approaches to explain the reduced threshold voltage behavior observed in GaN trench-gate MOSFETs. A model accounting for non-uniform Mg activation due to the dissociation of Mg–H complexes during thermal annealing is developed and validated.
Keywords: GaN; trench MISFET; incomplete ionization; threshold voltage; modeling.

Изделия силовой электроники глубоко проникли во все сферы человеческой жизнедеятельности –от бытовых устройств до техники военного и космического применения. Ключевым направлением развития современной силовой электроники является разработка ЭКБ на основе широкозонных полупроводников (SiC, GaN, Ga_2O_3, Алмаз и др.) [1]. По сравнению с кремниевыми аналогами, эти материалы

обеспечивают более высокую скорость переключения приборов, более низкое сопротивление, более высокий КПД и меньшие габариты приборов. Среди них технологии на основе GaN представляют особый интерес для развития в Российской Федерации, что обусловлено наличием технологических площадок с полным циклом производства.

В качестве объекта исследования рассматривается силовой GaN МДП-транзистор щелевого типа (рис. 1). Данный прибор представляет собой эпитаксиальную полупроводниковую структуру типа n-p-n, в которой затвор конфигурации МДП расположен на вертикальной стенке щели. При приложении положительного потенциала к затвору происходит обеднение дырками приповерхностной области p-GaN, а при достижении порогового напряжения формируется инверсный канал вертикального направления.

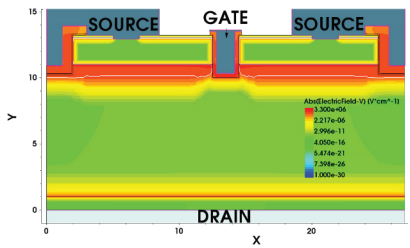


Рис. 1. Вертикальный GaN МДП-транзистор щелевого типа

В литературе зачастую отмечается, что измеренное значение порогового напряжения значительно ниже теоретического. Среди предложенных модельных представлений для объяснения расхождения можно выделить следующие:

1) образование слоя с меньшей концентрацией акцепторов за счет компенсации донороподобными вакансиями азота во время плазменной обработки поверхности (при травлении щели) [2];
2) изменение профиля распределения акцепторов вследствие эффекта частичной ионизации Mg (случай неравномерного распределения) и наличие высоких концентраций встроенных зарядов на границе раздела GaN/диэлектрик [3];
3) изменение профиля распределения акцепторов вследствие эффекта частичной ионизации Mg (случай равномерного распределения) [3];
4) неполная активация атомов Mg, вызванная неизбежной пассивацией водородными связями в процессе эпитаксиального роста [4].

Первые две модели не получили широкого распространения, поскольку имеют узкие границы применения и могут описывать только частные эксперименты. Третья модель может описывать эксперименты с различными концентрациями Mg, но не применима при изменении режима активации и в некоторых случаях предполагает наличие отрицательных зарядов на границе раздела GaN/диэлектрик. На сегодняшний день четвертая модель имеет лучшее согласование с экспериментами, однако концентрация активированных атомов Mg определяется методом подгонки.

В данной работе представлена феноменологическая модель, определяющая профиль распределения активированной доли атомов Mg при обработке структуры термическим отжигом. Считается, что легирование магнием в процессе металлоорганического химического осаждения из газовой фазы (MOCVD) приводит к получению полуизолирующих слоев, что связывают с образованием комплексов Mg-H. В случае термического отжига, одного из самых распространенных механизмов активации Mg, предполагается диссоциация комплексов Mg-H и десорбция водорода через открытую поверхность [5]. В модели предполагается, что до отжига каждый атом магния связан с водородом и является электронейтральным, во время отжига атомы водорода становятся подвижными и вследствие градиента концентрации движутся к границе GaN-N_2. Таким образом, концентрация активированных атомов Mg [$N_{Mg(Ga)}$] представляется в виде разности химической концентрации магния [N_{Mg}] и концентрации десорбированных атомов [H], распределение которых определяется уравнением диффузии, основанном на эффекте поверхностного барьера [6]. В программе приборно-технологического моделирования реализована модель транзистора, где используется полученное распределение активированных атомов Mg в слое p-GaN. Параметры модели калибровались на основе работы [7].

Модель адекватно воспроизводит не только выходную вольт-амперную характеристику (ВАХ) транзистора, но и ВАХ тестовых элементов «body bias» из [8], представленные на рис. 2.

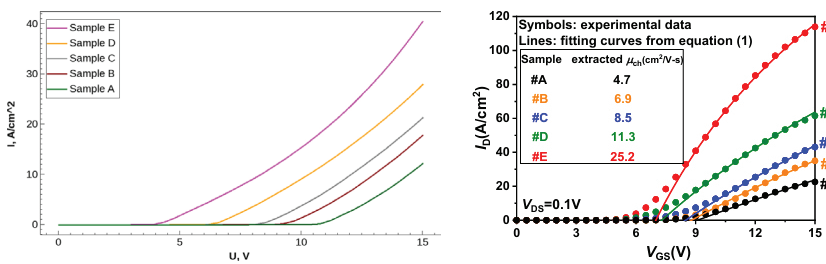


Рис. 2. Входная ВАХ МДП-транзистора щелевого типа на основе GaN: модель (слева), эксперимент (справа)

Литература

1. Анализ приборных требований к гетероэпитаксиальным структурам AlGaN/GaN на Si для силовой и СВЧ ЭКБ / Г. В. Баранов, А. О. Беляев, А. А. Дорофеев и др. // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 4 (188). — С. 5–17. — DOI: 10.7868/S2410993222040017. — EDN JERFSF.
2. Fujishima T., Otake H., Ohta H. Reduction in threshold voltages in GaN-based metal oxide semiconductor field effect transistors // Applied Physics Letters, 2008. Vol. 92. № 24.
3. Sharabani Y. et al. Interfacial Charge Dynamics in Metal-Oxide–Semiconductor Structures: The Effect of Deep Traps and Acceptor Levels in Ga N // Physical Review Applied, 2020. Vol. 13. № 1. P. 014007.

4. Borga M. et al. Mg activation anneal of the p-GaN body in trench gate MOSFETs and its effect on channel mobility and threshold voltage stability // Applied Physics Letters, 2024. Vol. 124. № 11.
5. Miyachi M. et al. The activation of Mg in GaN by annealing with minority-carrier injection // Applied physics letters, 1998. Vol. 72. № 9. P. 1101–1103.
6. Narita T. et al. Quantitative investigation of the lateral diffusion of hydrogen in p-type GaN layers having NPN structures // Applied Physics Express, 2019. Vol. 12. № 1. P. 011006.
7. Oka T. et al. Vertical GaN-based trench metal oxide semiconductor field-effect transistors on a free-standing GaN substrate with blocking voltage of 1.6 kV // Applied Physics Express, 2014. Vol. 7. № 2. P. 021002.
8. Zhu R. et al. Effects of p-GaN body doping concentration on the ON-state performance of vertical GaN trench MOSFETs // IEEE Electron Device Letters, 2021. Vol. 42. № 7. P. 970–973.

УДК 621.382.333.34

Исследование и сравнительный анализ с применением TCAD-моделей конструктивно-технологических решений для формирования активной области IGBT

Абрашин П. С.[1,2]
[1] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] *АО «Ангстрем»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Площадь Шокина, 2/3

В работе выполнен сравнительный анализ конструктивно-технологических решений для активной области IGBT с использованием TCAD-моделирования. Исследовано влияние CS-слоя, заглубленных P-слоев, утопленных эмиттерных канавок, а также схемы подключения фиктивных канавок на компромисс $U_{КЭ.НАС}$–$E_{ВЫКЛ}$, характеристики переключения и область безопасной работы.
Ключевые слова: IGBT; TCAD; активная область; CS-слой; фиктивные канавки; кривая компромисса; область безопасной работы.

Study and Comparative Analysis of Design and Technology Solutions for the Formation of the IGBT Active Region Using TCAD Models

Abrashin P. S.[1,2]
[1] *National Research University of Electronic Technology (MIET)*
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[2] *"Angstrem" JSC*
2/3 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

In this work, a comparative analysis of design and technology solutions for the IGBT active region was performed using TCAD simulation. The influence of CS layer, buried P-layers, recessed emitter trenches, as well as the connection scheme of dummy trenches on the V_{CEsat}–E_{off} trade-off, on switching performance, and on the SOA was investigated.
Keywords: IGBT; TCAD; active area; CS-layer; dummy trench; trade-off; SOA.

Развитие биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) направлено на улучшение компромисса между статическими ($U_{КЭ.НАС}$) и динамическими ($E_{ВЫКЛ}$) потерями. Ключевым направлением оптимизации является модификация активной области: введение слоев накопления носителей (CS), фиктивных канавок, заглубленных P-слоев [1–2].

Цель работы — сравнительное исследование влияния конструктивных параметров активной области 1700-В IGBT на его характеристики с использованием TCAD-моделирования. Задача заключалась в моделировании структур с закороченными и плавающими фиктивными канавками, с различным профилем распределения примеси CS-слоя, с заглубленными P-слоями и утопленными эмиттерными канавками, а также анализе компромисса $U_{КЭ.НАС}$–$E_{ВЫКЛ}$, dI/dt при включении, dU/dt при выключении и устойчивости к короткому замыканию и защелкиванию.

Электрофизический расчет выполнен в среде Synopsys Sentaurus TCAD с учетом саморазогрева, температурно-зависимых моделей подвижности, рекомбинации (ШРХ, Оже) и ударной ионизации.

Введение CS-слоя позволяет снизить $U_{КЭ.НАС}$ за счет удержания дырок под областью P-базы, однако при увеличении концентрации легирования N-CS снижается пробивное напряжение из-за роста пика поля на переходе P-база/N-CS. Применение заглубленного P-слоя под дном канавки обеспечивает компенсацию заряда, экранирует CS-слой и позволяет повысить его уровень легирования, дополнительно снижая $V_{КЭ.НАС}$ без потери пробивного напряжения [3, 4]. Использование утопленных эмиттерных канавок изменяет путь тока дырок, отводя их от N^+-эмиттера, что увеличивает ток короткого замыкания, сохраняя устойчивость к защелкиванию [5]. Структура с плавающими фиктивными канавками обеспечивает минимальный $U_{КЭ.НАС}$, но страдает высоким $E_{ВЫКЛ}$ и неоднородной экстракцией носителей, вызывающей динамическую лавину. Структура, имеющая контакт эмиттера к неактивным областям P-базы, обеспечивает равномерную экстракцию, снижая $E_{ВЫКЛ}$ при том же $U_{КЭ.НАС}$ и повышая устойчивость к защелкиванию при больших токах за счет гомогенного поля [6, 7]. Подключение фиктивных канавок к электроду эмиттера дает дополнительную емкость эмиттер-коллектор, которая помогает стабилизировать потенциал коллектора при коротком замыкании.

Наилучший компромисс достигается при комплексной оптимизации: введении CS-слоя с экранированием P-слоем, использовании утопленных эмиттерных канавок для управления дырочными токами, закороченных фиктивных канавок для улучшения выключения и выборе наиболее эффективной схемы подключения фиктивных канавок. TCAD-моделирование позволяет количественно оценить вклад каждого параметра и является эффективным инструментом выбора конструктивно-технологических решений на этапе разработки.

Литература

1. Iwamuro N., Laska T. IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects // IEEE Trans. Electron Devices, 2017. Vol. 64. № 3. P. 741–752.
2. Wang K. et al. A Review on Cell Structure Optimization of IGBT Under Overload Condition // IEEE Transactions on Electron Devices, 2026. Vol. 73. Iss. 2. P. 716–730.
3. Antoniou M. et al. Point injection in trench insulated gate bipolar transistor for ultra low losses // Proc. ISPSD, 2012. P. 21–24.
4. Antoniou M. et al. Novel approach toward plasma enhancement in trench-insulated gate bipolar transistors // IEEE Electron Device Lett., 2015. Vol. 36. № 8. P. 823–825.
5. Deviny I. et al. A novel 1700V RET-IGBT shows record low $V_{CE(ON)}$ // Proc. ISPSD, 2017. P. 1–4.
6. Gejo R. et al. Ideal carrier profile control for high-speed switching of 1200 V IGBTs // Proc. ISPSD, 2014. P. 99–102.
7. Yao Y., Luo H., Xiao Q. et al. A 750V recessed-emitter-trench IGBT with recessed-dummy-trench structure featuring low switching losses // Proc. ISPSD, 2018. P. 112–115.

УДК 621.382.32

Исследование влияния технологических операций имплантации на характеристики СВЧ КНИ МОП транзистора с использованием приборно-технологического моделирования

Щербинин Ф. С.[1,2]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Исследовано влияние параметров технологических операций имплантации при формировании кармана, сток/исток и pocket-областей на электрические характеристики СВЧ КНИ N-МОП транзистора с использованием приборно-технологического моделирования.
Ключевые слова: СВЧ КНИ МОПТ; TCAD-моделирование

Investigation of the influence of technological implantation operations on the characteristics of a RF SOI N-MOSFET using TCAD

Scherbinin F. S.[1,2]
[1] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[2] *National Research University of Electronic Technology (MIET)*
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

The influence of the parameters of technological implantation operations during the formation of a pocket, drain/source and pocket regions on the electrical characteristics of a RF SOI N-MOSFET using TCAD is studied.
Keywords: RF SOI MOSFET; TCAD modeling.

Технология изготовления СВЧ-микросхем на основе структур «кремний на изоляторе» имеет заметные преимущества по сравнению со СБИС, реализованными на основе объемной КМОП-технологии. Использование слоя скрытого окисла и щелевой изоляции предотвращает возникновение тиристорного эффекта за счет полной изоляции приборного слоя кремния. Использование КНИ-технологии также положительно сказывается на динамических характеристиках МОПТ за счет снижения паразитных емкостей сток/истока [1]. Данный тип транзисторов широко используется в радиосвязи, телефонах и устройствах беспроводной связи [2]. Изготовление СВЧ СБИС на основе КНИ КМОП-технологии является дорогим и затратным по времени процессом, поэтому для сокращения сроков разработки элементной базы и прогнозирования ее электрических характеристик широкое распространение получили методы численного моделирования, в частности системы приборно-технологического моделирования TCAD.

В работе исследовалось влияние технологических режимов имплантации на электрические характеристики МОПТ. Объектом исследования является структура СВЧ КНИ N-МОП транзистора со следующими конструктивными

параметрами: толщина скрытого окисла tBox = 0,146 мкм, толщина приборного слоя tSi = 0,15 мкм, толщина подзатворного диэлектрика tGox = 1,9 нм, длина затвора Lg = 0,1 мкм.

Исследовано влияние режимов имплантации примеси на изменение ключевых характеристик транзистора: порогового напряжения, токов насыщения и утечки, крутизны и граничной частоты. Установлено незначительное влияние дозы и энергии имплантации формирования сток/истоковых областей на изменение электрических характеристик. Проведена вариация значений параметров технологических режимов имплантации при формировании кармана и pocket-областей. По результатам моделирования построены процессные окна, на основе которых сделаны следующие выводы: для улучшения электрических характеристик при формировании кармана следует уменьшать значение дозы имплантации и увеличивать значение энергии. При формировании pocket-областей следует уменьшать значения обоих технологических параметров имплантации. Использование полученных результатов позволило улучшить электрические характеристики СВЧ КНИ N-МОП транзистора по сравнению с их значениями до модификации маршрута, сравнение приведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение значений электрических характеристик до и после модификации маршрута

Электрическая характеристика	Значение электрической характеристики до модификации маршрута	Значение электрической характеристики после модификации маршрута	Процентное изменение значения характеристики, %
Пороговое напряжение Vth, В	0,61	0,359	41
Крутизна ВАХ gm, мкС/мкм	152,54	170,64	12
Ток насыщения Ion, мкА/мкм	239,9	461,5	92
Ток утечки, пА/мкм	0,19	110	579
Граничная частота Ft, ГГц	81,11	88,46	9

Литература

1. Зебрев Г. И. Физические основы кремниевой наноэлектроники: Учебное пособие. — М.: МИФИ, 2008. — 288 с.
2. Baschirotto A., Harpe P., Makinwa K. A. A. (Eds.). Next-Generation ADCs, High-Performance Power Management, and Technology Considerations for Advanced Integrated Circuits: Advances in Analog Circuit Design 2019. Springer Nature, 2020.

УДК 621.382

Оптимизация конструкции элементов интегральной схемы двухтранзисторного прямоходового преобразователя на основе нитрида галлия с использованием компьютерного моделирования

Курбанбаева Д. М.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
diana.kurbanbaeva.00@mail.ru

В данной работе было проведено динамическое моделирование двухтранзисторного прямоходового преобразователя на основе GaN с использованием программного пакета Sentaurus TCAD. В результате работы были предложены оптимальные конструкции транзистора и диода на GaN с широким диапазоном рабочего напряжения и наименьшим временем переключения.
Ключевые слова: динамическое моделирование; GaN HEMT; GaN-транзистор; GaN-диод; интегральная схема; силовая электроника.

Optimization of Integrated Circuit Element Design for a Two-Transistor Gallium Nitride Forward Converter Using Computer Simulation

Kurbanbaeva D. M.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
diana.kurbanbaeva.00@mail.ru

In this study, we conducted dynamic simulation of a two-transistor GaN-based forward converter using the Sentaurus TCAD software package. As a result, we proposed optimal GaN transistor and diode designs with a wide operating voltage range and the shortest switching time.
Keywords: dynamic simulation; GaN HEMT; GaN transistor; GaN diode; integrated circuit; power electronics.

На сегодняшний день, устройства на основе нитрида галлия являются наиболее востребованными в силовой и высокочастотной электронике. Благодаря своим свойствам, такими как широкая запрещенная зона и высокая подвижность носителей заряда, GaN-устройства могут работать при бóльших температурах, напряжениях и частотах, чем устройства на основе кремния [1].Однако существует проблема интеграции различных GaN-устройств на единой кристаллической подложке для минимизации размеров электрических схем. Поиск решения этой проблемы до сих пор является актуальной научно-технической задачей [2–3].

В работе исследовалась возможность реализации на единой кристаллической подложке интегральной схемы двухтранзисторного прямоходового преобразователя (ДПП). Данная схема имеет широкое распространение в высоковольтных схемах преобразования мощности, в частности, в схемах устройств управления электродвигателями. Реализация интегральной схемы ДПП на основе GaN включает в себя

проектирование базовых электронных компонентов: транзистор и диод. Исследование влияния конструкции GaN-диода и GaN-транзистора на динамические характеристики ДПП было выполнено в программном пакете Sentaurus TCAD. Конструкция нормально закрытого GaN HEMT включала в себя p-GaN-слой с высокой концентрацией магния под затвором. Диод реализован на основе гетероперехода p-GaN/GaN. Элементы интегральной схемы были спроектированы на основе гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN с локальной областью p-GaN. Интегральная схема содержала два нормально закрытых GaN HEMT и два блокирующих диода (рис. 1).

Совместное моделирование конструкций различных GaN-устройств на едином кристалле показало возможность реализации интегральной схемы ДПП на основе нитрида галлия. Были определены оптимальные размеры конструкции GaN-устройств для достижения максимальных рабочих характеристик. В перспективе это может позволить в рамках GaN-технологии компактно располагать на едином кристалле различные электронные компоненты для эффективной реализации интегральных схем.

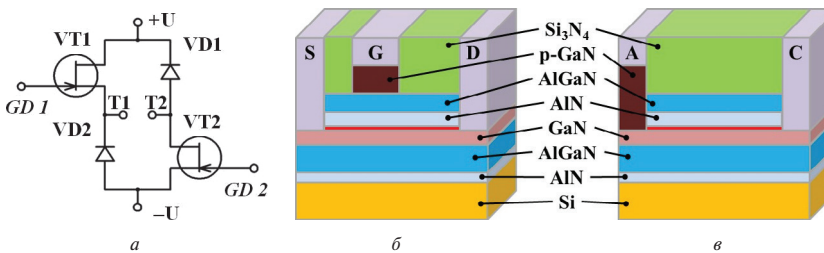


Рис. 1. Устройство двухтранзисторного прямоходового преобразователя на основе нитрида галлия: электрическая схема (*а*), структура GaN-транзистора (*б*), структура GaN-диода (*в*)

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FSMR-2025-0004.

Литература

1. Stability, reliability, and robustness of GaN power devices: A review / Kozak J. P., Zhang R., Porter M., Song Q., Liu J., Wang B. et al. // IEEE Transactions on Power Electronics, 2023. Vol. 38. № 7. P. 8442–8471.
2. A 4-transistor monolithic solution to highly linear on-chip temperature sensing in GaN power integrated circuits / Li A., Shen Y., Li Z., Li F., Sun R. et al. // IEEE Electron Device Letters, 2022. Vol. 44. № 2. P. 333–336.
3. Monolithic GaN half-bridge stages with integrated gate drivers for high temperature DC-DC buck converters / Cui M., Sun R., Bu Q., Liu W., Wen H. et al. // IEEE Access, 2019. Vol. 7. P. 184375–184384.

УДК 621.382

Профилированный Si(100) для инженерии AlN/Si-гетероструктур в нитридной микроэлектронике: ориентационный отбор и локальная релаксация напряжений

Керсновский Е. С.[1], к. ф.-м. н., Голощапов Д. Л.[1], к. ф.-м. н., Буйлов Н. С.[1], к. ф.-м. н., Шарофидинов Ш. Ш.[2], к. ф.-м. н., Мизеров А. М.[3], д. ф.-м. н., Середин П. В.[1]

[1] Воронежский государственный университет,
394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1
kersnovsky@phys.vsu.ru, buylov@phys.vsu.ru
[2] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
(ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
[3] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук
(СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова)
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А

Исследован HVPE-рост AlN на Si(100) с V-канавками. Показано, что профилирование подложки обеспечивает ориентационный отбор доменов AlN и частичную локальную релаксацию напряжений, что важно для инженерии AlN/Si-гетероструктур нитридной микро- и наноэлектроники на кремнии.
Ключевые слова: AlN; HVPE; Si(100); V-канавки; полуполярный рост; Raman mapping.

V-grooved Si(100) for engineering AlN/Si heterostructures in nitride microelectronics: orientation selection and local stress relaxation

Kersnovsky E. S.[1], Ph.D, Goloshchapov D. L.[1], Ph.D, Buylov N. S.[1], Ph.D, Sharofidinov Sh. Sh.[2], Ph.D, Mizerov A. M.[3], Ph.D, Seredin P. V.[1]

[1] Voronezh State University
Voronezh, 394018, Russia
kersnovsky@phys.vsu.ru, buylov@phys.vsu.ru
[2] Ioffe Institute
26 Politechnicheskaya St., Saint Petersburg, 194021, Russia
[3] Alferov University
8/3 Hlopina St., lit. A, Saint Petersburg, 194021, Russia

HVPE growth of AlN on V-grooved Si(100) is studied. Substrate profiling provides orientation selection of AlN domains and partial local stress relaxation, which is relevant for engineering AlN/Si heterostructures for nitride micro- and nanoelectronics on silicon.
Keywords: AlN; HVPE; Si(100); V-grooves; semipolar growth; Raman mapping.

Для нитридной микро- и наноэлектроники на кремнии одной из актуальных задач является управление ориентационным состоянием и остаточными напряжениями AlN без существенного усложнения технологического маршрута. Это особенно

важно для AlN/Si-гетероструктур, используемых как буферные слои и как основа для глубоко-УФ, силовых и вертикальных устройств. В работе слои AlN выращивали методом HVPE на профилированных подложках Si(100), где V-образные канавки формировали анизотропным травлением KOH. Морфологический анализ показал, что геометрия подложки задает два сценария роста: на участках Si(001) реализуется преимущественно c-ориентированный AlN, тогда как внутри канавок с фасетками {111} формируются наклоненные фронты и коалесцирующие гексагональные блоки. SEM подтверждает угол фасеток около 54°, соответствующий плоскостям {111} кремния. По данным интегральной и локальной XRD, наряду с рефлексами AlN (0002) и (0004) из областей V-канавок регистрируются отражения от m-плоскости и полуполярных плоскостей {10-11}/{10-12}, что указывает на ориентационно-селективный рост доменов AlN [1, 2]. Микро-Раман спектроскопия показывает, что при переходе к фасетированным областям усиливаются моды E_1(TO) и A_1(TO), а картирование частоты E_2(high) фиксирует растягивающие остаточные напряжения в слое AlN и их частичную локальную релаксацию в области заполненных канавок. Следовательно, V-структурирование Si(100) может рассматриваться как технологически простой инструмент ориентационного и напряженного инжиниринга AlN/Si-гетероструктур, востребованный при разработке нитридных приборных платформ на кремнии [2, 3].

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования (грант № FZGU-2026-0014, грант № FZGU-2026-0009).

Литература

1. Bessolov V. N., Kompan M. E., Konenkova E. V., Panteleev V. N. Hydride vapor-phase epitaxy of a semipolar AlN(10-12) layer on a nanostructured Si(100) substrate // Tech. Phys. Lett., 2020. Vol. 46. P. 59–61.
2. Li J.-L., Li Y.-F., Liu Z.-P. Silicon orientations to grow semipolar AlN // Nat. Commun. 2025. Vol. 16. Art. 4303.
3. Lughi V., Clarke D. R. Defect and stress characterization of AlN films by Raman spectroscopy // Appl. Phys. Lett., 2006. Vol. 89. Art. 241911.

УДК 621.382

Гибридный MOCVD/PA MBE маршрут AlGaN/GaN HEMT-гетероструктур: выбор темплейта для СВЧ-микроэлектроники и кремниевой интеграции

к. ф.-м. н. Буйлов Н. С.[1], к. ф.-м. н. Голощапов Д. Л.[1], к. ф.-м. н. Мизеров А. М.[2], Керсновский Е. С.[1], к. ф.-м. н. Никитина Е. В.[2], к. ф.-м. н. Тимошнев С. Н.[2], д. ф.-м. н. Середин П. В.[1]

[1] Воронежский государственный университет,
394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1
buylov@phys.vsu.ru
[2] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук (СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова)
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А

Исследован гибридный MOCVD/PA MBE маршрут формирования AlGaN/GaN HEMT-гетероструктур на темплейтах SiC/Si и Al_2O_3. Показано, что выбор темплейта определяет структурное качество и подвижность 2DEG, что критично для СВЧ-микроэлектроники и интеграции нитридных приборов с кремниевой платформой.
Ключевые слова: AlGaN/GaN; HEMT; PA MBE; 2DEG; темплейт; остаточные напряжения.

Hybrid MOCVD/PA-MBE route to AlGaN/GaN HEMT heterostructures: template selection for microwave microelectronics and silicon integration

Ph.D Buylov N. S.[1], Ph.D Goloshchapov D. L.[1], Ph.D Mizerov A. M.[2], Kersnovsky E. S.[1], Ph.D Nikitina E. V.[2], Ph.D Timoshnev S. N.[2], Ph.D Seredin P. V.[1]

[1] Voronezh State University
Voronezh, 394018, Russia
buylov@phys.vsu.ru
[2] Alferov University
8/3 Hlopina St., lit. A, Saint Petersburg, 194021, Russia

A hybrid MOCVD/PA MBE route to AlGaN/GaN HEMT heterostructures on SiC/Si and Al_2O_3 templates is studied. Template choice is shown to govern structural quality and 2DEG mobility, which is important for microwave microelectronics and silicon-compatible nitride integration.
Keywords: AlGaN/GaN; HEMT; PA MBE; 2DEG; template; residual stress.

Для современной СВЧ-микроэлектроники и отечественной ЭКБ одной из ключевых задач остается получение AlGaN/GaN HEMT-гетероструктур с высокой подвижностью 2DEG, низкими токами утечки и технологически воспроизводимой интеграцией с доступными подложечными платформами. В работе исследован гибридный маршрут MOCVD/PA MBE, в котором низкодефектные буферные слои формировались методом MOCVD, а активная область HEMT выращивалась

методом PA MBE на темплейтах $Al_{0,1}Ga_{0,9}N$/AlN/SiC/Si(111) и GaN/c-Al_2O_3 [1]. Структуры включали AlN-зародыш (~1 нм), канал GaN (~60 нм), AlN-спейсер (~1 нм), барьер $Al_{0,2}Ga_{0,8}N$ (~25 нм) и контактный слой GaN (~5 нм). По данным Hall, SEM/TEM, AFM, XRD/RSM, XRR и Raman в обеих структурах формируется 2DEG с концентрацией ~$3–4 \cdot 10^{13}$ $см^{-2}$, однако тип темплейта существенно влияет на параметры активной области. Для варианта на Al_2O_3 латеральная корреляционная длина мозаичных блоков возрастает до ~130 нм против ~41 нм для SiC/Si, наклон доменов снижается с ~2,39° до ~0,48°, а уровень остаточных биаксиальных напряжений уменьшается с ~3–4 до ~0,55 ГПа. Это сопровождается ростом подвижности электронов от ~510 до ~690 $см^2/В{\cdot}с$ при близкой концентрации носителей. Полученные результаты показывают, что выбор темплейта является эффективным инструментом управления структурным качеством и транспортными параметрами HEMT-гетероструктур, а гибридный MOCVD/PA MBE маршрут представляет практический интерес как для СВЧ-приборов повышенной мощности, так и для интеграции нитридной электроники с кремниевой технологией [2, 3].

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования (грант № FZGU-2026-0014, грант № FZGU-2026-0009).

Литература

1. Ambacher O. Growth and applications of group III-nitrides // J. Phys. D: Appl. Phys., 1998. Vol. 31. P. 2653–2710.
2. Tang H., Webb J. B., Rolfe S. et al. GaN/AlGaN two-dimensional electron gas grown by ammonia-MBE on MOCVD GaN template // Phys. Status Solidi B, 2002. Vol. 234. P. 822–825.
3. Cordier Y., Hugues M., Semond F. et al. Structural and electrical properties of AlGaN/GaN HEMTs grown by MBE on SiC, Si(111) and GaN templates // J. Cryst. Growth, 2004. Vol. 271. P. 202–208.

УДК 621.382.32

Исследование влияния топологической конфигурации на характеристики GaN HEMT-транзисторов на подложках SiC

Гуртовая А. Р., Гусев А. С., Кузнецов А. Л., Цунваза Д. М., Захарченко Р. В., к. т. н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
evgenia.gurtovaya@yandex.ru, asgusev@mephi.ru, kyznecal@yandex.ru, DTsunvaza@mephi.ru, rvzakharchenko@mephi.ru

Рассмотрено влияние конфигурации затворной области GaN HEMT на подложке SiC в едином техпроцессе. Исследовались ВАХ и S-параметры тестовых образцов, на основании которых показано влияние положения затвора и суммарной ширины затворных секций на частотные и статические характеристики.
Ключевые слова: GaN HEMT-транзистор; нитрид галлия; топология активной области; СВЧ- и электрические характеристики.

Study of the effect of topological configuration on the characteristics of GaN HEMT transistors on SiC substrates

Gurtovaya A. R., evgenia.gurtovaya@yandex.ru

Gusev A. S., Ph.D, asgusev@mephi.ru

Kuznetsov A. L., kyznecal@yandex.ru

Tsunvaza D. M., DTsunvaza@mephi.ru

Zakharchenko R. V., Ph.D, rvzakharchenko@mephi.ru
National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoye Hwy., Moscow, 115409, Russia
evgenia.gurtovaya@yandex.ru, asgusev@mephi.ru, kyznecal@yandex.ru, DTsunvaza@mephi.ru, rvzakharchenko@mephi.ru

The effect of the gate region configuration of GaN HEMTs on a SiC substrate fabricated within a single process flow was investigated. The IV characteristics and S-parameters of the test samples were analyzed. Based on these results, the influence of the gate position and the total width of the gate fingers on the frequency and static performance was demonstrated.
Keywords: GaN HEMT transistor; gallium nitride; active region topology; microwave and electrical characteristics.

Нитрид галлия –перспективный материал современной электроники. Благодаря широкой запрещенной зоне, высокой скорости дрейфа электронов и устойчивости к повышенным температурам и радиации GaN-приборы востребованы в силовой электронике, усилителях для 5G/6G, преобразователях энергии и других приборах [1–2].

В GaN HEMT-транзисторе проводящий канал формируется двумерным электронным газом (2DEG) на гетерогранице AlGaN/GaN. Высокая концентрация и подвижность носителей обеспечивают большие токи стока и высокие частотные характеристики, однако итоговые параметры прибора зависят от распределения электрического поля, паразитных емкостей, сопротивления затвора и областей доступа. Поэтому топологическое проектирование позволяет изменять характеристики приборов, сохраняя структуру.

Объекты и методика исследования

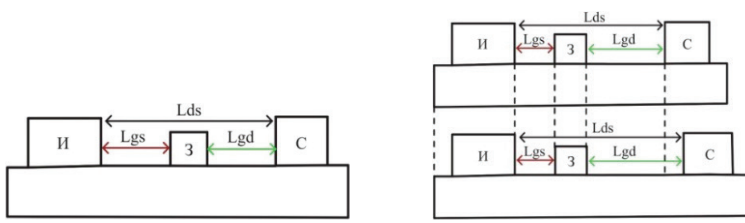
Объекты исследования –GaN HEMT-транзисторы, изготовленные в рамках единого техпроцесса, что позволило оценивать влияние геометрии активной области, минимизируя различия, связанные с маршрутом.

Рассматривались четыре группы: 1) DC- и СВЧ-транзисторы с симметричным и асимметричным расположением затвора; 2) транзисторы с расстоянием затвор-сток L_{gd} = 1,9 и 2,9 мкм; 3) СВЧ-транзисторы с 2 и 4 затворными секциями; 4) СВЧ-транзисторы с 4 секциями и шириной секций 25 и 50 мкм.

Измерения проводились в Центре радиофотоники и СВЧ-технологий НИЯУ МИФИ на зондовой станции MPI TS200-IFE. Статические характеристики были получены с использованием анализатора полупроводниковых приборов Keysight B1500A, частотные –с помощью векторного анализатора цепей PNA-X в диапазоне 0,1–50 ГГц. Исследовались выходные и передаточные ВАХ, крутизна, токи утечки стока, коэффициент усиления по току |H21| и максимальное усиление MAG [3].

Структура и топологические параметры GaN HEMT-транзисторов

Симметричная конфигурация затворной области (расстояния затвор-исток L_{gs} и затвор-сток L_{gd} равны) базовой структурой для сравнения (рис. 1*а*). При асимметричном расположении затвор смещается к истоку, что снижает паразитное сопротивление истоковой области и расширяет область дрейфа со стороны стока, что делает распределение потенциала более плавным и повышает устойчивость к пробою [4, 5]. Однако увеличение L_{gd} меняет последовательное сопротивление и паразитные емкости (рис. 1*б*).



а *б*

Рис. 1. Схематичное изображение симметричного (*а*) и асимметричного (*б*) положения затвора

Увеличение числа и ширины секции повышает суммарную ширину канала и потенциально увеличивает абсолютный ток и выходную мощность. На практике нормированные параметры масштабируются непропорционально: растут сопротивления межсоединений и металлизации, паразитные емкости и тепловая нагрузка [6].

Результаты исследования

Для каждого образца снимались экспериментальные зависимости (рис. 2). Обработка данных проводилась в САПР AWR Design Environment 14.

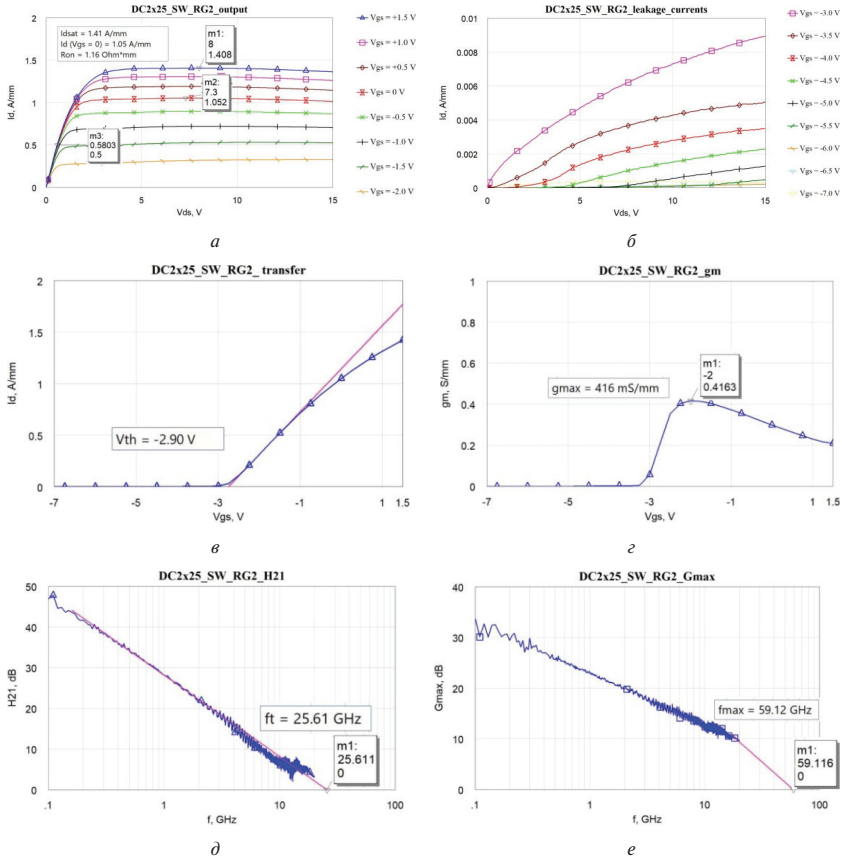


Рис. 2. Экспериментальные характеристики для образца транзистора с 2 затворными секциями шириной 25 мкм в симметричной конфигурации: выходная ВАХ (*а*), зависимость токов утечки стока от напряжения сток-исток (*б*), передаточная ВАХ (*в*), внешняя крутизна (*г*), частотная зависимость коэффициента усиления по току (*д*) и по мощности (*е*)

Результаты приведены в табл. 1.

Переход к асимметричной топологии при сохранении L_{ds} дал прирост тока насыщения на 10 % при практически неизменном R_{on} (1,16–1,19 Ом·мм) для DC-структур. Таким образом, можно предположить, что уменьшение L_{gs} улучшает инжекцию носителей. Для СВЧ-структур асимметрия незначительно увеличила ток, но f_t снизилась на 31 %, а f_{max} –на 12 % ГГц. Следовательно, смещение затвора

к истоку приводит к улучшению токовых характеристик, но при этом увеличиваются паразитные емкости и сопротивления затвора.

Таблица 1. Результаты исследования GaN HEMT-транзисторов

Транзистор	R_{on}, Ом·мм	I_{dsat}, А/мм	I_{d0}, А/мм	V_{th}, В	g_{max}, мСм/мм	f_t, ГГц	f_{max}, ГГц
Симметричный DC 2 секции по 25 мкм	1,16	1,41	1,05	−2,90	416	25,61	59,17
Асимметричный DC 2 секции по 25 мкм, Lgd = 1,9 мкм	1,19	1,56	1,18	−3,14	397	24,65	62,20
Асимметричный DC 2 секции по 25 мкм, Lgd = 2,9 мкм	1,58	1,48	1,11	−2,95	392	29,19	66,02
Симметричный СВЧ 2 секции по 25 мкм	1,17	1,46	1,12	−3,21	371	26,63	58,79
Асимметричный СВЧ 2 секции по 25 мкм, Lgd = 1,9 мкм	1,25	1,51	1,13	−3,03	386	18,34	51,90
Асимметричный СВЧ 2 секции по 25 мкм, Lgd = 2,9 мкм	1,53	1,52	1,13	−2,89	408	29,44	65,34
Асимметричный СВЧ 4 секции по 25 мкм	2,14	1,27	0,99	−3,46	409	29,48	66,50
Асимметричный СВЧ 4 секции по 50 мкм	2,39	1,19	0,93	−3,74	414	27,80	69,95

Увеличение L_{gd} с 1,9 до 2,9 мкм при постоянном L_{gs} = 1 мкм повысило R_{on}: для DC-транзисторов на 25 %, для СВЧ-транзисторов – на 18 %. При этом частотные параметры улучшились: у DC-структур граничная частота усиления по току увеличилась на 16 %, по мощности – на 6 %; у СВЧ-структур – 38 % – 21 % соответственно.

Масштабирование за счет увеличения числа затворных секций привело к увеличению R_{on} на 29 %, а удельный I_{dsat} снизился на 17 %, а частоты f_t и f_{max} практически не изменились. Аналогично увеличение ширины секции привело к росту R_{on} на 11 % и снижению I_{dsat} на 6 %; при этом f_t уменьшилась до приблизительно 28 ГГц, а f_{max} выросла до почти 70 ГГц. Таким образом, увеличение активной области прибора повышает абсолютный ток и мощность, но удельные характеристики ограничиваются паразитными составляющими.

Выводы

Асимметричное положение затвора приводит к приросту удельного тока насыщения, а увеличение L_{gd} позволяет перераспределять электрическое поле и повышать рабочие частоты транзистора, но одновременно влечет рост R_{on}.

Увеличение числа затворных секций и ширины секции не обеспечивает пропорционального роста удельных токовых характеристик из-за потерь на межсоединениях, паразитных емкостях и сопротивлениях.

Наиболее сбалансированным для СВЧ-применений среди исследованных вариантов является СВЧ-транзистор с двумя затворными секциями шириной 25 мкм каждая и $L_{gd} = 2{,}9$ мкм. Вариант топологии с четырьмя затворными секциями по 50 мкм и аналогичным расстоянием затвор-сток обеспечивает максимальную граничную частоту усиления по мощности (почти 70 ГГц), но обладает относительно высоким сопротивлением открытого состояния R_{on}.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования результатов при проектировании отечественных GaN HEMT-структур.

Работа выполнена в рамках проекта №FSWU-2025-0011.

Литература

1. Демидов А. А., Рыбалка С. Б. Современные и перспективные полупроводниковые материалы для микроэлектроники следующего десятилетия (2020–2030 гг.) // Прикладная математика & Физика, 2021. — Т. 53. — № 1. — С. 53–72. DOI: 10.52575/2687-0959-2021-53-1-53-7.
2. Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. Si, GaAs, SiC, GaN –силовая электроника. Сравнение, новые возможности // Силовая электроника, 2010. — № 5 (28). — С. 4–10.
3. Мокеров В. Г., Кузнецов А. Л., Федоров Ю. В. и др. AlGaN/GaN-СВЧ HEMT-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности fmax до 100 ГГц // Физика и техника полупроводников, 2009. — Т. 43. — Вып. 4. — С. 561–567.
4. Hambitzer A. InAlN/GaN-based high electron mobility transistors: doctoral thesis. – Zurich: ETH Zurich, 2019. DOI: 10.3929/ethz-b-000317736.
5. Wang D., Yuan T., Wei K., Chen X., Liu X. Gate-structure optimization for high frequency power AlGaN/GaN HEMTs // Journal of Semiconductors, 2010. Vol. 31. № 5. 054003. DOI: 10.1088/1674-4926/31/5/054003.
6. Wang J., Wang X., Pang L., Chen X., Jin Z., Liu X. Effect of varying layouts on the gate temperature for multi-finger AlGaN/GaN HEMTs // Journal of Semiconductors, 2012. Vol. 33. № 9. 094004. DOI: 10.1088/1674-4926/33/9/094004.

УДК 621.382

Исследование характеристик межсоединений и разработка тестового модуля для диагностики и устранения дефектов технологического маршрута GaN/SiC МИС СВЧ

Дейнеко С. С., Сигловая Н. В., к. х. н., Кузнецов А. Л., Цунваза Д. М., Захарченко Р. В., к. т. н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
sonudeyneko@yandex.ru, nat.ncstu@rambler.ru, kyznecal@yandex.ru, DTsunvaza@mephi.ru, rvzakharchenko@mephi.ru

Рассмотрена проблема обеспечения надежности металлических межсоединений в многоуровневых СВЧ МИС. Разработан тестовый модуль для контроля качества металлизации. Предложена методика интерпретации результатов измерений электрических параметров, позволяющая локализовать дефекты на конкретных этапах технологического маршрута.
Ключевые слова: СВЧ МИС; GaN/SiC; многоуровневая металлизация; тестовый модуль; диагностика дефектов; межоперационный контроль; металлические межсоединения.

Investigation of Interconnect Characteristics and Development of a Test Module for Fault Diagnosis and Yield Enhancement in the GaN/SiC MMIC Manufacturing Process Line

Deineko S. S., Siglovaia N. V., Ph.D, Kuznetsov A. L., Tsunvaza D. M., Zakharchenko R. V., Ph.D
National Research Nuclear University "MEPhI"
31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia
sonudeyneko@yandex.ru, nat.ncstu@rambler.ru, kyznecal@yandex.ru, DTsunvaza@mephi.ru, rvzakharchenko@mephi.ru

This paper studies the reliability of metal interconnects in multilevel monolithic microwave integrated circuits (MMICs). A specialized test module has been developed to monitor the quality of the metallization process. Furthermore, a methodology for interpreting electrical measurement data is proposed, enabling the localization of defects at specific stages of the fabrication process line
Keywords: microwave MMICs; GaN/SiC; multilayer metallization; test module; defect diagnostics; in-process control; metal interconnects.

Монолитные интегральные схемы (МИС) СВЧ-диапазона на основе AlGaN/GaN являются промышленным стандартом для мощных РЛС и телекоммуникационных систем [1, 2] благодаря высоким показателям удельной мощности, быстродействия и термической стабильности, стабильной работе при высоких напряжениях сток-исток (28–100 В), высоким граничным частотам усиления [3, 4]. Переход к сложным многоуровневым топологиям повышает требования к качеству межсоединений, обеспечивающих работу элементов интегральной схемы, является критическим фактором, определяющим электрические параметры и надежность устройств, так как любые

дефекты в них могут привести к деградации характеристик или отказу прибора [5], а традиционный выходной контроль не позволяет локализовать причину. Поэтому актуальна разработка инструмента сквозного межоперационного мониторинга.

Проблема металлических межсоединений

В технологии изготовления СВЧ МИС на гетероструктурах GaN/SiC выделяют три основных типа межсоединений: соединения на рельефных структурах, вертикальные переходы через окна в диэлектрике и мостовые соединения. Каждый тип обладает специфическими уязвимостями. На основе морфологического анализа тестовых пластин методами СЭМ и оптической микроскопии выявлены и классифицированы характерные технологические дефекты: локальные разрывы и трещины металлизации на кромках рельефа, сквозное протравливание затравочного слоя, неполное удаление металла по периметру топологического рисунка при операции «взрыва» (англ. «lift-off»). Традиционный контроль на финишных этапах не позволяет оперативно выявить причину дефекта, что приводит к снижению выхода годных кристаллов и росту экономических затрат. Разработанный в данной работе модуль системы сквозного межоперационного контроля позволяет локализовать дефект на конкретном этапе технологического маршрута.

Тестовый модуль для диагностики

Модуль разрабатывался в соответствии с технологическими нормами производства СВЧ МИС на основе соединение AIIIN, принятыми в Центре радиофотоники и СВЧ-технологий НИЯУ МИФИ. Топология модуля включает три типа контрольных структур, каждая из которых чувствительна к определенным классам дефектов и может быть протестирована на разных стадиях маршрута.

1. Структуры типа «змейка» (меандр) (рис. 1) предназначены для контроля конформности покрытия ступеней и качества напыления металла. Они выполнены в двух вариантах: на планарной поверхности и на топологическом рельефе. Сравнение слоевого сопротивления на плоскости и на рельефе дает оценку среднего вклада одной ступени в общее сопротивление, а также позволяет отделить дефекты связанные с нижележащей структурой от дефектов нанесения металла. Такие структуры позволяют поэтапно выявлять дефекты, связанные с конкретными операциями: напылением, фотолитографией, травлением диэлектрика.
2. Структуры типа «цепочка» (рис. 2) предназначены для контроля формирования вертикальных межслойных переходов. Они состоят из последовательно соединенных идентичных звеньев, каждое из которых содержит два переходных контакта через межслойный диэлектрик. Большое число звеньев суммирует сопротивления отдельных переходов, делая отклонения статистически значимыми. Измерение полного сопротивления цепочки позволяет вычислить среднее сопротивление одного перехода. Сравнение цепочек с разными типами межсоединений помогает локализовать проблемный этап: травление диэлектрика, осаждение металла или совмещение фотошаблонов.
3. Встречно-штыревая структура (рис. 3) служит для контроля токов утечки и электрической прочности изоляции между близко расположенными проводниками второй металлизации на рельефе первой, а также качества межслойной изоляции. Такая топология создает протяженную границу, на которой концентрируется электрическое поле, что повышает

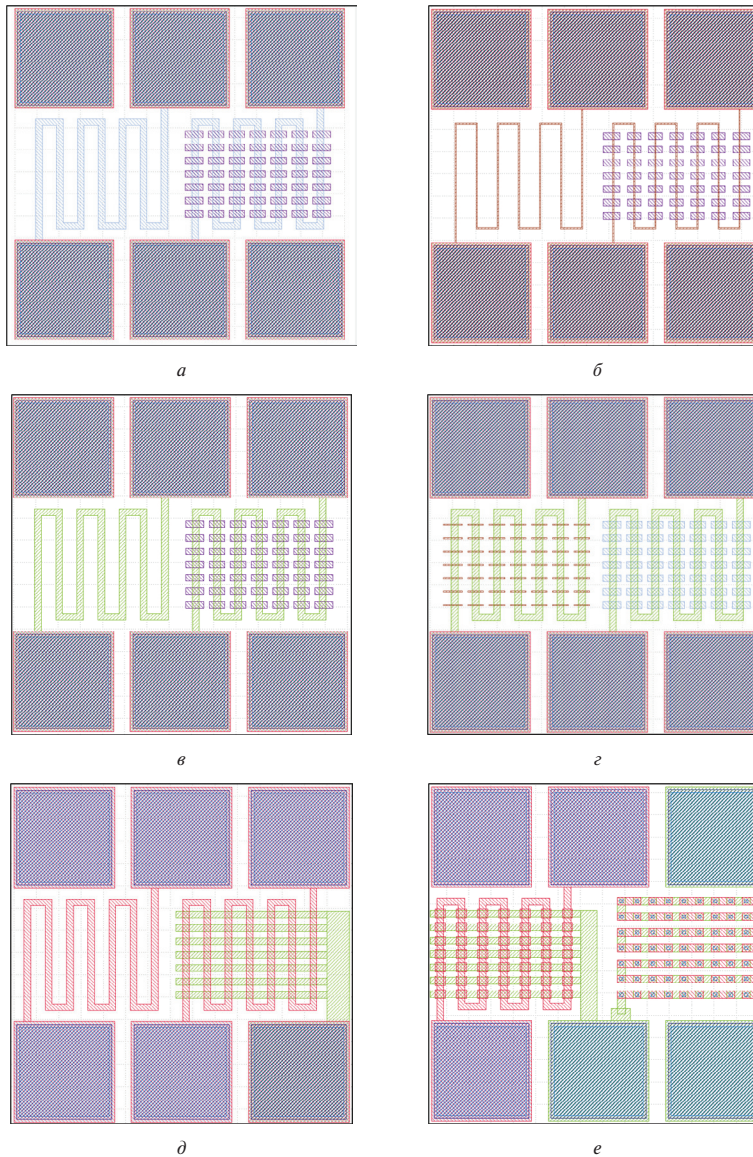
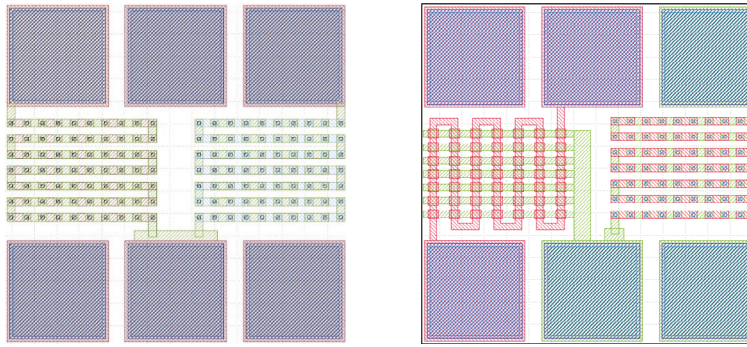


Рис. 1. Тестовые структуры типа меандр (*а* — ОК на рельефе мезы; *б* — затвор Шоттки на рельефе мезы; *в* — металл-1 на рельефе мезы; *г* — металл-1 на рельефе ОК и ЗШ; *д* — металл-2 на рельефе металла-1 через слой пассивирующего диэлектрика; *е* — металл-2 на рельефе металла-1 с использованием мостовых структур)



а *б*

Рис. 2. Тестовая структура типа «цепочка» (а - металл-1 –омические контакты/затворы Шоттки; б — металл-2 –металл-1)

чувствительность к дефектам изоляции –утонениям диэлектрика на стенках рельефа, микротрещинам, остаточному затравочному слою или металлическим мостикам.

Методика локализации дефектов

Установлена прямая корреляция между измеряемыми электрическими параметрами, типом дефекта и этапом его формирования. Предложена методика диагностики (табл. 1), позволяющая по результатам зондовых измерений однозначно определить технологическую операцию, на которой произошло нарушение режимов.

Таким образом, анализируя совокупность данных со всех структур, можно с высокой точностью определить не только наличие дефекта, но и конкретную технологическую операцию, на которой произошло отклонение. Это позволяет оперативно корректировать параметры процесса (например изменить давление напыления, скорректировать время травления или улучшить удаление фоторезиста) и предотвратить брак на всех стадиях изготовления МИС.

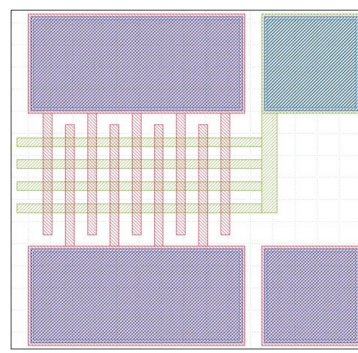


Рис. 3. Встречно-штыревая структура: металл-2 на рельефе металла-1

Таблица 1. Система локализации

Электрический параметр	Дефект	Корректировка этапа
$R_{\text{рельеф}} \uparrow$, $R_{\text{рельеф}} \to \infty$	Утонение/микротрещины, обрыв металлизации	Этап напыления –увеличение расстояния напыления, снижение давления и тд
$R_{\text{плоскость}} > R^{\text{рассчет}}_{\text{плоскость}}$	Загрязнение камеры или неправильный режим напыления	Оптимизация режимов PVD, очистка камеры, контроль морфологии пленки
$R_{\text{контакт}} < R^{\text{рассчет}}_{\text{контакт}}$ $R_{\text{рельеф}} < R^{\text{рассчет}}_{\text{рельеф}}$	Физический пробой диэлектрика; недотравливание затравочного слоя	Корректировка профиля резиста / толщины слоя металлизации; контроль времени травления затравочного слоя
$R_{\text{контакт}} > R^{\text{рассчет}}_{\text{контакт}}$ $R_{\text{контакт}} \to \infty$	Неполное вскрытие окна в диэлектрике, обрыв металлизации	Корректировка режимов плазменного травления диэлектрика
$R_{\text{мост}} \to \infty$	Протравливание затравочного слоя, обваливание моста	Изменение времени/травителя для жидкостного травления; контроль режимов гальваники
Рост паразитной емкости	Недостаточный зазор мост/Металл-1	Корректировка толщины/профиля фоторезиста
$I_{\text{утечки}}(U) \uparrow$	Недостаточный зазор мост/Металл-1, утонение диэлектрика	Увеличение толщины подмостового фоторезиста, контроль конформности PECVD-пассивации
Наличие токов утечки при малых U	Токопроводящий мостик, физический пробой диэлектрика	Корректировка времени травления/изменение травителя; корректировка профиля резиста
Большой разброс между структурами по пластине	Неоднородность травления/напыления	Корректировка положения пластины, калибровка газораспределения, оптимизация давления или мощности, изменения геометрии/положения анода

Выводы

Предложен специализированный тестовый модуль и методика его применения для сквозного межоперационного контроля качества многоуровневой металлизации в СВЧ МИС на гетероструктурах GaN/SiC. Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования технологий изготовления мощных СВЧ-приборов, особенно в условиях перехода к сложным многоуровневым компоновкам.

Полученные результаты создают основу для внедрения системы межоперационного контроля. Однако окончательная оценка эффективности модуля и его влияние на выход годных кристаллов требуют проведения экспериментальной верификации непосредственно в производственном цикле. В рамках этой верификации предполагается отработка пороговых критериев браковки и оценка статистической

воспроизводимости результатов на серийных пластинах, что станет предметом последующих этапов работы.

Работа выполнена в рамках проекта №FSWU-2025-0011.

Литература

1. Mishra U. K., Shen L., Kazior T. E., Wu Y.-F. GaN-based RF power devices and amplifiers // Proceedings of the IEEE, 2008. Vol. 96. № 2. P. 287–305.
2. Михайленко В. Е., Заболоцкий А. М. Обзор GaN-технологий при изготовлении монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона // Доклады ТУСУР, 2024. — Т. 27. — № 4. — С. 23–30.
3. Lu, W. AlGaN/GaN HEMTs on SiC with over 100 GHz fT and low microwave noise / W. Lu, J. Yang, M. A. Khan, I. Adesida // IEEE Transactions on Electron Devices, 2001. Vol. 48. № 3. P. 581–585. DOI: 10.1109/16.906454.
4. Fleury, C. High temperature performances of normally-off p-GaN gate AlGaN/GaN HEMTs on SiC and Si substrates for power applications / C. Fleury, M. Capriotti, M. Rigato, O. Hilt, J. Würfl, J. Derluyn, S. Steinhauer, A. Köck, G. Strasser, D. Pogany // Microelectronics Reliability, 2015. Vol. 55. № 9/10. P. 1687–1691. DOI: 10.1016/j.microrel.2015.06.010.
5. Bae J. Enhanced Reliability of Ultra-Scaled Interconnects Using InterlayerDoped Aligned Carbon Nanotube–Metal Composites / J. Bae, M. Lee, J. Choi, C. S. Lee, H. Kim, S. Kim, S. Lee // ACS Nano, 2025. Vol. 19. № 30. P. 27467–27476. DOI: 10.1021/acsnano.5c06105

УДК 537.242 +621.382+621.3.049.776.422

Исследование интегрированных элементов защиты от электростатических разрядов в кремниевом интерпозере

Емельяненко Ю. А.[1,2], Россов А. С.[1], Баранов Г. В.[1,2], к. ф.-м. н., Лукянчиков М. В.[1], Панасенко П. В.[1], д. т. н.
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
yuemelyanenko@niime.ru, arossov@niime.ru, gbaranov@niime.ru, mlukyanchikov@niime.ru, ppanasenko@niime.ru
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

На основании результатов проведенного приборно-технологического моделирования воздействия электростатических разрядов на интегрированные диодные структуры защиты цепей питания в кремниевом интерпозере определена и оптимизирована конструкция диода щелевого типа. Проведен сравнительный анализ разработанного диода с планарными аналогами и TSV-диодами по прочности к импульсам ESD по модели человеческого тела и основным электрофизическим характеристикам.
Ключевые слова: кремниевый интерпозер; ESD-защита; диод щелевого типа; TSV-диод.

Investigation of Integrated Electrostatic Discharge Protection Elements in a Silicon Interposer

Emelyanenko Y. A.[1,2], Rossov A. S.[1], Baranov G. V.[1,2], Ph.D
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
yuemelyanenko@niime.ru, arossov@niime.ru, gbaranov@niime.ru, mlukyanchikov@niime.ru, ppanasenko@niime.ru
[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

Based on the results of device-technological simulation of electrostatic discharge (ESD) effects on integrated diode-based power rail protection structures in a silicon interposer, the design of a trench-type diode has been determined and optimized. A comparative analysis of the developed diode with planar counterparts and through-silicon via (TSV) diodes has been conducted in terms of robustness against ESD HBM (human body model) pulses and key electrophysical performance characteristics.
Keywords: Silicon interposer; ESD protection; trench-diode; TSV diode.

Вместе с миниатюризацией и повышением степени интеграции ИС, устройства микроэлектроники становятся все более чувствительными к электростатическим разрядам (ESD). Наряду с соблюдением всех требований по минимизации возникновения электростатических разрядов при сборке и эксплуатации устройства, существует необходимость в создании встроенной ESD-защиты.

Одним из подходов к построению систем в корпусе и освоению гетерогенной интеграции является использование в качестве коммутационной платы для электронных компонентов кремниевого интерпозера [1]. Создание ESD-защиты в кремниевом интерпозере позволяет снизить требования по встроенной ESD-защите к кристаллам, установленным на него, что минимизирует влияние паразитных параметров, привносимых любой ESD-защитой [2]. Особенно это важно при построении СВЧ-модулей с А3В5-компонентной базой, как правило, не имеющей встроенной защиты из-за ограниченного количества доступных элементов и более высокого влияния паразитной емкости и генерируемых шумов на устройство [3].

Для описания работы приборов ESD-защиты была задана их двумерная структура и активированы следующие физические субмодели: термодинамическая модель переноса заряда, концентрационная зависимость подвижности, насыщение дрейфовой скорости при высоких полях, рекомбинация по модели Шокли — Рида — Холла, зависимость темпа рекомбинации от температуры и лавинная генерация носителей заряда. В среде моделирования была задана внешняя электрическая схема для создания импульсов ESD по модели человеческого тела [5]. Критерием отказа выбрано достижение температуры решетки кремния значения температуры плавления, что является общепринятым подходом при моделировании.

В работе была проведена оптимизация конструкции диода щелевого типа на основе p-n перехода, описанная в [4], с точки зрения увеличения прочности к ESD и минимизации занимаемой площади, в ходе которой исследовано влияние конструктивно-технологических параметров на напряжение включения, удержания и устойчивость к импульсам ESD. Удалось достигнуть значения напряжения включения равным 30,3 В, напряжения удержания –22 В, время включения –4,8 нс при подаче импульса 5 кВ HBM (human body model), устойчивость к импульсу –16 кВ HBM. Разработанная конструкция была сопоставлена с другими конструкциями щелевого типа, а также планарными и TSV (through-silicon-via) — диодными структурами ESD-защиты в части их прочности к импульсам ESD, занимаемой площади и технологичности. Исследованное решение диодной защиты возможно к использованию в системе двухуровневой защиты, предполагающей кратное снижение требований устойчивости к электростатическому заряду к комплектуемым схемам, создаваемых 2,5D/3D микросборках или многокристальных модулей.

Литература

1. Красников Г. Я., Панасенко П. В. и др. Исследование базовой конструкции малогабаритных СВЧ ППМ на основе кремниевого интерпозера // Российский форум «Микроэлектроника-2022», 2022. — С. 346–347.
2. Li X. et al. Interposer-Based ESD Protection: A Potential Solution for μ-Packaging Reliability of 3D Chip // Micromachines. 2025, 16, 488.
3. Cui Q. et al. On-Chip Electro-Static Discharge (ESD) Protection for Radio-Frequency Integrated Circuits. Cham: Springer, 2015.
4. Li C. et al. Vertical TSV-Like Diode ESD Protection // 2021-2022. P. 1–3.
5. Wang A. Practical ESD Protection Design. First ed. Hoboken, NJ: WileyIEEE Press, 2022. 400 p.
6. Courivaud B. et al. Reliability of ESD protection devices designed in a 3D technology // Microelectronics Reliability, 2014. Vol. 54. № 9-10. P. 2272–2277.

УДК 621.3.049.77, ББК: 32.844.1, ГСНТИ: 47.33.31

Внутрикристальная компенсация паразитных эффектов Flip-Chip монтажа для кремниевых СВЧ ИС

Вязенцев Я. А.[1,2], Баранов Г. В.[1,2], к. ф.-м. н., Гусев С. С.[1]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
yavyazentsev@niime.ru, gbaranov@niime.ru, sgusev@niime.ru
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассмотрено влияние паразитных составляющих контактных площадок и подзаливочного компаунда при Flip-Chip монтаже кремниевых СВЧ ИС. Исследованы методы внутрикристальной компенсации за счет применения периодических структур заземления и индуктивного сужения линий, позволившие достигнуть уровеня возвратных потерь менее −15 дБ в полосе частот до 24 ГГц.
Ключевые слова: СВЧ ИС; Flip-Chip; КМОП 180 нм; паразитная емкость; 3D ЭМ моделирование; периодические структуры заземления; PGS.

Intra-chip compensation of parasitic effects of Flip-Chip interconnections for silicon microwave ICs

Vyazentsev Y. A.[1,2], Baranov G. V.[1,2], Gusev S. S.[1]
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
yavyazentsev@niime.ru, gbaranov@niime.ru, sgusev@niime.ru
[2] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

The impact of pad parasitic components and underfill in the Flip-Chip packaging of silicon microwave ICs is considered. Intra-chip compensation methods using patterned ground structures and inductive line necking are investigated, achieving a return loss of less than −15 dB in the frequency band up to 24 GHz.
Keywords: Microwave IC; Flip-Chip; 180 nm CMOS; parasitic capacitance; 3D EM simulation; patterned ground structures; PGS.

Тенденция к миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона частот и выше обуславливает переход от традиционного проволочного монтажа к технологии перевернутого кристалла (Flip-Chip). На частотах выше 12 ГГц проволочные перемычки обладают существенной паразитной индуктивностью, вызывающей сильное рассогласование 50-омного тракта. Как отмечается в [1], на высоких частотах применение проволочной связи оказывает катастрофическое влияние на параметры реализуемых СВЧ-устройств. Метод Flip-Chip позволяет снизить индуктивность межсоединения до 40–60 пГн [2], однако его применение в рамках

КМОП-техпроцессов требует решения комплекса специфических электродинамических задач.

В условиях минимизации индуктивности микровывода (бампа) доминирующим негативным фактором становится паразитная шунтирующая емкость контактной площадки верхнего уровня металлизации кристалла. Данная емкость возникает между самой площадкой и нижележащими экранирующими слоями или подложкой через структуру диэлектриков многоуровенвой системы металлизации (BEOL-стек), что приводит к деградации коэффициента отражения (S11) на высоких частотах [3]. Дополнительное влияние оказывает применение подзаливочного компаунда (underfill, $\varepsilon \approx 3{,}5$), который локально увеличивает эффективную диэлектрическую проницаемость среды, снижает фазовую скорость волны и приводит к частотной расстройке [4]. В связи с этим прямое использование топологий кристалла, рассчитанных на проволочный монтаж, для технологии Flip-Chip недопустимо.

Целью работы является разработка и сравнительный анализ методов внутрикристальной компенсации паразитных составляющих межсоединений без изменения конструкции СВЧ-платы, предназначенной для монтажа СВЧ ИС. Оценка перехода выполняется методом 3D-моделирования в специализированной САПР с использованием алгоритмов метода конечных элементов (FEM). Электромагнитная модель учитывает диэлектрические потери компаунда и многослойную конфигурацию слоев кремниевой СВЧ ИС.

Для нейтрализации избыточной емкости контактной площадки исследован комплексный топологический подход. На первом этапе применен метод индуктивной компенсации, заключающийся во внедрении локального сужения непосредственно перед бампом [5]. Образованный высокоимпедансный отрезок работает как последовательная индуктивность, формируя совместно с емкостью площадки согласующее звено квази-фильтра нижних частот (ФНЧ).

На втором этапе проведен анализ конфигурации экранирующих структур под контактной площадкой на нижнем слое металлизации. Использование классического сплошного экрана обеспечивает изоляцию кремниевой подложки, но максимизирует паразитную емкость и способствует возникновению вихревых токов [6]. В качестве альтернативного метода оценивается применение DGS в виде сетчатых экранов.

Выбор коэффициента заполнения металла на уровне 30–35 % позволяет существенно снизить эффективную площадь обкладок паразитного конденсатора, полностью удовлетворяя при этом типовым требованиям правил проектирования в части плотности заполнения металлических слоев.

Результаты 3D-моделирования доказывают, что применение предложенных методов компенсации позволяет существенно расширить рабочую полосу частот устройств, смонтированных методом Flip-Chip, без увеличения площади чипа. Разработанная оптимизированная топология обеспечивает уровень возвратных потерь (S11) непосредственно самого перехода «кристалл –плата» не хуже –15 дБ (КСВН < 1,4) и вносимые потери (S21) менее 0,4 дБ в широком диапазоне частот вплоть до 24 ГГц.

Литература

1. Красников Г. Я., Панасенко П. В., Волосов А. В. Конструктивно-технологические принципы создания СВЧ элементной базы нового поколения на основе объемных технологий современной кремниевой микроэлектроники // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2016. — № 3 (163). — С. 10–22.
2. Ефимов А. С. Интеграция кристаллов полупроводниковых СВЧ-приборов с применением метода перевернутого монтажа на основе тонкопленочной системы металлов Au-Sn: дис. ... канд. техн. наук: 2.2.2 / АО «НПП «Исток» им. А. И. Шокина». –Фрязино, 2024. –159 с.
3. Heinrich W. The flip-chip approach for millimeter wave packaging // IEEE Microwave Magazine, 2005. Vol. 6. № 3. P. 36–45.
4. Wu W. W.-C. Design, Processing, and Characterization of High Frequency Flip Chip Interconnects: Ph.D Thesis / Chalmers University of Technology. –Göteborg, Sweden, 2008. –96 p.
5. Wang C.-L., Wu R.-B. Modeling and design for electrical performance of wideband flip-chip transition // IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2003. Vol. 26. № 4. P. 385–391.
6. Koutsoyannopoulos Y. K., Papananos Y. Systematic analysis and modeling of integrated inductors and transformers in RF IC design // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 2000. Vol. 47. № 8. P. 699–713.

УДК 621.382.2/.3 + 621.3.049.776.422

Проектирование интегральной 3D катушки индуктивности в TGV интерпозере

Березин В. Ю.[1,2], Россов А. С.[1], Баранов Г. В.[1], к. ф.-м. н.
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
vberezin@niime.ru, arossov@niime.ru, gbaranov@niime.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1.

Разработаны модели спиральной щелевой и трехмерной вертикальной на основе TGV (Through-Glass Via) катушек индуктивности в стеклянном интерпозере. Рассмотрены различные конструктивные конфигурации таких катушек с целью уменьшения занимаемой площади и увеличения плотности компоновки.
Ключевые слова: Interposer; TGV; катушка индуктивности; добротность; интегрированные пассивные устройства.

Design of an Integrated 3D Inductor in a TGV Interposer

Berezin V. Yu.[1,2], Rossov A. S.[1], Baranov G. V.[1], Ph.D
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
vberezin@niime.ru, arossov@niime.ru, gbaranov@niime.ru
[2] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

Models of a spiral trench inductor and a three-dimensional vertical TGV (Through-Glass Via)-based inductor have been developed in a glass interposer. Various design configurations of these inductors have been examined with the aim of reducing the occupied footprint and increasing integration density.
Keywords: Interposer; TGV; inductor; quality factor (Q-factor); integrated passive devices (IPD).

В области создания гетероинтегрированных 2,5D/3D многокристальных модулей рассматриваются новые перспективные конструктивно-технологические платформы на основе кремниевого интерпозера [1] и стеклянного интерпозера. Последняя обеспечивает крайне низкие диэлектрические потери, высокие изоляционные свойства электрических сигналов [2] и за рубежом переживает переход от этапа НИОКР к началу серийного освоения технологии усилиями ведущих микроэлектронных компаний (Intel, Samsung и др.).

Интегрированные пассивные приборы являются неотъемлемыми компонентами цепей питания и радиочастотных трактов, устройств силовой и СВЧ электроники, для которых крайне важны высокий диапазон значений электрических параметров, высокие показатели качества, низкий вклад паразитных составляющих и малые габаритные размеры. Традиционные планарные спиральные катушки имеют существенные ограничения: большую занимаемую площадь и низкую добротность (Q-фактор) на высоких частотах, что связано с потерями в проводящей

подложке и в тонких металлических слоях [2, 3]. В качестве перспективного подхода к решению этих проблем рассматривается использование сквозных вертикальных соединений в стекле (Through Glass Via, TGV) и построение трехмерных катушек индуктивности на их основе с превосходными значениям индуктивности и добротности при меньших размерах по сравнению с классическими спиральными 2D катушками.

В рамках данной работы была спроектирована классическая 3D TGV катушка индуктивности, предложена ее конфигурация с шахматным расположением TGV, что позволило преодолеть ограничение по шагу вертикальных соединений и увеличить плотность витков. Также была спроектирована спиральная щелевая катушка индуктивности, которая, несмотря на более скромные значения добротности по сравнению с лучшими TGV-образцами, выигрывает в простоте изготовления (не требует двусторонней обработки и формирования сквозных отверстий) и хорошо сочетается с технологией фоточувствительного стекла [4]. Приведены основные расчетные электрические характеристики разработанных катушек и их сравнительный анализ. Проведенное исследование демонстрирует перспективность использования стекла, как материала для 2,5D-интерпозера с интегрированными пассивными компонентами и, в частности, катушками индуктивности для устройств СВЧ и силовой электроники.

Литература

1. Красников Г. Я., Панасенко П. В. и др. Исследование базовой конструкции малогабаритных СВЧ ППМ на основе кремниевого интерпозера // Российский форум «Микроэлектроника-2022», 2022. — С. 346–347.
2. Chen L., Yu T., Yu D. Development of low cost through glass via (TGV) interposer with high-Q inductor and MIM capacitor // 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2020. P. 1234–1239.
3. Onohara J. et al. Development of the integrated passive device using through-glass-via substrate // 2018 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC), 2018. P. 19–22.
4. Yook Jong-Min, Kim Dongsu, Kim Jun Chul. High Performance IPDs (Integrated Passive Devices) and TGV (Through Glass Via) Interposer Technology using the Photosensitive Glass // 2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2014. P. 1201–1206

УДК 621.372.2

Синтез и анализ щелевых линий передачи в многослойных планарных структурах

Бурлаков К., Шабунин С. Н., д. т. н., Гафуривайган М., Сидибе Ф. М.
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»
620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
k.a.burlakov@urfu.ru, s.n.shabunin@urfu.ru, mgafurivaigan@urfu.ru, sidibefousseny80@gmail.com

Работа посвящена строгому методу построения дисперсионных уравнений, основанному на методологии тензорных функций Грина стратифицированных сред, позволяющему проводить расчет постоянной распространения и волнового сопротивления щелевой линии передачи с неоднородной структурой поперечного сечения.
Ключевые слова: щелевая линия передачи; постоянная распространения; волновое сопротивление; метод поперечного резонанса; функция Грина; многослойная структура.

Synthesis and analysis of slotline transmission lines in multilayer planar structures

Burlakov K., Shabunin S. N., Sc.D, Ghafourivayghan M., Sidibe F. M.
Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
19 Mira St., Yekaterinburg, 620062, Russia
k.a.burlakov@urfu.ru, s.n.shabunin@urfu.ru, mgafurivaigan@urfu.ru, sidibefousseny80@gmail.com

This paper presents a rigorous method for constructing dispersion equations based on the tensor Green's function formalism for stratified media, enabling the calculation of the propagation constant and characteristic impedance of slotline transmission lines with an inhomogeneous cross-sectional structure.
Keywords: slotline; propagation constant; characteristic impedance; transverse resonance method; Green's function; multilayer structure.

Непрекращающееся масштабирование монолитных интегральных схем (МИС) в направлении миллиметрового диапазона волн предъявляет все более жесткие требования к точности моделей пассивных компонентов, используемых при проектировании. Унипланарные топологии исключают металлизированные переходные отверстия и упрощают технологию изготовления на полупроводниковых подложках [1]. В таких структурах щелевая линия используется в качестве функционального элемента передачи наряду с копланарным волноводом в балунах, фильтрах, фазовращателях и широкополосных переходах. В данном контексте постоянная распространения и волновое сопротивление щелевой линии являются непосредственными параметрами проектирования.

Существующие приближенные аналитические модели, как правило, рассматривают однослойную структуру подложки и не распространяются

на многослойные конфигурации, характерные для современных технологий СВЧ МИС, таких как тонкопленочные покрытия, буферные слои и пассивация поверхности. Дополнительную сложность представляет то, что щелевая линия как структура с гибридным типом волны не имеет однозначно определенного волнового сопротивления [2]. Определения через мощность-напряжение (Z_{PV}), мощность-ток (Z_{PI}) и напряжение-ток (Z_{VI}) дают различные значения, причем выбор физически обоснованного определения остается практически нерассмотренным. Помимо этого, наличие экранирования приводит к возникновению волноводных мод, взаимодействие которых с основной модой щелевой линии существенно влияет на волновые характеристики и не учитывается простыми приближенными моделями [3].

В настоящей работе указанные ограничения устраняются посредством строгого аналитического подхода, основанного на тензорных функциях Грина в спектральной области [4]. Неоднородность поперечного сечения учитывается в характеристической части функций Грина с помощью телеграфных уравнений, описывающих эквивалентные токи, напряжения и проводимости на границах раздела сред [5]. Такая формулировка метода позволяет учесть толщину металлизации и ее конечную проводимость, что важно для практической реализации. Постоянная распространения находится путем численного решения интегрального уравнения, удовлетворяющего условию поперечного резонанса [6]. Компоненты поля, присутствующие в интегральном уравнении, выражаются через соответствующие функции Грина и продольную компоненту магнитного тока, являющегося источником электромагнитного возбуждения [7]. Для расчета волнового сопротивления используется всего лишь одна компонента магнитного поля, а заданные пределы интегрирования позволяют выбирать нужное определение без необходимости модификации алгоритма.

В результате были получены зависимости характеристик щелевой линии от ширины щели, толщины и диэлектрической проницаемости подложки при разной рабочей частоте. Показано влияние укрывного диэлектрического слоя на волновые характеристики: наличие покрытия приводит к заметному изменению как постоянной распространения, так и волнового сопротивления, что необходимо учитывать при проектировании СВЧ МИС. Исследовано влияние металлического экрана на характеристики щелевой линии, а также продемонстрирована возможность визуализации картины электромагнитного поля [8]. Все результаты верифицированы путем сравнения с данными полноволнового моделирования в Ansys HFSS и демонстрируют хорошее согласование. Предложенный метод обеспечивает единообразный подход к анализу щелевых линий в произвольных слоистых структурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FEUZ-2026-0013).

Литература

1. Muraguchi M., Hirota T., Minakawa A., Ohwada K., Sugeta T. Uniplanar MMICs and their applications // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1988. Vol. 36. № 12. P. 1896–1901. DOI: 10.1109/22.17430.

2. Machac J., Zehentner J. Leakage effects of dominant and higher order modes on slotline // 26th European Microwave Conference. Prague, Czech Republic, 1996. P. 880–884. DOI: 10.1109/EUMA.1996.337716.
3. Bornemann J. A scattering-type transverse resonance technique for the calculation of (M) MIC transmission line characteristics // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1991. Vol. 39. № 12. P. 2083–2088. DOI: 10.1109/22.106550.
4. Tai C. T. Dyadic Green Functions in Electromagnetic Theory. 2nd ed. New York: IEEE Press, 1994.
5. Felsen L. B., Marcuvitz N. Radiation and Scattering of Waves. New York: John Wiley & Sons, 1994.
6. Anashkina E., Burlakov K., Sidibe F. M., Knyazev S., Lesnaya L., Shabunin S. Full-wave Analysis of Microstrip and Slotlines // 2024 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). Yekaterinburg, Russian Federation, 2024. P. 288–291. DOI: 10.1109/USBEREIT61901.2024.10584015.
7. Бурлаков К., Шабунин С. Н., Сидибе Ф. М., Гафуривайган М. Метод расчета постоянной распространения и структуры поля экранированной щелевой линии // Ural Radio Engineering Journal, 2026. — Т. 10. — № 1. — С. 65–88. — DOI: 10.15826/urej.2026.10.1.003.
8. Burlakov K., Ghafourivayghan M., Sidibe F. M. Strict Solution for Calculating Electromagnetic Field Near Enclosed Slotline Using Green's Functions // 2025 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). Yekaterinburg, Russian Federation, 2025. P. 308–311. DOI: 10.1109/USBEREIT65494.2025.11054149.

УДК 621.372.543.2

Проектирование полосовых фильтров на прямоугольных волноводных резонаторах

Крашенинникова Е. А.[1,2]
[1] *Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева*
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.
[2] *ООО «Радио Гигабит»*
603105, г. Нижний Новгород, ул. Ошарская, 95, корп. 2, пом. 20

В данном исследовании представлено пошаговое описание разработки волноводных фильтров — от подбора резонатора до получения настроенной модели. Рассматриваются синглеты (резонаторы высших мод) и фильтры на их основе, а также способы снижения коэффициента передачи в области высших мод.
Ключевые слова: прямоугольный волновод; полосно-пропускающий фильтр; резонатор; синглет.

Design of band-pass filters based on rectangular waveguide resonators

Krasheninnikova E. A.
[1] *Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev*
603155, Nizhny Novgorod, Minina St., 24.
[2] *"Radio Gigabit" LLC*
603105, Nizhny Novgorod, Osharskaya St., house 95, Bldg. 2, room 20

This study presents a step-by-step description of the development of waveguide filters — from selecting a resonator to obtaining a tuned model. Singlets (higher-mode resonators) and filters based on them are considered, as well as methods for reducing the transmission coefficient in the higher-mode region.
Keywords: rectangular waveguide; band-pass filter; resonator; singlet.

Одним из приоритетных направлений является развитие радиорелейных станций (РРС) пятого и шестого поколений, работающих в миллиметровом диапазоне 60–90 ГГц. В настоящее время разрабатываются коммерчески доступные системы в этом диапазоне. Одним из основных ограничивающих компонентов систем связи на миллиметровых волнах являются фильтры, используемые в диплексерах базовых станций.

В ходе исследования проведен последовательный цикл электродинамического проектирования полосовых фильтров. На первом этапе осуществлялся подбор типа прямоугольного волноводного резонатора в стандартном волноводе WR-12, обеспечивающего технологичность изготовления в миллиметровом диапазоне. Затем выполнялось проектирование линейных фильтров на связанных резонаторах без перекрестных связей для оценки базовых характеристик [1]. Для решения проблемы паразитного пропускания в области высших мод были рассмотрены и промоделированы два конструктивных метода подавления: фильтры со смещенными относительно центра индуктивными апертурами и фильтры с угловым резонатором [2].

Параллельно с целью повышения избирательности и формирования нулей передачи в частотной характеристике были исследованы синглеты –резонаторы, работающие на высших модах TE_{102} [3]. На их основе спроектированы и промоделированы фильтры с перекрестными связями, позволяющие получить полюса затухания вне полосы пропускания без увеличения числа резонаторов.

В результате работы выявлены основные зависимости индуктивных связей резонаторов, зависимости положения нулей для триплета и синглета. Кроме того, исследовался вопрос подавления мод высших типов в фильтрах. Наиболее перспективный способ борьбы –использование «угловых» резонаторов со смещенными апертурами. Описана методика проектирования фильтров с применением синглетов.

Литература

1. Hagensen M. Narrowband microwave bandpass filter design by coupling matrix synthesis // Guided Wave Technology, 2000. Vol. 15. № 3. P. 45–52.
2. Guglielmi M. Implementing transmission zeros in inductive-window bandpass filters // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1995. Vol. 43. № 8. P. 1911–1915.
3. Amari S. Characteristics of cross (bypass) coupling through higher/lower order modes and their applications in elliptic filter design // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005. Vol. 53. № 10. P. 3135–3141

УДК 621.382.2/.3

Результаты экспериментального исследования интегральных 6-разрядных аттенюатора и фазовращателя X-диапазона частот

Кулиш А. М.[1,2], Лосев В. В.[1]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] АО «Микроволновые системы»,
105122, г. Москва, Щёлковское ш., 5, стр. 1
artem111mass@gmail.com

В докладе описаны этапы разработки и результаты экспериментального исследования монолитных интегральных схем дискретных 6-разрядных аттенюатора и фазовращателя X-диапазона частот, изготовленных на основе отечественного технологического процесса GaAs pHEMT 0,5 мкм GA05-D-L-01 компании АО «Светлана-Рост» в рамках сервиса «MPW», организованного НИУ МИЭТ. Проведено сравнение результатов моделирования и измерений S-параметров.
Ключевые слова: GaAs pHEMT; СВЧ МИС; аттенюатор; фазовращатель; АФАР.

Results of Experimental Investigation of Integrated 6-Bit X-Band Attenuator and Phase Shifter

Kulish A. M.[1,2], Losev V. V.[1]
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[2] "Microwave Systems" JSC
5 Shchelkovskoe Hwy., Bldg. 1, Moscow, 105122, Russia
artem111mass@gmail.com

This paper presents the design flow and experimental characterization of 6-bit discrete X-band attenuator and phase shifter MMICs fabricated using the 0.5-μm GaAs pHEMT GA05-D-L-01 process developed by Svetlana-Rost JSC. The circuits were manufactured through the Multi-Project Wafer (MPW) service organized by NRU MIET. A comparison between simulated and measured S-parameters is provided.
Keywords: GaAs pHEMT; MMIC; attenuator; phase shifter; AESA.

Современные системы радиолокации играют ключевую роль в решении военных и гражданских задач. Активные фазированные антенные решетки (АФАР) составляют основу этих систем, обеспечивая мониторинг положения объектов в пространстве [1]. Монолитные интегральные схемы (МИС) фазовращателей (ФВ) и аттенюаторов (АТТ) осуществляют преобразование фазы и амплитуды излучаемого сигнала, что позволяет управлять его направленностью и уровнем боковых лепестков антенного полотна АФАР. Ключевыми характеристиками МИС ФВ и АТТ являются количество разрядов преобразования амплитуды и фазы, точность формирования амплитудного и фазового состояния и возвратные потери на входе и выходе в целевом диапазоне частот.

В рамках сервиса по прототипированию электронной компонентной базы «MPW», организованного НИУ МИЭТ, предприятием АО «Микроволновые системы» разработаны МИС 6-разрядных дискретных ФВ и АТТ X-диапазона частот с использованием библиотеки моделей отечественного технологического процесса GaAs pHEMT с длиной затвора 0,5 мкм GA05-D-L-01 (АО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург). МИС дискретного ФВ и АТТ разработаны с использованием структур на переключаемых элементах. Роль коммутационных элементов играют pHEMT-транзисторы, работающие в режиме управляемого сопротивления канала [2, 3]. Секции младших разрядов ФВ (5,625°-45°) реализованы на основе П-образных фильтров нижних частот и коммутационных элементов. Для секций, реализующих преобразование фазы 90° и 180° использованы переключаемые звенья фильтров нижних и верхних частот высших порядков. Секции АТТ, вносящие ослабление 0,5 дБ-8 дБ спроектированы на основе Т- и П-образных резистивных цепей на коммутационных элементах, секция 16 дБ построена с использованием двухпозиционных коммутаторов, переключающих плечо опорного состояния и плечо П-образной резистивной цепи. Управление состояниями секций осуществляется подачей напряжений 0 В/−5 В на соответствующие контактные площадки МИС. Согласно результатам моделирования, МИС ФВ преобразует фазу сигнала от 0° до 360° с минимальным шагом 5,625° и относительной среднеквадратичной ошибкой (СКО) преобразования фазы менее 4°, относительной СКО по амплитуде –менее 1,5 дБ в X-диапазоне частот. МИС АТТ осуществляет ослабление сигнала на величину от 0 дБ до 31,5 дБ с минимальным шагом 0,5 дБ. На этапе проектирования достигнута относительная СКО по амплитуде менее 0,2 дБ, относительная СКО по фазе –менее 3,5° в X-диапазоне частот. В докладе описан маршрут проектирования МИС ФВ и АТТ, приведено сравнение результатов моделирования и зондовых измерений параметров матриц рассеяния (S-параметров).

Литература

1. Опыт производства многоканальных приемо-передающих модулей АФАР X-диапазона на основе МИС СВЧ собственной разработки / А. А. Кищинский, К. Ю. Чередеев, П. А. Косолапов и др. // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы, 2023. — № 4 (271). — С. 4–13. — DOI: 10.36845/2073-8250-2023-271-4-4-13. — EDN TRXTKW.
2. Каленов, А. Д. Особенности проектирования СВЧ-ключей в разных конструктивно-технологических базисах / А. Д. Каленов, И. И. Мухин, В. В. Репин // Наноиндустрия, 2020. — № S96-2. — С. 627–630. — DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.627.630. — EDN PDXVXT.
3. Devlin L. The design of integrated switches and phase shifters // IEE Tutorial Colloquium Design of RFICs and MMICs (Ref. № 1999/158). London: IET, 1999. P. 2/1–2/14.

УДК 621.375.026

Перестраиваемый балансный усилитель мощности с модуляцией нагрузки для стандартов 4G LTE/5G

Вдовичева И. А., Туральчук П. А., к. ф.-м. н.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
iavdovicheva@etu.ru

В данной работе представлены результаты исследования перестраиваемого балансного усилителя с модуляцией нагрузки для работы с модулированными сигналами, используемыми в стандартах 4G LTE/5G. В рамках исследования разработан усилитель мощности с управляемой выходной согласующей цепью на основе сегнетоэлектрического конденсатора. Такое решение позволяет модулировать выходной импеданс усилителя. На базе усилителя мощности с электронным управлением параметрами выходной цепи разработан перестраиваемый балансный усилитель мощности, который помимо основного усилителя с управляемыми параметрами, содержит балансную пару пиковых каскадов. Использование архитектуры балансного усилителя мощности с модуляцией нагрузки и управляемыми параметрами основного усилителя обеспечивает расширение динамического диапазона по выходной мощности. При этом усилитель сохраняет высокий КПД и высокую линейность. В работе представлены результаты электродинамического моделирования, так и экспериментального исследования управляемого балансного усилителя мощности с модуляцией нагрузки на основе GaN-транзисторов. Моделирование демонстрирует расширение динамического диапазона до 13 дБ, при этом КПД составляет не менее 40 %, а коэффициент усиления (КУ) не менее 11 дБ в диапазоне частот 1,9–2,1 ГГц.

Ключевые слова: усилитель мощности; сегнетоэлектрический конденсатор; динамический диапазон; модуляция нагрузки.

A tunable balanced power amplifier with load modulation for 4G LTE/5G standards

Vdovicheva I. A., Turalchuk P. A., Ph.D
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
197022, Russia, St. Petersburg, Professora Popova st., 5f
iavdovicheva@etu.ru

This paper presents the results of a study of a tunable balanced amplifier with load modulation for working with modulated signals used in 4G LTE/5G standards. As part of the study, a power amplifier with a controlled output matching circuit based on a ferroelectric capacitor was developed. This solution makes it possible to modulate the output impedance of the amplifier. Based on a power amplifier with electronic control of the output circuit parameters, a tunable balanced power amplifier was developed, which, in addition to the main amplifier with controlled parameters, contains a balanced pair of peak stages. The use of a balanced power amplifier architecture with load

modulation and controllable parameters of the main amplifier ensures an expansion of the dynamic range in terms of output power. At the same time, the amplifier maintains high efficiency and high linearity. The paper presents the results of electrodynamic modeling as well as experimental research on a controllable balanced power amplifier with load modulation based on GaN transistors. The simulation demonstrates an expansion of the dynamic range to 13 dB, with an efficiency of at least 40 % and a gain of at least 11 dB in the frequency range of 1.9–2.1 GHz.

Keywords: power amplifier; ferroelectric capacitor; dynamic range; load modulation.

Современная тенденция в развитии систем беспроводной связи заключается в увеличении пропускной способности каналов и скорости передачи данных. Повышение производительности достигается преимущественно за счет использования сигналов со сложными видами модуляции и ортогональным частотным разделением каналов (OFDM). Отличительной чертой таких сигналов является высокий пик-фактор (отношение пиковой мощности к средней, PAPR), достигающий 8–14 дБ. Для обеспечения корректной работы усилителя мощности (УМ) и минимизации нелинейных искажений при работе с такими сигналами традиционные усилители класса AB должны проектироваться исходя из условия достижения максимального КПД на уровне пиковой мощности. В результате на уровнях средней мощности — в режиме, в котором УМ работает большую часть времени, — КПД усилителя снижается на 20–30 %. Это является критическим фактором для показателей энергоэффективности и теплоотвода [1]. В настоящее время активно разрабатываются усилители мощности Догерти и исследуются балансные УМ с модуляцией нагрузки [2].

В данной работе исследуется возможность управления средней мощностью в архитектуре балансного усилителя мощности с модуляцией нагрузки, что позволяет регулировать динамический диапазон. Такое решение может быть полезно для усиления сигналов с высоким пик-фактором. В составе предложенного устройства используется основной УМ с управляемой выходной согласующей цепью на основе сегнетоэлектрической (СЭ) интегральной схемы [3], [4]. С ее помощью осуществляется электронное управление параметрами выходной согласующей цепи усилителя. При приложении напряжения к СЭ-компоненту выходная мощность усилителя изменяется, что расширяет динамический диапазон (ДД) до 8 дБ. Архитектура перестраиваемого балансного УМ с модуляцией нагрузки содержит управляемый основной усилитель и пиковый каскад на основе балансной пары. Согласно результатам моделирования, предложенное устройство демонстрирует ДД более 13 дБ при КПД не менее 40 % в рабочей полосе частот 1,9–2,1 ГГц. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями. Таким образом, предложенный подход обеспечивает уникальную возможность адаптивного управления ДД, что делает его перспективным решением для современных систем связи 4G LTE/5G, использующих сигналы с высоким отношением пиковой мощности к средней.

Литература

1. Cripps, Steve C. RF power amplifiers for wireless communications. Vol. 250. Norwood, MA: Artech house, 2006.

2. Shepphard DJ, Powell J, Cripps SC. An efficient broadband reconfigurable power amplifier using active load modulation. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016 May 13; 26(6):443-5.
3. Turalchuk, Pavel, Irina Filipiuk, and Bayazet Iskakov. "A Dynamic Load Modulation Power Amplifier with Ferroelectric-Based Tunable Matching Network." Sensors 24.23 (2024): 7571.
4. Вдовичева И.А., Искаков Б.А., Туральчук П.А., "Усилитель мощности с динамической модуляцией нагрузки", Известия высших учебных заведений. Электроника, 2026, (принято к публикации, в печати)

УДК 621.372.622

Исследование способов построения СВЧ-устройства с преобразованием частоты на одном кристалле для применения в программно-определяемом радио

Сердюков В. В., Голан А. В., д. т. н. Коротков К. С.
Кубанский государственный университет
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149
serdyukov-vladimir1996@mail.ru

Исследована возможность построения СВЧ-устройства с преобразованием частоты (в том числе СВЧ смесителя) на одном кристалле. Исследованы способы построения СВЧ смесителей и проведен их сравнительный анализ. Рассмотрена возможность применения топологии интегральной микросхемы СВЧ-устройства с преобразованием частоты в схеме программно-определяемого радио.
Ключевые слова: Преобразование частоты; Смеситель; СВЧ; Система на кристалле; Системы связи.

Methods for constructing a microwave device with frequency conversion on a single chip for use in software-defined radio

Serdyukov V. V., Golan A. V., Sc.D, Korotkov K. S.
Kuban State University
149 Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia
serdyukov-vladimir1996@mail.ru

The possibility of constructing a microwave device with frequency conversion (including a microwave mixer) on a single crystal is investigated. The methods of constructing microwave mixers are investigated and their comparative analysis is carried out. The possibility of using the topology of an integrated circuit of a microwave device with frequency conversion in a software-defined radio circuit is considered.
Keywords: Frequency conversion; Mixer; Microwave; System on a chip; Communication systems.

На сегодняшний день актуальным направлением исследований и разработок в отечественной промышленности являются программно-определяемые радиосистемы, позволяющие выполнять широкий спектр задач на одном устройстве, не затрагивая аппаратную составляющую, а изменяя только программную. Данные системы также нашли применение и в повседневной жизни –в системах интернета вещей (IoT). Ключевым элементом программно-определяемого радио является СВЧ смеситель в составе СВЧ-устройств с преобразованием частоты. Для преобразования частоты вниз (и вверх для случая передачи) необходимо неоднократно понижать частоты путем супергетеродинного преобразования для достижения лучшей изоляции между гетеродином, ВЧ и ПЧ [1–2]. Таким образом, каждое программно-определяемого радио имеет в своем составе большое количество смесителей и создание подобного устройства на одном кристалле по отечественным технологиям позволило бы достичь существенных преимуществ, таких как:

- независимость от импортной ЭКБ,
- снижение стоимости конечных систем связи,
- миниатюризация систем промышленного интернета вещей.

В работе рассмотрена возможность создания СВЧ-устройства с преобразованием частоты на одном кристалле, изучены основные пути построения подобных устройств и технологии их изготовления. Рассмотрена применимость в составе программно-определяемого радио, а также изучена возможность интеграции с разработанными ранее топологиями интегральной микросхемы тактовых генераторов для программно-определяемых радио [3].

Данные работы выполнялись специалистами физико-технического факультета ФГБОУ ВО «КубГУ». В результате выработаны пути построения СВЧ смесителей и разработана топология интегральной микросхемы СВЧ-устройства с преобразованием частоты на одном кристалле SoC.

Литература

1. Коротков К. С., Фролов Д. Р., Левченко А. С. Анализ методов измерения истинного сдвига фаз смесителей сверхвысокой частоты // Радиотехника и электроника, 2015. — Т. 60. — № 8. — С. 873–873.
2. Коротков К. С. и др. Устройство для измерения и способ определения комплексных коэффициентов передачи СВЧ-смесителей, 2019.
3. Свидетельство о государственной регистрации топологии микросхемы № 2025630201 Российская Федерация. Восьмиразрядный модуль управления синтезатором произвольных сигналов: заявл. 06.08.2025: опубл. 18.08.2025 / Е. В. Строганова, В. В. Сердюков, А. В. Голан; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет».

УДК 621.317.77

Метод определения комплексных коэффициентов передачи СВЧ-устройств с преобразованием частоты

Голан А. В., Сердюков В. В., д. т. н. Коротков К. С.
Кубанский государственный университет
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149
blazepro17@gmail.com

Исследована возможность измерения истинного значения комплексного коэффициента передачи СВЧ-устройств с преобразованием частоты. Рассмотрен метод определения комплексных коэффициентов передачи СВЧ смесителей с помощью векторного анализатора цепей. Предложен способ увеличения точности метода с помощью использования векторного вольтметра. Исследована возможность применения метода для определения параметров смесителей в составе систем на кристалле (SoC).
Ключевые слова: Преобразование частоты; Смеситель; Комплексный коэффициент передачи; СВЧ; ВАЦ; Система на кристалле; Системы связи.

Method of measuring complex transmission coefficients of the frequency-converting microwave devices

Golan A. V., Serdyukov V. V., Sc.D, Korotkov K. S.
Kuban State University
149 Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia
blazepro17@gmail.com

The possibility of measuring the true value of the complex transmission coefficient of microwave frequency conversion devices has been investigated. A method for determining the complex transmission coefficients of microwave mixers using a vector network analyzer (VNA) is considered. A technique to improve the accuracy of the method by using a vector voltmeter is proposed. The possibility of applying this method to determine the parameters of mixers within systems-on-a-chip (SoC) has been studied.
Keywords: Frequency conversion; Mixer; Complex transmission coefficient; Microwave; VNA; System-on-a-Chip (SoC); Communication systems.

На сегодняшний день перспективным и востребованным направлением отечественной промышленности является развитие систем космической связи [1]. Опираясь на успешный международный опыт, основное внимание уделяется спутниковым группировкам, находящимся на низкой околоземной орбите. Однако для стабильной работы как спутниковых группировок, так и любых других систем связи, необходимо с высокой точностью определять фазовые параметры СВЧ смесителей, входящих в состав СВЧ-устройств с преобразованием частоты [2]. Это необходимо, поскольку для удешевления конечных устройств аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи имеют низкую частоту дискретизации, а непосредственно передача сигнала ведется на высоких и сверхвысоких частотах [3]. Определение истинных параметров СВЧ-устройств с преобразованием частоты позволит добиться следующих преимуществ:

- уменьшение количества битовых ошибок и потери пакетов при передаче информации,
- увеличение пропускной способности систем связи,
- снижение эффективной стоимости конечных устройств связи.

Кроме того, реализация данного метода позволит добиться технологического суверенитета в сфере метрологии СВЧ-устройств с преобразованием частоты, поскольку зарубежные аналоги данного метода имеют меньшую точность определения параметров.

В работе рассмотрен способ измерения комплексных коэффициентов передачи СВЧ-устройств с преобразованием частоты (в состав которых входят СВЧ-смесители) с использованием двухпортового векторного анализатора цепей позволяющего измерять матрицу рассеяния четырехполюсников. Также был рассмотрен способ увеличения точности данного метода с помощью использования векторного вольтметра для измерения фазовых параметров сигнала ПЧ. Рассмотрена возможность применения метода для определения фазовых характеристик СВЧ-устройств в составе систем на кристалле (SoC).

Данные работы выполнялись специалистами физико-технического факультета ФГБОУ ВО «КубГУ». В результате исследован метод определения истинных фазовых параметров СВЧ-устройств с преобразованием частоты, создан тестовый стенд для проведения измерений.

Литература

1. Коротков К. С., Фролов Д. Р., Левченко А. С. Анализ методов измерения истинного сдвига фаз смесителей сверхвысокой частоты // Радиотехника и электроника, 2015. — Т. 60. — № 8. — С. 873–873.
2. Коротков К. С. и др. Устройство для измерения и способ определения комплексных коэффициентов передачи СВЧ-смесителей, 2019.
3. Сердюков В. В. и др. Определение разности фаз в оптоэлектронных и свч интерфейсных модулях систем связи с многоуровневыми форматами модуляции // Известия Южного федерального университета. Технические науки, 2024. — № 4 (240). — С. 157–169.

УДК 621.396.663

Антенная система для определения местоположения источника излучения

Степанова Т. А., Голан А. В., Сердюков В. В.
Кубанский государственный университет
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149

Разработана антенная системы для определения местоположения источника излучения с использованием методов фазовой пеленгации. Представлены характеристики антенной системы в диапазоне рабочих частот от 80 до 3000 МГц. Описан алгоритм цифровой обработки сигнала с использованием SDR-технологий. Приведены результаты испытаний на полигоне и в условиях городской застройки.
Ключевые слова: фазовая пеленгация; цифровая обработка сигнала; определение местоположения источника излучения.

Antenna system for source location determination

Stepanova T. A., Golan A. V., Serdukov V. V.
Kuban State University
149 Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia

An antenna system for source location determination using phase direction finding methods has been developed. The system's performance characteristics are presented for an operating frequency range of 80–3000 MHz. A digital signal processing algorithm based on software defined radio (SDR) technologies is described. Test results obtained at a test range and in urban environments are provided.
Keywords: phase direction finding; digital signal processing; source location determination.

За последние несколько лет процесс мониторинга радиочастотного спектра и контроль нарушений при его использовании сильно усложнился в связи с увеличением числа радиовещательных передатчиков, их повсеместной доступностью и применения более эффективных средств эксплуатации. Диапазон от 80 до 3000 МГц захватывает области рабочих частот спутникового непосредственного звукового вещания (СНЗВ), сотовых операторов, 4G-интернета, а также глобальных навигационные спутниковых систем (ГЛОНАСС, GPS). Для эффективной работы данных систем и технологий необходимо контролировать излучение радиоэлектронных средств и высокочастотных устройств в городской среде.

Антенные системы с широким диапазоном частот представлены в основном дорогостоящими специализированными комплексами, недоступными для

малых организаций и исследовательских групп. В рамках поставленных задач были разработаны:

- Функционирующая модель антенной системы для определения источника излучения в широком диапазоне радиочастот, с разборной конструкцией, упрощающей транспортировку.

- Алгоритм приема и обработки радиосигналов подвижных и стационарных источников радиоизлучения на базе программно-конфигурируемого радио и его реализация на антенной системе.

В результате была спроектирована многоэлементная антенная система для определения направления на сигнал в диапазоне от 80 до 3000 МГц, поддерживающая фазовые методы обработки сигнала. Были проведены испытания комплекса на полигоне. В ходе тестов система показала стабильные результаты в мониторинге радиоизлучения на расстоянии до 5 км.

Функционирование в широком диапазоне частот достигается за счет использования приводов для перемещения антенных элементов. В свою очередь, за счет использования двигателей для выстраивания положения антенного массива, достигается высокая точность выстраивания рабочей частоты порядка 10–20 кГц. Использование нескольких фазометрических баз позволяет обеспечить точное и однозначное пеленгование методом триангуляции в заданном угловом секторе, с погрешностью до 3 градусов.

Литература

1. Денисов В. П., Дубинин Д. В., Ерофеев Д. В. Вопросы разрешающей способности фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2017. — Т. 20. — № 4. — С. 11–16. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-11-16.
2. Павлов И. Д. Исследование влияния антенн миллиметрового диапазона на ошибки пеленгования фазовым методом // Журнал российских университетов. Радиоэлектроника, 2023. — Т. 26. — № 2. — С. 25–36. DOI: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-25-36.

УДК 621.372.8

Применение эффекта замедленной волны для одновременного подавления взаимной связи и увеличения добротности в терагерцевой биосенсорике

Гафуривайган М., Шабунин С. Н., д. т. н., Бурлаков К., Сидибе Ф. М.
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
mgafurivaigan@urfu.ru, s.n.shabunin@urfu.ru, k.a.burlakov@urfu.ru,
sidibefousseny80@gmail.com

В работе рассмотрено влияние замедляющих структур на характеристики высокочувствительных датчиков с высоким коэффициентом добротности. Показано, как метод замедления волны позволяет подавлять взаимные связи и повышать добротность СВЧ- и терагерцевых сенсоров.
Ключевые слова: структура с замедленной волной; взаимная связь; добротность; терагерцевый диапазон; биосенсор.

Utilization of the slow-wave effect for simultaneous mutual coupling suppression and Q-factor enhancement in terahertz biosensing

Ghafourivayghan M., Shabunin S. N., Sc.D, Burlakov K., Sidibe F. M.
Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
19 Mira St., Yekaterinburg, 620062, Russia
mgafurivaigan@urfu.ru, s.n.shabunin@urfu.ru, k.a.burlakov@urfu.ru,
sidibefousseny80@gmail.com

This paper has evaluated the effect of slow-wave structures on the design of high sensitivity and Q-factor sensors. The paper illustrates how the slow-wave method allows the suppression of mutual coupling and the enhancement of the Q-factor of microwave and THz sensors.
Keywords: slow-wave; mutual coupling; Q-factor; terahertz; biosensor.

Сверхвысокочастотные (СВЧ) и терагерцевые (ТГц) датчики используют в биомедицинских приложениях для обследования раковых клеток [1] и биологических тканей [2] поскольку их рабочие частоты могут быть настроены в соответствии с показателями преломления различных биоматериалов, которые обычно находятся в диапазоне от 1 до 2. При проектировании таких датчиков основными требованиями являются: высокий коэффициент добротности (Q-фактор), высокая чувствительность и малая взаимная связь. Существуют различные методы для достижения этих требований. Замедляющая структура значительно уменьшает взаимную связь между соседними линиями передачи и одновременно повышает добротность и чувствительность. Для создания датчиков на замедляющих структурах необходимо понимать свойства этих структур.

Замедляющие структуры делятся на одиночные и периодические. Важными параметрами при проектировании периодической замедляющей решетки являются: период решетки, ширина и высота зубцов, расстояние между решеткой

и линией передачи, ширина щелевой линии, количество периодов, размеры резонатора, а также свойства материалов металлизации и подложки [3].

Замедляющие структуры обычно снижают взаимную связь за счет более плотного удержания электромагнитного поля вокруг каждой линии передачи, что минимизирует поле рассеяния, образующее связь между соседними линиями. Добротность и чувствительность повышаются за счет увеличения концентрации поля в области чувствительного элемента, что приводит к более острым резонансам и большему сдвигу частоты на единицу изменения свойств целевого аналита.

Физический принцип функционирования замедляющих структур основан на управлении фазовой скоростью распространения электромагнитной волны вдоль направляющей системы. В однородной линии передачи фазовая скорость определяется погонными параметрами, такими как индуктивность и емкость, и в общем случае близка к скорости света в соответствующей среде. Введение периодических неоднородностей, таких как поперечные щели, зубчатые решетки или гребенчатые структуры, приводит к перераспределению реактивных компонент поля. В результате этого происходит увеличение погонной индуктивности и/или погонной емкости, что обусловливает уменьшение фазовой скорости $v_{ph} = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$ и, соответственно, рост постоянной распространения β при неизменной частоте [3]. Данный механизм получил название эффекта замедленной волны, а отношение скорости света в вакууме к фазовой скорости волны определяется как коэффициент замедления. Увеличение коэффициента замедления сопровождается усилением концентрации энергии вблизи проводящих элементов структуры, что непосредственно влияет на характеристики датчика. Более высокая плотность поля в зоне взаимодействия с анализируемым веществом обеспечивает значительно больший отклик резонансной частоты на изменение диэлектрических параметров среды.

С позиций теории цепей замедляющая структура на основе периодической решетки может быть представлена в виде эквивалентной схемы с распределенными параметрами, в которой каждая ячейка периода моделируется Г- или Т-образным четырехполюсником, содержащим дополнительные реактивные элементы — емкости, обусловленные щелевыми зазорами, и индуктивности, формируемые зубчатыми выступами [3]. Анализ дисперсионных характеристик подобной структуры выполняется методом матрицы передачи (ABCD-матрицы). Из условия периодичности следует уравнение дисперсии, связывающее постоянную распространения с частотой и геометрическими параметрами ячейки. Наличие частотных диапазонов, в которых β становится комплексной величиной — является характерной особенностью периодических структур и непосредственно определяет рабочую полосу замедляющего элемента. В связанных линиях передачи введение замедляющей решетки модифицирует модальные постоянные распространения β_e и β_o четной и нечетной мод, увеличивая их разность и тем самым снижая коэффициент связи $k = (Z_{ce} - Z_{co})/(Z_{ce} + Z_{co})$, что в конечном счете приводит к улучшению развязки между соседними каналами в ТГц-диапазоне [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FEUZ-2026-0013)».

Литература

1. Ghafourivayghan M., Shabunin S. N. Feasibility assessment of guided resonance modes in high Q and resolution mm-wave metamaterial biosensor // Optik, 2024. Vol. 299. P. 171619. DOI: 10.1016/j.ijleo.2024.171619.
2. Rahman N., Kundu D. Design of a metamaterial absorber based high performance THz biosensor for cancer detection // Biosensors and Bioelectronics: X, 2026. Vol. 30. P. 100785. DOI: 10.1016/j.biosx.2026.100785.
3. Ghafourivayghan M. et al. Design and implementation of a slow-wave structure for reducing mutual coupling in THz transmission lines toward ultra-high Q-factor sensing enhancement // Sensors and Bio-Sensors Research, 2026. Vol. 52. P. 101012. DOI: 10.1016/j.sbsr.2026.101012.

УДК 537.635:621.372.8

Методика исследования физических свойств магнитных материалов на СВЧ частотах

Гимазов И. И. к. ф.-м. н.[1], Хамидуллин И. Н.[1], Грабой И. Э. к. х. н.[2], Маркелова М. Н. к. х. н.[2], Кауль А. Р. д. х. н.[2]
[1]Казанский физико-технический институт ФИЦ КазНЦ РАН
420029, г. Казань, Россия
[2] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Представлена методика исследования физических свойств магнитных пленок с помощью векторного анализатора цепей и ферромагнитного резонанса. Построены дисперсионные кривые, по уравнениям Киттеля определен тип анизотропии и намагниченность. Метод апробирован на пленках CrO_2/TiO_2.
Ключевые слова: компланарный волновод; диоксид хрома; магнитная анизотропия; дисперсионные кривые; ферромагнитный резонанс; тонкие магнитные пленки.

Methodology for investigating the physical properties of magnetic materials at microwave frequencies

Gimazov I. I.[1] Ph.D, Khamidullin I. N.[1], Graboi I. E.[2] Ph.D, Markelova M. N.[2] Ph.D, Kaul A. R.[2] Sc.D
[1] Kazan Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS, Kazan, 420029, Russia
[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

A methodology for studying the physical properties of magnetic films using a vector network analyzer and ferromagnetic resonance is presented. Dispersion curves were plotted, and Kittel's equations were used to determine the anisotropy type and magnetization. The method was tested on CrO_2/TiO_2 films.
Keywords: coplanar waveguide; chromium dioxide; magnetic anisotropy; dispersion curves; ferromagnetic resonance; thin magnetic films.

Интенсивное развитие технологий спинтроники, СВЧ-электроники и проектирования интегральных микросхем для встраиваемых электронных систем диктует необходимость глубокого понимания высокочастотных магнитных свойств тонких пленок и наноструктур. Ключевые параметры современных конечных устройств — энергоэффективность, быстродействие и миниатюризация — напрямую зависят от магнитной анизотропии, намагниченности насыщения и динамики спиновых волн в используемых функциональных слоях. Точное знание этих характеристик необходимо для моделирования поведения СВЧ-компонентов на этапе проектирования [1].

Традиционным инструментом для изучения динамических свойств магнитных материалов являлся метод электронного парамагнитного (ферромагнитного) резонанса [2]. Данный метод позволяет определять фундаментальные характеристики

вещества: тип магнитной анизотропии, поле анизотропии, эффективную намагниченность и параметр затухания Гильберта. Однако классические резонаторные спектрометры имеют ограничения по диапазону рабочих частот и не позволяют эффективно исследовать локальные свойства образцов в условиях, максимально приближенных к реальной топологии интегральных микросхем. В последние годы благодаря значительному прогрессу в области измерительной техники и развитию векторных анализаторов цепей (ВАЦ) стало возможным проводить исследования ФМР в широкополосном формате с использованием планарных линий передачи [3].

В работе реализованы три способа регистрации спектра ФМР: с разверткой по магнитному полю, по частоте и с модуляцией поля. Установка включает ВАЦ, коаксиальные кабели и измерительную ячейку на основе компланарного волновода. Магнитное поле до 8 кЭ создается электромагнитом.

Получение серии спектров по частоте или серии спектров по полю позволяет построить двумерные дисперсионные кривые — карты уровня поглощения ВЧ-мощности. В рамках отработки предложенной методики были проведены экспериментальные исследования тонких эпитаксиальных пленок диоксида хрома (CrO_2), выращенных на подложках диоксида титана (TiO_2). Для образцов были успешно зарегистрированы спектры ФМР с разверткой как по полю, так и по частоте. На основе собранного массива данных построены дисперсионные кривые. Аппроксимация полученных зависимостей с использованием формул Киттеля позволила однозначно идентифицировать магнитную анизотропию пленок CrO_2 и подтвердить наличие легкой оси намагничивания в плоскости пленки [2]. Разработанный подход демонстрирует высокую эффективность применения векторного анализатора цепей для неразрушающего контроля параметров магнитных материалов, предназначенных для применения во встраиваемых электронных системах и при проектировании современных интегральных СВЧ-микросхем.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РНФ (проект 21-72-20153-П).

Литература

1. Ferrite devices and materials / Adam J. D., Davis L. E., Dionne G. F., Schloemann E. F., Stitzer S. N. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 50, 3 (2002).
2. On the theory of ferromagnetic resonance absorption / Kittel C. // Phys. Rev. 73, 2 (1948).
3. Ferromagnetic resonance linewidth in metallic thin films: Comparison of measurement methods / Kalarickal S. S., Krivosik P., Wu M., Patton C. E. // J. Appl. Phys. 99, 093909 (2006).

УДК 530.145

Сравнительный анализ методов квантовой томографии процессов и томографии набора гейтов для реконструкции двухкубитных гейтов в условиях шумов

Дмитриев И. А.[1,2], Бантыш Б. И.[1,2], Богданов Ю. И.[1,2], Лукичев В. Ф.[2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] НИЦ «Курчатовский институт» — ОФТИ им. К. А. Валиева
117218, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36, корп. 1

Работа посвящена сравнительному анализу методов стандартной квантовой томографии процессов и томографии набора гейтов (gate set tomography, GST) применительно к задаче реконструкции двухкубитных квантовых гейтов в условиях наличия квантовых шумов и ошибок приготовления, преобразования и считывания квантовых состояний.
Ключевые слова: квантовая томография процессов; томография набора гейтов; двухкубитные преобразования; точность квантовой томографии.

Comparative Analysis of Quantum Process Tomography and Gate Set Tomography for Reconstructing Two-Qubit Gates in the Presence of Noise

Dmitriev I. A.[1,2], Bantysh B. I.[1,2], Bogdanov Yu. I.[1,2], Lukichev V. F.2
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[2] National Research Center "Kurchatov Institute" —
Valiev Institute of Physics and Technology
36, Nakhimovsky Ave., Bldg. 1, Moscow 117218, Russia

This work presents a comparative analysis of standard quantum process tomography and gate set tomography (GST) as applied to the reconstruction of two-qubit quantum gates in the presence of quantum noise and errors in quantum-state preparation, transformation, and readout.
Keywords: quantum process tomography; gate set tomography; two-qubit operations; quantum tomography fidelity.

Задача характеризации квантовых устройств в режиме NISQ является одной из ключевых для реализации надежных квантовых вычислений и требует разработки методов, устойчивых к шумам и ошибкам приготовления и измерения квантовых состояний и процессов. Одними из широко используемых подходов являются стандартная квантовая томография процессов (quantum process tomography, QPT) и томография набора гейтов (gate set tomography, GST). Ранее в наших работах в рамках подхода нечеткой модели томографии было показано, что влияние квантового шума и ошибок считывания может быть эффективно учтено непосредственно в протоколе томографии [1–2]. В настоящей работе проводится сопоставление данного подхода с методом GST с точки зрения их практической применимости при решении одной и той же задачи реконструкции квантового гейта.

Рассматривается задача восстановления двухкубитного запутывающего вентиля Мёльмера — Соренсена по статистике измерений. Для обоих методов используется один и тот же источник данных, что позволяет объективно сопоставить результаты реконструкции. В отличие от стандартной квантовой томографии, предполагающей известность состояний подготовки и измерительных операторов, метод GST позволяет осуществлять самосогласованную реконструкцию полного набора гейтов, состояний и измерений.

В численном моделировании использована комбинированная модель шума, включающая когерентные ошибки управления, деполяризацию, амплитудную и фазовую релаксацию, а также ошибки подготовки и измерения. Для двухкубитного случая дополнительно рассматривается вклад коррелированных шумов, не сводящихся к произведению однокубитных каналов.

Сравнение методов проводится по следующим критериям: согласие модели с наблюдаемой статистикой (на основе χ^2-статистики на тестовых схемах), вычислительная сложность, требования к объему экспериментальных данных, а также устойчивость к шумам и выбору начальных условий. Отдельно учитывается влияние калибровочной неоднозначности (gauge freedom) в методе GST на интерпретацию результатов реконструкции.

Полученные результаты позволяют определить области применимости рассматриваемых методов и сформулировать рекомендации по их использованию в задачах калибровки и характеризации квантовых устройств.

Работа подготовлена в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — ОФТИ им. К. А. Валиева.

Литература

1. Bogdanov Yu. I., Dmitriev I. A., Bantysh B. I. et al. High-precision tomography of ion qubits based on registration of fluorescent photons // Laser Physics Letters, 2023. Vol. 20. № 6. 065202.
2. Dmitriev I. A., Bogdanov, Yu. I., Bantysh B. I. et al. Mitigation of Preparation, Transformation, and Measurement Errors of a Two-Qubit State in Mølmer–Sørensen Gate Tomography // Russian Microelectronics, 2026. Vol. 55. № 1. P. 81–88.

УДК 530.145

Селективная калибровка параметров квантового фотонного чипа с использованием производящих функций

Кокшаров К. Б.[1,2], Дмитриев И. А.[1,2], Богданова Н. А.[1,2], Богданов Ю. И.[1,2], Лукичев В. Ф.[2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] НИЦ «Курчатовский институт» — ОФТИ им. К. А. Валиева
117218, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36, корп. 1
lukichev@ftian.ru

Работа посвящена эффективной калибровке параметров фотонных квантовых чипов в условиях ограниченных данных. Предложен метод на основе производящих функций и анализа чувствительности, позволяющий выбирать наиболее информативные выходные амплитуды квантового оптического состояния.
Ключевые слова: квантовый фотонный чип; производящие функции амплитуд вероятности; калибровка параметров; чувствительность; оптимальный эксперимент.

Calculation of output amplitudes of quantum states of a photonic chip using generating functions

Koksharov K. B.[1,2], Dmitriev I. A.[1,2], Bogdanova N. A.[1,2], Ph.D, Bogdanov Yu. I.[1,2], Sc.D, Lukichev V. F.2, Sc.D
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
kirill.koksharov7@gmail.com, il.dmitryev@gmail.com, bogdanova_nadejda@inbox.ru, bogdanov_yurii@inbox.ru
[2] NRC "Kurchatov Institute" — Valiev Institute of Physics and Technology
36k1, Nakhimovsky Ave., Bldg. 1, Moscow, 117218, Russia
lukichev@ftian.ru

The paper is devoted to calculating the probability amplitudes of output states of photonic quantum chips using the apparatus of generating functions. An approach is proposed that makes it possible to obtain the amplitudes of output states of a linear-optical circuit from the coefficients of the expansion of the generating function.
Keywords: photonic quantum chip; linear quantum optics; probability amplitude generating functions.

Задача характеризации и калибровки параметров квантовых фотонных устройств является одной из ключевых в контексте реализации масштабируемых квантовых вычислений и моделирования. В частности, при восстановлении параметров линейно-оптических схем (таких, как светоделители и интерферометры) существенным ограничением является высокая вычислительная стоимость получения полной статистики выходных состояний, растущая экспоненциально с числом мод и фотонов [1].

В настоящей работе предлагается подход к селективной калибровке параметров фотонного квантового чипа, основанный на использовании аппарата производящих функций амплитуд вероятностей [2] и анализа чувствительности выходных амплитуд вероятности к вариациям параметров устройства. Применение производящих функций позволяет получить аналитические выражения для амплитуд выходных состояний и эффективно вычислять их производные по параметрам схемы.

На основе полученных выражений строится карта чувствительности, характеризующая вклад отдельных выходных состояний в определение параметров чипа. В отличие от стандартных методов, использующих полное распределение вероятностей, предлагаемый подход позволяет выделить подмножество наиболее информативных амплитуд, обладающих максимальной чувствительностью к изменению параметров.

В качестве модельной задачи рассматривается реконструкция параметров оптического чипа, реализующего преобразование светоделителя. Показано, что использование селективного набора выходных состояний, выбранных на основе критерия чувствительности, позволяет существенно сократить объем используемых данных без значимой потери точности восстановления параметров.

Работа подготовлена в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — ОФТИ им. К. А. Валиева.

Литература

1. Rahimi-Keshari, S., Broome, M. A., Fickler, R., Fedrizzi, A., Ralph, T. C., & White, A. G. Direct characterization of linear-optical networks // Optics express, 2013. Vol. 21(11). P. 13450–13458.
2. Bogdanov Y. I., Bogdanova N. A., Lukichev V. F. Investigation of Optical Quantum States Using Probability Amplitude Generating Functions // Russian Microelectronics, 2025. Vol. 54(8). P. 1396–1401.

УДК 530.145

Исследование алгоритма квантовой телепортации с учетом влияния шумов

Голышев И. К.[1,2,3], Богданов Ю. И.[1,2,3], д. ф.-м. н.
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] НИЦ «Курчатовский институт» — ОФТИ им. К. А. Валиева
117218, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36, корп. 1
[3] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
i.k.golyshev@gmail.com, bogdanov_yurii@inbox.ru

В настоящей работе исследовано влияние квантовых шумов и процессов декогерентизации на точность многокубитного алгоритма квантовой телепортации. В качестве шумов рассмотрены инструментальные ошибки измерений, а также деполяризация.
Ключевые слова: кубиты; квантовая телепортация; квантовые шумы; декогерентизация.

Investigation of the quantum teleportation algorithm taking into account the quantum noise influence

Golyshev I. K.[1,2,3], Bogdanov Yu. I.[1,2,3], Sc.D
[1] National Research University «MIET»
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[2] National Research Center «Kurchatov Institute» —
Valiev Division of Physics and Technology
36 Nakhimovsky Ave., Bldg. 1, Moscow, 117218, Russia
[3] Molecular Electronics Research Institute, JSC
6/1 Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

This paper is devoted to investigation of the influence of quantum noise and decoherence processes on the accuracy of a multi-qubit quantum teleportation algorithm. The noise sources considered include instrumental measurement errors and depolarization.
Keywords: qubits; quantum teleportation; quantum noise; decoherence.

Практическая реализация алгоритма квантовой телепортации сталкивается с проблемой разрушения квантовой информации под действием квантовых шумов и процессов декогерентизации. Для достижения высокой точности квантового телепорта необходимо исследовать влияние различных механизмов декогерентизации на качество передаваемой информации, что и является целью настоящей работы.

В нашем предыдущем исследовании [1] разработаны модели зашумления, позволяющие учитывать случайные ошибки, деполяризацию, а также амплитудно-фазовую релаксацию при реализации квантовой телепортации кубитов. С практической точки зрения интерес представляет телепортация в условиях влияния шумов не только однокубитных состояний, но и многокубитных и многоуровневых квантовых состояний.

Для учета шумов применен подход с использованием изоморфизма Чоя — Ямилковского и операторного разложения Крауса [2], а также численное моделирование методом Монте-Карло. Зачастую в исследованиях по влиянию шумов на квантовые алгоритмы рассматривают ситуацию, когда шуму подвергаются только отдельные участки квантовой схемы. В настоящей работе рассмотрена более приближенная к реальным условиям задача — учесть влияние шума на каждый вентиль.

Важным примером квантового шума является деполяризующий канал, переводящий любое состояние в полностью хаотическое с определенной вероятностью. Такой тип шума удобен как для теоретического анализа, так и для численного моделирования, поскольку коммутирует с любым квантовым вентилем. Показано, что квантовое состояние, передаваемое с помощью зашумленного алгоритма квантовой телепортации, сильно деградирует с увеличением размерности системы.

Разработанные модели и полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования точности экспериментальной реализации квантового телепорта, а также для улучшения качества передаваемый с его помощью информации.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — ОФТИ им. К. А. Валиева.

Литература

1. Голышев И. К., Богданов Ю. И. Влияние квантовых шумов на качество реализации алгоритма квантовой телепортации // Сборник докладов форума «Микроэлектроника-2023», Парк науки и искусства «Сириус», 9–14 октября 2023 г., спецвыпуск журнала «Наноиндустрия» 2024. — Т. 17. — С. 587–592.
2. Богданов Ю. И., Лукичев В. Ф., Нуянзин С. А., Орликовский А. А., Холево А. С., Чернявский А. Ю. Математическое моделирование влияния квантовых шумов на качество элементной базы квантовых компьютеров // Труды ФТИАН. М. Наука, 2012. — Т. 22. — С. 39–77.

УДК 530.145

Повышение вероятности линейно-оптических операций слияния типа I с помощью одиночных фотонов

Мелкозеров А. А.[1,2], Страупе С. С.[3,1,2], к. ф.-м. н., Сайгин М. Ю.[3,2], к. ф.-м. н.
[1] Российский Квантовый Центр
121205, г. Москва, Большой б-р, 30, стр. 1
melkozerov.aa17@physics.msu.ru
[2] МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
[3] Центр квантовых технологий Сбер
121170, г. Москва, Кутузовский пр-т, 32

Предложена схема линейно-оптических операций слияния типа I с эффективностью 75 % при использовании только одиночных вспомогательных фотонов. Это более чем вдвое снижает фотонные затраты при генерации запутанных ресурсных состояний и улучшает масштабируемость фотонных квантовых вычислений.
Ключевые слова: Квантовая запутанность; квантовые вычисления; линейная оптика.

Enhancing the success probability of linear-optical type-I fusion operations using single photons

Melkozerov A. A.[1,2], Straupe S. S.[1,2,3], Ph.D, Saygin M. Yu.[3,2], Ph.D
[1] Russian Quantum Center
30 Bolshoy Blvd., Bldg. 1, Moscow 121205, Russia
melkozerov.aa17@physics.msu.ru
[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of PhysicsUniversity
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
[3] Sber Quantum Technologies Center
32 Kutuzovsky Ave., Moscow 121170, Russia

A scheme for linear-optical Type-I fusion operations with 75 % efficiency using only single ancillary photons is proposed. This reduces the photon overhead for generating entangled resource states by more than a factor of two and improves the scalability of photonic quantum computing.
Keywords: Quantum entanglement; quantum computing; linear optics

Состояния одиночных фотонов, управляемые линейно-оптическими интерферометрами, являются одной из наиболее перспективных платформ для масштабируемых квантовых вычислений и квантовых коммуникаций. В квантовых вычислениях на основе слияния (FBQC) [1] масштабируемость и устойчивость к ошибкам достигаются за счет многократной подготовки небольших запутанных ресурсных состояний и их объединения посредством вероятностных операций слияния [2].

Однако при использовании только пассивной линейной оптики операции слияния ограничены максимальной вероятностью успеха 1/2. Операции слияния типа I уничтожают только один кубит в процессе слияния и потому хорошо

подходят для генерации запутанных ресурсных состояний. Хотя недавние подходы показывают возможность повысить вероятность успешного слияния типа I при использовании запутанных вспомогательных состояний [3], подготовка таких состояний сама по себе является сложной вероятностной задачей.

В данной работе предложены схемы, повышающие вероятность успеха операций слияния типа I при использовании только одиночных вспомогательных фотонов. Показано, что использование четырех одиночных фотонов увеличивает вероятность успеха до 5/8, а применение простого протокола дистилляции неудачных исходов повышает вероятность до 3/4, без необходимости генерации сложных запутанных вспомогательных состояний.

Мы демонстрируем, что предложенные операции существенно снижают требования к источникам одиночных фотонов при генерации ресурсных состояний для квантовых вычислений и квантовой коммуникации в мультиплексированных архитектурах. В частности, известные схемы позволяют генерировать 4-кубитные состояния GHZ, используя в среднем около 213 одиночных фотонов при стандартных операциях слияния типа I [3]. При использовании предложенных схем это число сразу сокращается до 136 фотонов и до 92 фотонов при использовании одноэтапной дистилляции, что соответствует более чем двукратному снижению требований на количество источников одиночных фотонов.

Полученные результаты существенно уменьшают практическую ресурсоемкость линейно-оптических квантовых алгоритмов. Препринт работы доступен на https://arxiv.org/abs/2603.27315.

Схема	Без усиления $P^s = 1/2$	Прямое усиление $P^s = 5/8$	Одна стадия дистилляции $P^s = 11/16$	Полная дистилляция $P^s = 3/4$
$\|1\rangle^{\otimes 10} \to \|GHZ_2\rangle\|GHZ_3\rangle \to \|GHZ_4\rangle$ [3]	427	348	308	45
$\|1\rangle^{\otimes 12} \to \|GHZ_2\rangle^{\otimes 3} \to \|GHZ_4\rangle$ [3]	213	136	92	37
$\|1\rangle^{\otimes 18} \to \|GHZ_3\rangle^{\otimes 3} \to \|G_6\rangle$	3 840	2 097	1 615	178
$\|1\rangle^{\otimes 24} \to \|GHZ_2\rangle^{\otimes 6} \to \|G_6\rangle$	1 708	836	460	161
$\|1\rangle^{\otimes 96} \to \|\pi_2\rangle^{\otimes 24} \to \|G_{24}\rangle$ [4]	237 312	30 454	25 180	21 168 [4]
$\|1\rangle^{\otimes 144} \to \|GHZ_2\rangle^{\otimes 36} \to \|G_{24}\rangle$	168 840	13 620	7 795	2 861

Рис. 1. Среднее число входных одиночных фотонов, необходимое для мультиплексированной почти детерминированной генерации 4-кубитных состояний GHZ, 6-кубитных кольцевых состояний и 24-кубитных закодированных 6-кольцевых графовых состояний с использованием стандартных и усиленных вентилей слияния типа I. Столбцы с усилением соответствуют прямой работе с $P_{Bell} = 3/16$, $P_{3\text{–}GHZ} = 1/32$; одноэтапной дистилляции с $P_{Bell} = 1/4$, $P_{3\text{–}GHZ} = 1/32$; и полной дистилляции и bleeding-процедуре с $P_{Bell} = 2/3$, $P_{3\text{–}GHZ} = 1/4$ [3]

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации "Росатом" в рамках выполнения Дорожной карты "Квантовые вычисления" (Договор № 868/1759-Д от 03.10.2025 и Договор № 11-2025/1 от 14.11.2025). А. Мелкозеров является получателем стипендии Фонда содействия развитию теоретической физики и математики (БАЗИС) (№ 24-2-2-5-1).

Литература

1. S. Bartolucci et al., “Fusion-based quantum computation,” Nat. Commun. 14, 912 (2023).
2. D. E. Browne and T. Rudolph, “Resource-efficient linear optical quantum computation,” Phys. Rev. Lett. 95, 010501 (2005).
3. S. Bartolucci et al., “Creation of entangled photonic states using linear optics,” arXiv:2106.13825 (2021).
4. S. C. Wein et al., “Minimizing Resource Overhead in Fusion-Based Quantum Computation Using Hybrid Spin-Photon Devices”, PRX Quantum 6, 040362 (2025).

УДК 53.06

Криогенная поверхностная ловушка для масштабируемых квантовых вычислений на ионах кальция

Подлесный А. С., Кадыков А. О., Чуев А. П., Прозоровская А. А., Батуро В. В., к. ф.-м. н., Лахманский К. Е., Ph.D
ООО «МЦКТ» (Российский Квантовый Центр)
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой б-р, 30, стр. 1
a.podlesnyy@rqc.ru, a.kadykov@rqc.ru, a.chuev@rqc.ru, a.prozorovskaya@rqc.ru, v.baturo@rqc.ru, k.lakhmanskiy@rqc.ru

Одним из подходов к масштабированию ионного квантового компьютера является использование планарных ловушек Пауля. Мы демонстрируем захват ионов кальция-40 при криогенных условиях в разработанную нами планарную ловушку. Ловушка представляет собой микрочип, состоящий из золотых электродов, выполненных на подложке из сапфира. Мы описываем результаты измерения ключевых электрооптических характеристик ловушки. Мы также верифицируем точность нашего программного пакета для моделирования ловушек на уровне погрешности менее 3%. Дополнительно, мы характеризуем ионные кубиты в ловушке за счет измерения скорости нагрева и амплитуды осцилляций Раби на одном ионе. В заключение, мы реализуем процедуру автоматизированного шаттлинга кристалла из 2 ионов — ключевой операции для масштабирования ионной платформы.
Ключевые слова: поверхностная ионная ловушка; квантовый компьютер; ионный шаттлинг; моделирование ионных ловушек; криостат замкнутого цикла

Cryogenic surface trap for scalable quantum computations with Ca ions

Podlesnyy A. S., Kadykov A. O., Chuev A. P., Prozorovskaya A. A., Baturo V. V., Ph.D, Lakhmanskiy K. E., Ph.D
Russian Quantum Center
30/1 Bolshoy Blvd., Innovation Center Skolkovo, Moscow, 121205, Russia
a.podlesnyy@rqc.ru, a.kadykov@rqc.ru, a.chuev@rqc.ru, a.prozorovskaya@rqc.ru, v.baturo@rqc.ru, k.lakhmanskiy@rqc.ru

One approach to scaling the trapped ion quantum computer is to use surface Paul traps. We demonstrate confinement of Ca^{40} ions in self-developed surface trap in cryogenic conditions. The trap presents itself as a microchip, consisting of golden electrodes embedded onto the saphire substrate. We describe the measurements of key electro-optical parameters of the trap. We obtain the accuracy of our trap simulation software to be 97%. Additionally, we characterize ion qubits in the trap by measuring the heating rate and the amplitude of Rabi oscillations on a single ion. Finally, we realize automatic shuttling of a 2-ion crystal — a building block for the scalability of ion platform.
Keywords: surface ion trap; quantum computer; ion shuttling; ion trap simulation; close-cycle cryostat

Одной из наиболее перспективных платформ для реализации практических квантовых вычислений на сегодняшний день являются холодные ионы, захваченные комбинацией радиочастотных (РЧ) и постоянных (ПТ) электрических полей, создаваемых электродами ловушки Пауля. Основным подходом к масштабированию платформы является реализация квантовой архитектуры с зарядовой связью (QCCD), в которой регистр ионов разбивается на небольшие, легко контролируемые кристаллы, квантовые операции между которыми проводятся за счет ионного транспорта вдоль ловушки — шаттлинга [1]. Контроль над положением ионов осуществляется с помощью планарной ловушки Пауля — плоского микрочипа с определенной топологией электродов на его поверхности, произведенных с использованием КМОП-технологий (комплементарная структура метал-оксид-полупроводник).

Недостатками поверхностных ловушек по сравнению с 3D ловушками выступают: уменьшенная глубина захватывающего потенциала, определяющая время жизни иона в ловушке, а также значительно более высокий уровень электрических шумов. Использование гелиевого криостата позволяет одновременно улучшить вакуум в области захвата, что увеличивает время жизни иона, и уменьшить амплитуду шума за счет работы при криогенной температуре в диапазоне 4–20 K [2]. Однако, применение криостата вносит дополнительные сложности, связанные с влиянием низких температур на электронику, управляющую электродами ловушки.

В данной работе мы демонстрируем удержание регистра квантового компьютера на холодных ионах кальция в планарной ловушке Пауля. Мы разработали дизайн и техпроцесс изготовления поверхностной ловушки, максимизирующей вероятность поимки ионов при криогенной температуре. В этой ловушке был осуществлен захват кристалла из 13 ионов 40Ca+, используя РЧ и ПТ напряжения, полученные из моделирования ловушки с помощью разработанного нами ранее программного пакета SION [3]. Нами был реализован программный контроль подаваемых электрических напряжений, что позволило провести автоматизированный шаттлинг кристалла из 2 ионов на расстояние 25 мкм.

Фотография изготовленной ловушки показана на рис. 1 (а). Чип изготовлен на сапфировой подложке, с нанесением одного проводящего слоя золота с адгезионным подслоем титана (см. рис. 1 (б)). Топология области захвата ловушки изображена на рис. 1(в). Она содержит раздвоенный РЧ электрод, обеспечивающий захват кристалла в плоскости y-z и 4 ПТ электрода, обеспечивающих захват по оси x. Распределение псевдопотенциала в радиальной плоскости ловушки через точку захвата показано на рис. 1 (г). Экспериментально измеренные параметры ловушки составили: высота ионов над чипом 230 ± 5 мкм, аксиальная частота колебаний ионов 388 ± 1 кГц. Эти измерения совпадают с расчетными значениями в пределах 3% погрешности, что подтверждает высокую точность методов моделирования. С использованием этих результатов была разработана процедура автоматического шаттлинга. На рис. 1 (д) продемонстрированы фотографии кристалла из двух ионов во время проведения линейного шаттлинга на расстояние 25 мкм вдоль ловушки. Время выполнения операции составляет 1 с.

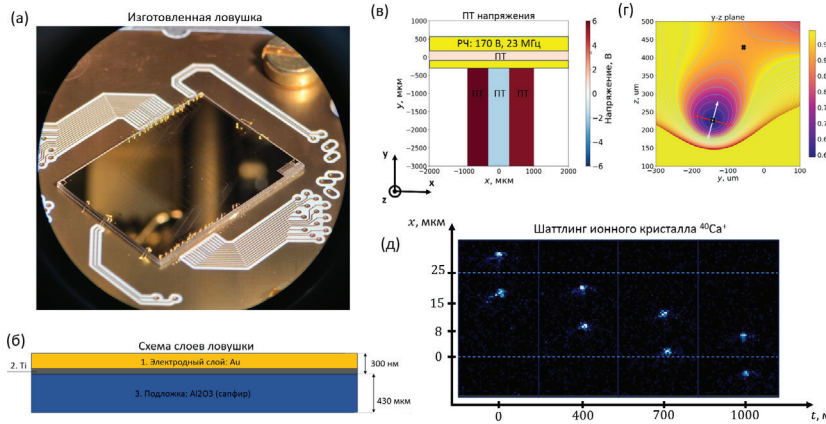
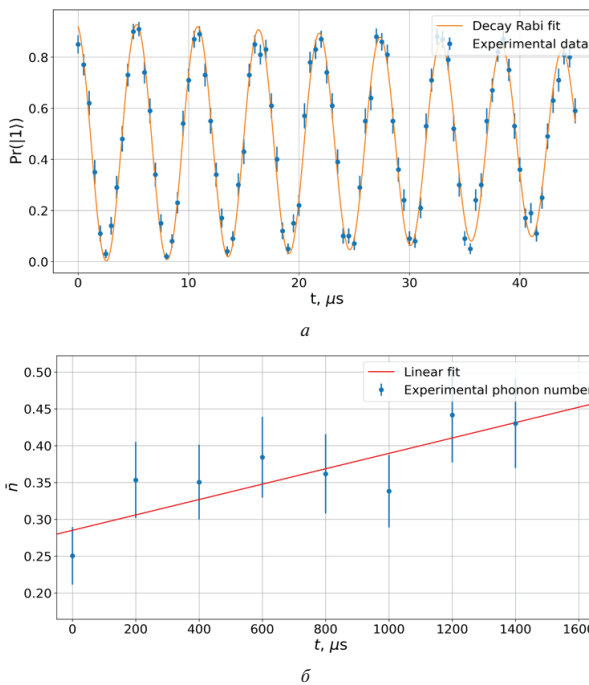


Рис. 1. Демонстрация ключевых характеристик изготовленной ионной ловушки и полученных с помощью нее результатов



а

б

Рис. 2. Экспериментальные результаты с ионными кубитами: осцилляции Раби (*а*), нагрев ионов в зависимости от времени (*б*)

Подготовка ионного кубита

Использование метастабильного перехода 4S1/2 — 3D5/2 с длиной волны 729 нм позволяет кодировать состояния ионного кубита в Зеемановских подуровнях этих состояний. Дополнительно, этот переход используется для охлаждения ионов до основного состояния методом боковой полосы [1]. Ключевыми характеристиками, влияющими на время когерентности и возможную достоверность квантовых операций с ионными кубитами являются начальная температура и скорость нагрева ионов в ловушке [2]. Температура ансамбля из счетного числа ионов описывается средним числом фононов — населенностью колебательного уровня энергии иона (ионов) в гармоническом потенциале ловушки.

Для проверки качества охлаждения и приготовления ионных кубитов были продемонстрированы осцилляции Раби на одиночном ионе, используемые для проведения однокубитных квантовых операций. Результат измерений показан на рис.2(а). Итоговые осцилляции Раби имеют амплитуду 92,7±0,9% на частоте 183981±8 Гц. Медленное затухание осцилляций свидетельствует о ненулевой начальной температуре. На Рис.2(б) показан график температуры иона в зависимости от времени. Полученная скорость нагрева иона составляет 104±30 фононов при начальной температуре 0,25±0,03 фонона. Эти результаты свидетельствуют как о высоком качестве приготовления ионных кубитов, так и о существенном пространстве для оптимизации экспериментальных параметров, чтобы достичь конкурентоспособных показателей.

Выводы

В заключение, мы успешно показали возможность захвата и управления движением ионов 40Ca+ в криогенной поверхностной ловушке. Мы продемонстрировали возможность качественного охлаждения и подготовки ионных кубитов в криогенной поверхностной ловушке. Эта работа является промежуточным шагом для дальнейших исследований и реализации квантового компьютера с масштабируемой ионной архитектурой.

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках выполнения Дорожной карты «Квантовые вычисления» (Договор № 868/1759-Д от 03.10.2025).

Литература

1. I. V. Zalivako et al. Quantum computing with trapped ions: principles, achievements, and prospects // Physics-Uspekhi, 2025. Vol. 68. P. 552–583.
2. Lakhmanskiy K. et al. Observation of superconductivity and surface noise using a single trapped ion as a field probe // Physical Review A, 2019. Vol. 99. № 2. P. 023405.
3. Suleimen Y. et al. Surface trap with adjustable ion couplings for scalable and parallel gates. — // Physical Review A, 2024. Vol. 109. № 2. P. 022605.

УДК 530.145

Оценка точности многокубитных вентилей методом XEB с однокубитными референсными последовательностями

Зотова А. В.[1,2,3], Симаков И. А.[1,2], Мажорин Г. С.[1,2]
[1] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1
[2] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного Центра «Сколково», Большой б-р, 30, стр. 1
[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Предложено теоретическое обоснование перекрестно-энтропийного бенчмаркинга с однокубитным референсом для оценки точности многокубитных операций. Показана некорректность аддитивного приближения. Проведено экспериментальное сравнение с классическим рандомизированным тестированием.
Ключевые слова: XEB; RB; перекрестно-энтропийное тестирование; квантовые операции; многокубитные операции; бенчмаркинг.

Decay rates in interleaved benchmarking with single-qubit references

Zotova A. V.[1,2,3], Simakov I. A.,[1,2], Ph.D, Mazhorin G. S.[1,2], Ph.D
[1]National University of Science and Technology "MISIS"
Leninsky Ave., Building 1, Moscow, 119049, Russia
[2]Russian Quantum Center
30 Bolshoy Blvd., Bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russia
[3] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

We propose a theoretical framework for cross-entropy benchmarking with a single-qubit reference for assessing the fidelity of multi-qubit operations. We demonstrate the invalidity of the additive error approximation. An experimental comparison with standard randomized benchmarking is performed on a superconducting qubit platform.
Keywords: XEB; RB; cross-entropy benchmarking; quantum operations; multi-qubit operations.

Перекрестно-энтропийное тестирование (XEB) [1] с однокубитными референсными последовательностями широко применяется для характеризации квантовых операций в многокубитных процессорах. Однако до настоящего времени данный подход не имел строгого теоретического обоснования. В работе показано, что широко используемое аддитивное приближение для совместного затухания точности при одновременном тестировании однокубитных операций является некорректным и приводит к систематическому завышению точности исследуемого многокубитного вентиля. В работе получено аналитическое выражение для затухания точности в зависимости от индивидуальных деполяризующих ошибок отдельных

кубитов. Установлен критерий достаточного усреднения в алгоритме с чередованием в случае использования однокубитных операций: выходное распределение вероятностей должно соответствовать распределению Портера — Томаса. Экспериментально на сверхпроводниковом процессоре на основе кубитов флаксониумов показано, что предложенный метод позволяет определить точность CZ-вентиля, совпадающую с результатом стандартного рандомизированного тестирования (IRB) [2], но с более высокой точностью благодаря использованию однокубитных референсных последовательностей. Полученные результаты формируют необходимое теоретическое обоснование для использования XEB с однокубитными референсными последовательностями и дают практические рекомендации для корректной оценки точности многокубитных квантовых операций.

Литература

1. Boixo, S. et al., Characterizing quantum supremacy in near-term devices, Nature Physics, 2018. Vol. 14. № 6. P. 595–600.
2. Magesan E. et al. Efficient measurement of quantum gate error by interleaved randomized benchmarking // Phys. Rev. Lett., 2012. Vol. 109. P. 08050
3. Simakov, Ilya A., Arina V. Zotova et al. “Decay Rates in Interleaved Benchmarking with Single-Qubit References.” arXiv, March 5, 2026. https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.05422.

УДК 621.372.8, 530.145.82, 004.383.3

Программирование универсального интегрально-оптического шестиканального интерферометра для классических и квантовых приложений

Урусова К. Н.[1], Кондратьев И. В.[1], Аргенчиев А. С.[1], Бирюков Ю. А.[1], Скрябин Н. Н.[1,2], к. ф.-м. н., Дьяконов И. В.[1,2], к. ф.-м. н., Страупе С. С.[1,2], к. ф.-м. н., Кулик С. П.[1], д. ф.-м. н.
[1] МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
urusova.kn21@physics.msu.ru
[2] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного Центра «Сколково», Большой б-р, 30, стр. 1

Продемонстрированы телепортация однокубитного состояния и (де)мультиплексирование с помощью интегрально-оптического интерферометра, изготовленного методом фемтосекундной лазерной печати. Схема устройства является устойчивой к ошибкам изготовления и универсальной в широком спектральном диапазоне.
Ключевые слова: интегральная фотоника; программируемый интерферометр.

Programming of a universal six-channel integrated-optical interferometer for classical and quantum applications

Urusova K. N.[1], Kondratyev I. V.[1], Argenchiev A. S.[1], Biriukov Y. A.[1], Skryabin N. N.[1,2], Ph.D, Dyakonov I. V.[1,2], Ph.D, Straupe S. S.[1,2], Ph.D, Kulik S. P.1, Sc.D.
[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
urusova.kn21@physics.msu.ru
[2] Russian Quantum Center
30 Bolshoy Blvd., Bldg. 1, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russia

We demonstrate single-qubit state teleportation and (de)multiplexing using an integrated-optical interferometer fabricated by femtosecond laser writing. The device scheme is robust to fabrication errors and universal over a broad spectral range.
Keywords: integrated photonics; programmable interferometer.

Интегрально-оптические интерферометры представляют собой компактные перенастраиваемые устройства, осуществляющие линейные оптические преобразования над подаваемым на вход состоянием. Они управляют светом, обеспечивая обработку как классических, так и квантовых состояний. Наибольший интерес вызывают универсальные фотонные интегральные схемы, поскольку они потенциально способны реализовывать произвольные унитарные преобразования, благодаря чему находят применение во многих областях [1]. Кроме того, они являются основой для квантовых вычислений на фотонах [2]. Однако существующие архитектуры таких интерферометров чувствительны к погрешностям изготовления,

а также остаются универсальными лишь в узком спектральном диапазоне, что ограничивает их практическое применение.

В данной работе мы экспериментально исследуем более устойчивую интерферометрическую волноводную структуру, предложенную в [3] (рис. 1, верхняя часть), состоящую из чередующихся многопортовых светоделителей и фазовых сдвигов. В отличие от упомянутых выше архитектур, она сохраняет универсальность в широком спектральном диапазоне.

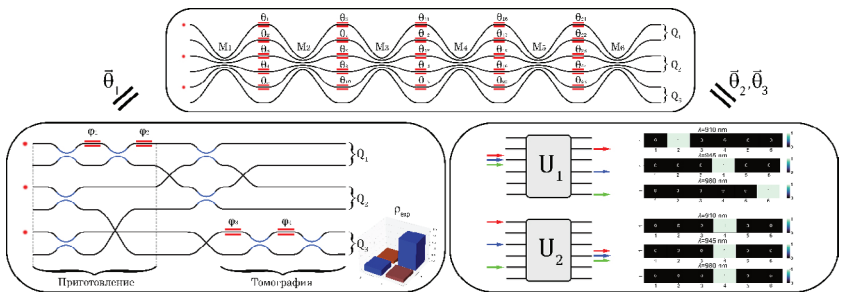


Рис. 1. Исследуемая волноводная структура и преобразования, реализованные на устройстве в экспериментах. Слева — схема, осуществляющая приготовление, телепортацию и томографию однокубитного состояния; справа — постановка задачи (де)мультиплексирования.

Мы изготовили шестипортовый интегрально-оптический чип на основе архитектуры из [3] методом фемтосекундной лазерной записи и разработали для него аналитическую модель. Все параметры чипа были определены экспериментально для трех длин волн — 910, 945 и 980 нм — при этом коэффициенты корреляции превысили 0,95.

Для демонстрации универсальности изготовленного интерферометра были проведены два эксперимента, показывающие его применимость как в квантовых, так и в классических задачах. В первом эксперименте было реализовано преобразование, эквивалентное левой структуре на рис. 1, осуществляющее приготовление однокубитного состояния и его телепортацию с оповещением.

В качестве кубитов использовалась dual-rail кодировка одиночных фотонов, в которой логические состояния 0 и 1 соответствуют нахождению фотона в одном из двух волноводов чипа (таким образом, шестипортовый чип кодирует три кубита). Важно отметить, что благодаря универсальности схемы приготовление однокубитного состояния, его телепортация и проекционное измерение в заданном базисе были реализованы с использованием одной и той же структуры.

В результате эксперимента были успешно приготовлены и телепортированы состояния $|0\rangle_L = |10_L\rangle_{Fock}$ и $|1\rangle_L = |01_L\rangle_{Fock}$ с фиделити 91 % и 97 %. Фиделити рассчитывалось по следующей формуле:

$$F_{ampl}(U,V) = \frac{\sum_{i,j} |u_{ij} v_{ij}|}{\sqrt{\sum_{i,j} |u_{ij} u_{ij}| \cdot \sum_{i,\ j} |v_{ij} v_{ij}|}}.$$

Во втором эксперименте было продемонстрировано демультиплексирование и мультиплексирование излучения, включающего длины волн 910, 945 и 980 нм (рис. 1, правый нижний блок). В результате фиделити для демультиплексирования составили 84,9 %, 82,1 % и 88,8 % для каждой длины волны соответственно, а для мультиплексирования — 79,4 %, 81,9 % и 91,5 %. Фиделити рассчитывалось по следующей формуле:

$$F(X,Y)=\left(\sum_j \sqrt{X_j \cdot Y_j}\right)^2.$$

В дальнейших исследованиях планируется повысить точность восстановления моделей и выставления матриц на устройстве для улучшения качества проводимых экспериментов.

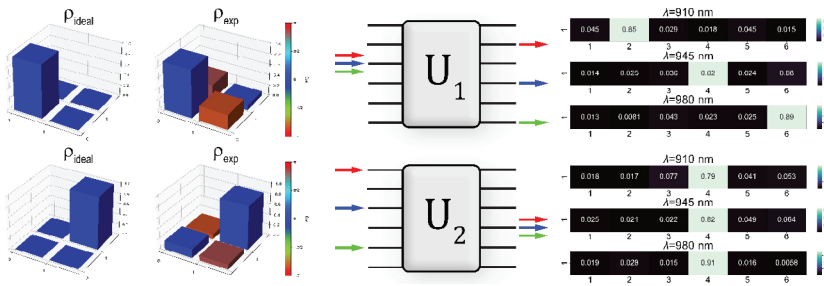


Рис. 2. Результаты, полученные в обоих экспериментах

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00353-П, https://rscf.ru/project/22-12-00353.

Литература

1. Pérez-López, D., Torrijos-Morán, L. Large-scale photonic processors and their applications // npj Nanophoton, 2025. Vol. 2: 32. DOI: 10.1038/s44310-025-00075-4.
2. PsiQuantum Team. A manufacturable platform for photonic quantum computing // Nature, 2025. DOI: 10.1038/s41586-025-08820-7.
3. Kondratyev, I. V. et al. Multiport universal unitary interferometer design // AIP Conference Proceedings, 2020. Vol. 2241: 020022. DOI: 10.1063/5.0010830.

УДК 530.145

Оценка управления ядерным спином в системах NV-13C с помощью СВЧ-поля

Косогорова Т. А., Гусев А. С., к. ф.-м. н., Салказанов А. Т., к. ф.-м. н., Калошин М. М.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
TAKosogorova@mephi.ru, ASGusev@mephi.ru, ATSalkazanov@mephi.ru, MMKaloshin@mephi.ru

Для четырех экспериментально обнаруженных систем NV-^{13}C, в которых изотоп углерода находился в разных координационных сферах (с первой по четвертую) относительно вакансии, определены оптимальные параметры СВЧ-поля, позволяющие управлять ядерным спином. Показано, что при найденных параметрах вероятность переворота ядерного спина во всех исследованных конфигурациях превышает 0,9.
Ключевые слова: NV-центр; алмаз; сверхтонкое взаимодействие; ОДМР; ядерный спин ^{13}C; двойной резонанс Хартмана — Хана; квантовые регистры.

Evaluation of nuclear spin control in NV-^{13}C systems using a microwave field

Kosogorova T. A., Gusev A. S., Ph.D, Salkazanov A. T., Ph.D, Kaloshin M. M.
National Research Nuclear University MEPhI
(Moscow Engineering Physics Institute)
31 Kashirskoye Sh., Moscow, 115409, Russia
TAKosogorova@mephi.ru, ASGusev@mephi.ru, ATSalkazanov@mephi.ru, MMKaloshin@mephi.ru

For four experimentally observed NV-^{13}C systems, in which the carbon isotope was located in different coordination spheres (from the first to the fourth) relative to the vacancy, the optimal microwave field parameters for controlling the nuclear spin have been determined. It has been shown that, for the parameters found, the probability of nuclear spin reversal in all the configurations studied exceeds 0.9.
Keywords: NV centre; diamond; hyperfine interaction; ODMR; ^{13}C nuclear spin; Hartmann-Hahn double resonance; quantum registers.

Благодаря возможности оптически инициализировать и считывать спиновое состояние в широком интервале температур, вплоть до комнатной, NV-центры в алмазе рассматриваются как одна из наиболее многообещающих платформ для квантовой информатики и сенсорики [1]. Особый интерес представляют гибридные системы NV-^{13}C, отличающиеся длительными временами когерентности (порядка сотен мкс при комнатной температуре [2]), в которых ядерные спины изотопа ^{13}C могут выступать в роли долгоживущей квантовой памяти [3].

Обычно управление ядерным спином изотопа в гибридных системах NV-13C предлагается осуществлять с помощью радиочастотных импульсов. В работе проведена оценка возможности непрямого управления ядерными спинами изотопа

через СВЧ воздействие на электронный спин NV-центра. Так как из-за малого гиромагнитного отношения ядра ^{13}C управление с помощью РЧ-сигнала требует длительных времен воздействия, что влияет на скорость операций и снижает устойчивость ядерных спинов к декогеренции [4], непрямое управление через электронный спин позволяет выполнять операции на несколько порядков быстрее, тем самым радикально уменьшая влияние декогеренции и повышая точность квантовых вентилей [5, 6]. Подход основан на анизотропном сверхтонком взаимодействии и механизме двойного резонанса Хартмана — Хана [7], обеспечивающем эффективный перенос поляризации между электронным и ядерным спинами.

В работе представлены результаты экспериментально-теоретического исследования гибридных спиновых систем NV-^{13}C в образце CVD-алмаза. На основе анализа спектров оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) в слабом магнитном поле идентифицированы четыре конфигурации комплексов, соответствующие различным координационным положениям атома ^{13}C относительно вакансии. Интерпретация спектров выполнена в рамках метода спинового гамильтониана с использованием тензоров сверхтонкого взаимодействия, рассчитанных методами квантово-химического моделирования в работе [8].

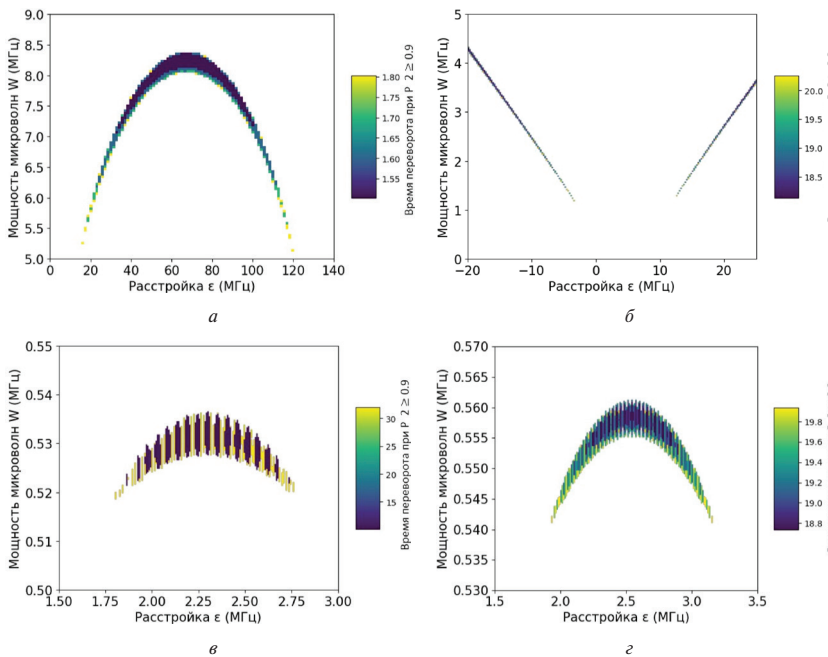


Рис. 1. Тепловые карты зависимости времени переворота (мкс) ядерного спина от расстройки резонанса ε и мощности W микроволн для систем, где ^{13}C — первый сосед вакансии — *а*, второй сосед вакансии — *б*, третий сосед вакансии — *в*, четвертый сосед вакансии — *г*

Для четырех экспериментально идентифицированных систем NV-^{13}C рассчитаны оптимальные параметры СВЧ-поля (частота, мощность, расстройка и длительность импульса), при которых вероятность переворота ядерного спина превышает 0,9 для всех исследованных конфигураций. При этом показано существование не единственного решения, а области параметров, обеспечивающих высокоэффективное управление, соответствующие тепловые карты времени переворота спина от мощности и расстройки СВЧ поля приведены на рис. 1. Установлена связь между структурой сверхтонкого взаимодействия и характерным временем управления: для ближайших конфигураций (сильное анизотропное взаимодействие) реализуются существенно более быстрые операции, тогда как для удаленных атомов ^{13}C время управления возрастает.

Выводы

В работе проведено экспериментально-теоретическое исследование комплексов NV-^{13}C в CVD-алмазе. По спектрам ОДМР идентифицированы четыре конфигурации, соответствующие различным положениям атома ^{13}C относительно вакансии. Сопоставление экспериментальных данных с расчетами на основе спинового гамильтониана позволило связать наблюдаемую мультиплетную структуру с конкретными конфигурациями NV-^{13}C.Для каждой конфигурации рассчитаны оптимальные параметры СВЧ-управления ядерным спином. Показано, что эффективность переворота спина ^{13}C может превышать 0,9, а характерное время управления определяется величиной и анизотропией сверхтонкого взаимодействия. Полученные результаты подтверждают возможность эффективного когерентного управления ядерными спинами ^{13}C и перспективность использования комплексов NV-^{13}C для создания квантовых регистров в алмазе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение о предоставлении из федерального бюджета гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-556 от 25 апреля 2024 г.).

Литература

1. Красников Г. Я., Панасенко П. В., Волосов А. В. Конструктивно-технологические принципы создания СВЧ-элементной базы нового поколения на основе объемных технологий современной кремниевой микроэлектроники // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 3 (163). — С. 10–22.
2. Панасенко П. В., Волосов А. В., Ионов А. С., Красников Г. Я., Петров А. В. Малогабаритные мощные приемо-передающие модули X-диапазона для АФАР // Наноиндустрия. — Спецвыпуск 4s, том 13 (99). — С. 404–406.
3. Doherty M. W. et al. The nitrogen-vacancy colour centre in diamond // Physics Reports, 2013. Vol. 528. № 1. P. 1–45.
4. Dutt M. V. G. et al. Quantum register based on individual electronic and nuclear spin qubits in diamond // Science, 2007. Vol. 316. № 5829. P. 1312–1316.
5. Chen Q., Schwarz I., Plenio M. B. Steady-state preparation of long-lived nuclear spin singlet pairs at room temperature // Physical Review B, 2017. Vol. 95. № 22. P. 224105. DOI: 10.1103/PhysRevB.95.224105.

6. Jelezko F. et al. Observation of coherent oscillation of a single nuclear spin and realization of a two-qubit conditional quantum gate // Phys. Rev. Lett., 2004. Vol. 93. –P.130501.
7. Hegde, Swathi S et al. Efficient Quantum Gates for Individual Nuclear Spin Qubits by Indirect Control // Physical review letters, 2020. Vol. 124. 220501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.220501.
8. Saego K., Sangtawesin S. Indirect control of 13C nuclear spin in nitrogen vacancy center in diamond // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2025. Vol. 2934. № 1. P. 012021.
9. Hartmann S. R., Hahn E. L. Nuclear Double Resonance in the Rotating Frame // Physical Review. 1962. Vol. 128. № 5. P. 2042–2053. DOI: 10.1103/PhysRev.128.2042
10. Nizovtsev A. P. et al. Non-flipping 13C spins near an NV center in diamond: hyperfine and spatial characteristics by density functional theory simulation of the C510[NV]H252 cluster // New Journal of Physics, 2018. Vol. 20. № 2. P. 023022.

УДК 530.145, 538.915

Влияние квантовых флуктуаций на передачу информации с помощью спиновых волн

Борисов П. С.[1,2]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] *Московский физико-технический институт*
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследуется передача информации между логическими кубитами — большими спинами, связанными обменным взаимодействием через спиновую цепочку. Динамика задается уравнением Шрёдингера. Определяется коэффициент связи с учетом квантовых флуктуаций. Результаты важны для создания квантовых компьютеров.
Ключевые слова: кубиты; спиновые волны; обменное взаимодействие; квантовые флуктуации; коэффициент связи.

Quantum fluctuations in spin-wave information transfer

Borisov P. S.[1,2]
[1] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[2] *Moscow Institute of Physics and Technology*
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

We study information transfer between logical qubits — large spins coupled via exchange interaction through a spin chain. The dynamics is governed by the Schrödinger equation. The coupling coefficient is determined with quantum fluctuations. The results are important for building quantum computers.
Keywords: qubits; spin waves; exchange interaction; quantum fluctuations; interqubit coupling coefficient.

Проблема описания магнитных наноструктур является актуальной задачей современной физики конденсированного состояния. Главное ограничение связано с необходимостью использования квантово-механического аппарата для точного описания систем на микроуровне.

В данной работе исследуется связь между логическими кубитами, роль которых играют большие спины, удаленные друг от друга и взаимодействующие посредством спиновых волн через цепочку спинов. Коэффициент связи между кубитами определяется через коэффициенты в разложении общего вектора состояния спиновой системы по базису проекций спинов на ось квантования. Для линейной цепочки рассматриваются только одномагнонные возбуждения. Временная эволюция системы находится решением системы дифференциальных уравнений — матричной формы уравнения Шрёдингера с гамильтонианом, учитывающим наличие внешнего магнитного поля, анизотропию и обменное взаимодействие — главный

механизм распространения локализованного в начальный момент времени возбуждения.

В качестве спиновых кубитов могут выступать NV-центры в алмазе, связь между которыми через магнонные моды имеет дальнодействующий когерентный характер [1]. Возможность манипулировать запутанностью между несколькими удаленными кубитами открывает новые пути для изучения способов обмена квантовой информацией [2].

Решение задачи методами квантовой механики позволяет учесть квантовые флуктуации, которые не являются малыми и носят дальнодействующий характер. Корреляция двух спиновых кубитов наступает с задержкой порядка времени распространения обменного взаимодействия вдоль цепочки спинов [3]. Обсуждается влияние внешней среды: в особенности наличие фононных колебаний, которые при большой температуре могут разрушить связь между кубитами, а также взаимодействие свободных электронов с локализованными спинами. Эффективность переноса спина существенно зависит от энергии свободных электронов и от начального состояния спинов [4].

Разработанный квантово-механический подход открывает новые возможности для описания спиновых кубитов на микроуровне — неисследованной задачи квантовых технологий, важность которой определяется созданием квантовых компьютеров.

Литература

1. Wang X. et al. Electrical control of coherent spin rotation of a single-spin qubit // Npj Quantum Inf. 2020. Vol. 6. Art. 78.
2. Fukami M. et al. Opportunities for Long-Range Magnon-Mediated Entanglement of Spin Qubits via On- and Off-Resonant Coupling // PRX Quantum, 2021. Vol. 2. Art. 040314.
3. Барабаненков М. Ю. и др. Задержка квантовых пространственных корреляций в магнитных наноструктурах // ЖЭТФ, 2020. — Т. 157, вып. 4. — С. 655–660.
4. Tramsen N. et al. Effects of the dynamical magnetization state on spin transfer // Phys. Rev. B, 2021. Vol. 103. Art. 134415.

УДК 530.145

Исследование ресурсоемкости криптографии на эллиптических кривых

Кузнецов Ю. А.[1,2], к. ф.-м. н., Богданов Ю. И.[1,2], д. ф.-м. н.
[1] НИЦ «Курчатовский институт» — ФТИАН им. К. А. Валиева
117218, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36, корп. 1
yurii.a.kuznetsov@gmail.com, bogdanov_yurii@inbox.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В рамках настоящей работы проведена разработка и исследование существующих квантовых схем, необходимых для расчета криптографии на эллиптических кривых, используемых как один из основных проколов шифрования современных банковских систем. Произведена оценка ресурсоемкости алгоритмов с учетом масштабируемости данной задачи. Показано, что реализация даже простейшего криптографического ключа требует колоссального числа кубитов и квантовых гейтов, которые не могут быть обеспечены современными квантовыми компьютерами. Тем не менее, протоколы на основе эллиптических кривых теоретически остаются уязвимыми к квантовому алгоритму факторизации Шора.
Ключевые слова: кубиты; криптография; алгоритм Шора; эллиптические кривые.

Resource cost analysis of elliptic curve cryptography

Kuznetsov Yu. A.[1,2], Ph.D, Bogdanov Yu. I.[1,2], Sc.D
[1] NRC "Kurchatov Institute"– VALIEV IPT RAS
36/1 Nakhimovsky Ave., Moscow, 117218, Russia
yurii.a.kuznetsov@gmail.com, bogdanov_yurii@inbox.ru
[2] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

The development and investigation of existing quantum circuits required for computing elliptic curve cryptography, used as one of the main encryption protocols in modern banking systems, have been carried out. An assessment of the resource intensity of the algorithms has been performed, taking into account the scalability of this problem. It has been shown that the implementation of even the simplest cryptographic key requires a colossal number of qubits and quantum gates, which cannot be provided by modern quantum computers. Nevertheless, protocols based on elliptic curves theoretically remain vulnerable to Shor's quantum factoring algorithm.
Keywords: qubits; cryptography; Shor's algorithm; elliptic curves.

Криптография на эллиптических кривых является фундаментальным строительным блоком современной криптографии. Спустя тридцать лет после их появления в криптографии [1] они используются для реализации механизмов с открытым ключом, таких как обмен ключами, цифровые подписи, безопасность транспортного уровня и систем цифровой валюты Bitcoin.

Наиболее распространенные эллиптических кривые представляют собой кривые в форме Вейерштрасса над специальными простыми числами размером 256, 384 и 521 бит. Они обладают преимуществом относительно небольших размеров параметров и ключей по сравнению с другими криптографическими схемами, такими как схемы на основе RSA [2] или дискретных логарифмов конечного поля [3], при сравнении на одном и том же уровне безопасности.

В настоящей работе показано, что для создания простейшей квантовой схемы, реализующей один шаг вычислений в протоколе эллиптических кривых, необходимо разработать множество квантовых схем обратимой модульной арифметики: модульное сложение, умножение, возведение в квадрат, инверсию и т. п. А также в работе произведена оценка необходимого количества квантовых битов, гейтов CNOT и Тоффоли для реализации n-битной схемы.

Появление масштабируемых квантовых компьютеров создает потенциальную угрозу для криптографических алгоритмов с открытым ключом. В частности, алгоритм Шора позволяет эффективно решать задачу дискретного логарифмирования на эллиптических кривых, что приведет к необходимости перехода на более устойчивые квантовые протоколы криптографии. Однако, современный уровень развития квантовых компьютеров еще очень далек, чтобы представлять опасность взлома данного протокола.

Исследование выполнено в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. Miller V. S. Use of elliptic curves in cryptography // Conference on the theory and application of cryptographic techniques. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1985. P. 417–426.
2. Rivest R. L., Shamir A., Adleman L. A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems // Communications of the ACM. 1978. Vol. 21. № 2. P. 120–126.
3. Häner T. et al. Improved quantum circuits for elliptic curve discrete logarithms // International conference on post-quantum cryptography. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 425–444.

УДК 621.383.523

Лавинные фотодиоды на основе InGaAs/InP для однофотонных детекторов спектрального диапазона 1550 нм

Копытов П. Е.[1,2], Блохин С. А.[3], к. ф.-м. н., Папылев Д. С.[1,2], Левин Р. В.[3], к. ф.-м. н., Андрюшкин В. В.[1,2], к. т. н., Ковач Я. Н.[3], Малеев Н. А.[3], к. т. н., Баранов А. И.[4], к. ф.-м. н., Никитина Е. В.[4], к. ф.-м. н., Андреев А. Ю.[5], к. т. н., Яроцкая И. В.[5], к. т. н., Мармалюк А. А.[5], д. т. н., Ладугин М. А.[5], д. ф.-м. н., Воропаев К. О.[6], Цацульников А. Ф.[7], д. ф.-м. н., Новиков И. И.[1,2], к. ф.-м. н., Карачинский Л. Я.[1,2], д. т. н.

[1] ООО «Коннектор Оптикс»
194292, г. Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, 16, лит. Б
[2] Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49, лит. А
kopytovpe@itmo.ru
[3] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
[4] Академический университет им. Ж. И. Алфёрова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А
[5] АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха»
117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1
[6] АО «ОКБ-Планета»
173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13А, пом. 1Н
[7] Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Настоящее исследование посвящено разработке и исследованию статических характеристик лавинных фотодиодов для однофотонных детекторов спектрального диапазона 1550 нм. Фотодиоды изготовлены из гетероструктуры InGaAs/InP, выращенной методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений, с последующей одностадийной диффузией цинка из металлоорганического источника диэтилцинка.

Ключевые слова: лавинный фотодиод; фосфид индия; арсенид галлия-индия; диффузия; однофотонный детектор.

InGaAs/InP-based avalanche photodiodes intended for 1550-nm single-photon detectors

Kopytov P. E.[1,2], Blokhin S. A.[3], Ph.D, Papylev D. S.[1,2], Levin R. V.[3], Ph.D, Andryushkin V. V.[1,2], Ph.D, Kovach J. N.[3], Maleev N. A.[3], Ph.D, Baranov A. I.[4], Ph.D, Niktinia E. V.[4], Ph.D, Andreev A. Yu.[5], Ph.D, Yarotskaya I. V.[5], Ph.D, Marmalyuk A. A.[5], Sc.D, Ladugin M. A.[5], Sc.D, Voropaev K. O.[6], Tsatsul'nikov A.F.[7], Sc.D, Novikov I. I.[1,2], Ph.D, Karachinsky L. Y.[1,2], Sc.D.

[1] Connector Optics LLC

16 Domostroitel'naya St., Bldg. B, Saint Petersburg, 194292, Russia
[2] ITMO University
49 Kronverksky Ave., Bldg. A, Saint Petersburg, 197101, Russia
kopytovpe@itmo.ru
[3] Ioffe Institute
26 Politekhnisheskaya St. Saint Petersburg, 194021, Russia
[4] Alferov University
8/3 Khlopina St., Bldg. A, Saint Petersburg, 194021, Russia
[5] POLYUS Research Institute of Stelmakh JSC
3/1 Vvedenskogo St., Moscow, 117342, Russia
[6] OKB-Planeta JSC
13A Bolshaya Moskovskaya St., Veliky Novgorod, 173004, Russia
[7] Submicron Heterostructures for Microelectronics,
Research & Engineering Center, Russian Academy of Sciences
26 Politekhnisheskaya St., Saint Petersburg, 194021, Russia

This study presents the development and investigation of the static characteristics of 1550-nanometer avalanche photodiodes for single-photon detectors. The photodiodes are made from an InGaAs/InP heterostructure, which is grown using metal organic chemical vapor deposition, followed by a single-stage zinc diffusion from a metalorganic diethylzinc source

Keywords: avalanche photodiode; indium phosphide; gallium indium arsenide; diffusion; single-photon detector.

В настоящее время активно развиваются квантовые линии связи, для реализации которых необходимы устройства и методы детектирования одиночных фотонов. В частности, в составе систем квантового распределения ключей (КРК) используются детекторы одиночных фотонов на базе лавинных фотодиодов (ЛФД) [1].

Для реализации однофотонных ЛФД широко применяются ЛФД планарной конструкции, созданные на основе гетероструктур InGaAs/InP с раздельными областями поглощения и умножения носителей заряда [2]. Для предотвращения возможности возникновения краевого пробоя в кристалле ЛФД в конструкцию приборов вводят охранные кольца, представляющие собой легированные области с двумерным профилем легирования примесью p-типа в слое InP [2]. Технологически это достигается путем применения локальной диффузии цинка (Zn) в InP через диэлектрическую маску [3]. Одним из перспективных подходов реализации процесса диффузии Zn является применение реакторов установок металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) с использованием диэтилцинка (DEZn) в качестве источника Zn [4].

В рамках представленной работы проведено изготовление гетероструктур ЛФД с применением одностадийной диффузии Zn из металлоорганического источника DEZn в гетероструктуру с поверхностным слоем InGaAs через диэлектрическую маску. Из полученных гетероструктур изготовлены кристаллы ЛФД и исследованы их статические характеристики.

Эпитаксиальная гетероструктура InGaAs/InP ЛФД была выращена методом МОГФЭ на подложке InP, конструкция гетероструктуры схематически представлена на рис. 1. Области с заданной глубиной и профилем распределения примеси p-типа были сформированы в реакторе установки МОГФЭ с помощью локальной

диффузии Zn из металлоорганического источника DEZn через диэлектрическую маску SiO_2. Поверхностный слой InGaAs был введен в конструкцию гетероструктуры для получения эффективного омического p-контакта и формирования двойного профиля диффузии [5, 6].

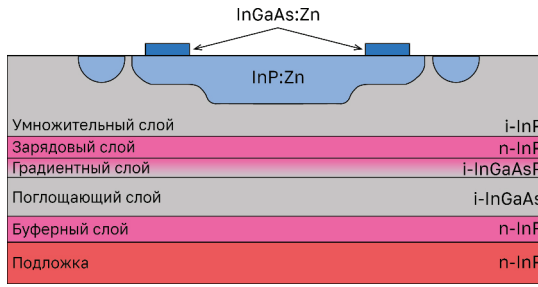


Рис. 1. Схематическая конструкция гетероструктуры ЛФД

В результате измерения статических характеристик ЛФД при комнатной температуре установлено, что изготовленные ЛФД демонстрируют напряжение пробоя 53 В, темновой ток 0,7 нА и емкость 0,15 пФ. Светочувствительность ЛФД, определенная по уровню коэффициента умножения ЛФД равному 1, составила 0,8 А/Вт, с внешней квантовой эффективностью на длине волны 1550 равной 65 %.

Снижение температуры ЛФД до 190 К ведет к падению темнового тока до уровня ниже 10 пА. Температурный коэффициент напряжения пробоя ЛФД составил 85 мВ/К. Анализ поведения темнового тока при изменении температуры и различных обратных смещениях свидетельствует о доминировании вклада в темновой ток ЛФД механизма туннелирования через ловушки в поглощающем слое при высоких напряжениях.

Достигнутые статические характеристики изготовленных ЛФД соответствуют параметрам однофотонных ЛФД корейской компании Wooriro Co Ltd., широко применяемых в системах КРК.

Работа в части изготовления гетероструктур и кристаллов ЛФД, а также в части исследования их характеристик при комнатной температуре, была выполнена при поддержке ОАО «Российские железные дороги».

Литература

1. Hadfield R. H. et al. Optica, 10 (9), 1124 (2023).
2. Chen Y.-C. et al. Materials, 16 (4), 1667 (2023).
3. Jun D. H. et al. J. Korean Phys. Soc., 69, 1341 (2016).
4. Wisser J. et al. J. Appl. Phys., 71 (7), 3234 (1992).
5. Копытов П. Е. и др. Квантовая электроника, 55 (7), 455 (2025).
6. Копытов П. Е. и др. Письма в ЖТФ, 50 (22), 48 (2024).

УДК 538.945

Управление сверхпроводящим током в тонкопленочных гетероструктурах на базе сверхпроводник/ферромагнетик

Камашев А. А.[1], д. ф.-м. н., Гарифьянов Н. Н.[1], д. ф.-м. н., Валидов А. А.[1], к. ф.-м. н., Арбузов Д. А.[1], Катаев В. Е.[2], д. ф.-м. н., Осин А. С.[3], Фоминов Я. В.[3], д. ф.-м. н., Гарифуллин И. А.[1], д. ф.-м. н.

[1]Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
kamandi@mail.ru, pisklia@yahoo.com, validov@kfti.knc.ru, danil.arbuzov@bk.ru, ilgiz0garifullin@gmail.com
420029, г. Казань, Сибирский тракт, 10/7
[2] Leibniz Institute for Solid State and Materials Research
D-01069 Dresden, Germany
v.kataev@ifw-dresden.de
[3]Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН
142432, г. Черноголовка
sashka_osin@mail.ru, fominov@landau.ac.ru

Рассмотрены вопросы управления критической температурой перехода и сверхпроводящим током в тонкопленочных гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик. Представлены результаты экспериментального исследования сверхпроводящих спиновых клапанов на основе сплавов Гейслера $Co_2Cr_{1-x}Fe_xAl_y$ и гетероструктур с управляемыми прозрачностями границ раздела. Достигнута рекордная ширина рабочей температурной зоны порядка 0,6 К, а также высокая эффективность управления в малых внешних магнитных полях.

Ключевые слова: сверхпроводящий спиновый клапан; эффект близости; тонкопленочные гетероструктуры; сплавы Гейслера; спинтроника; критическая температура.

Control of superconducting current in thin-film superconductor/ferromagnet heterostructures

Kamashev A. A.[1], Sc.D, Garifyanov N. N.[1], Sc.D, Validov A. A.[1], Ph.D, Arbuzov D. A.[1], Kataev V. E.[2], Sc.D, Osin A. S.[3], Fominov Y. V.[3], Sc.D, Garifullin I. A.[1], Sc.D

[1] Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS
10/7 Sibirsky Tract, Kazan, 420029, Russia
kamandi@mail.ru, pisklia@yahoo.com, validov@kfti.knc.ru, danil.arbuzov@bk.ru, ilgiz0garifullin@gmail.com
[2] Leibniz Institute for Solid State and Materials Research
D-01069 Dresden, Germany
v.kataev@ifw-dresden.de
[3] L. D. Landau Institute for Theoretical Physics of RAS
142432 Chernogolovka, Russia
sashka_osin@mail.ru, fominov@landau.ac.ru

The problems of controlling the critical transition temperature and superconducting current in thin-film superconductor/ferromagnet heterostructures are considered. The results of an experimental study of superconducting spin valves based on Heusler alloys $Co_2Cr_{1-x}Fe_xAl_y$ and structures with controlled interface transparencies are presented. A record width of the operating temperature zone of the order of 0.6 K has been achieved, which significantly exceeds previously obtained values.

Keywords: superconducting spin valve; proximity effect; thin-film heterostructures; Heusler alloys; spintronics; critical temperature.

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания энергоэффективных и высокоскоростных устройств нового поколения для квантовых вычислений и микроэлектроники. В качестве базовых элементов рассматриваются сверхпроводящие спиновые клапаны (ССК), использующие эффект близости сверхпроводник/ферромагнетик для управления критической температурой перехода.

В работе проведено экспериментальное исследование ССК на основе тонкопленочных гетероструктур, включая сплавы Гейслера $Co_2Cr_{1-x}Fe_xAl_y$ и структуры с управляемыми прозрачностями границ раздела сверхпроводник/ферромагнетик. Основным результатом является достижение рекордной ширины рабочей температурной зоны ССК (порядка 0,6 К), что значительно превышает ранее полученные значения. Также реализованы ССК с управляемыми прозрачностями, позволившие достичь высокой эффективности в малых внешних магнитных полях. Разработанные подходы имеют практическую значимость для создания элементов сверхпроводящей спинтроники, применимых в квантовых вычислениях и высокоскоростной электронике.

Выводы

Экспериментально подтверждена высокая эффективность применения тонкопленочных гетероструктур сверхпроводник/ферромагнетик и сплавов Гейслера для создания сверхпроводящих спиновых клапанов. Полученные результаты открывают новые возможности для разработки элементной базы сверхпроводниковой спинтроники и квантовых вычислительных систем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-72-10025.

УДК 534-14:534.24

СВЧ акустоэлектронные сенсоры на алмазной подложке для исследования тонких пленок, жидкостей и суспензий

Яшин Д. В.[1,2], Сорокин Б. П.[1,2], д. ф.-м. н.
[1] Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс технологических исследований сверхтвердых и новых углеродных материалов
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Центральная, 7а
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
iashin.dv@phystech.edu, bpsorokin1953@yandex.ru

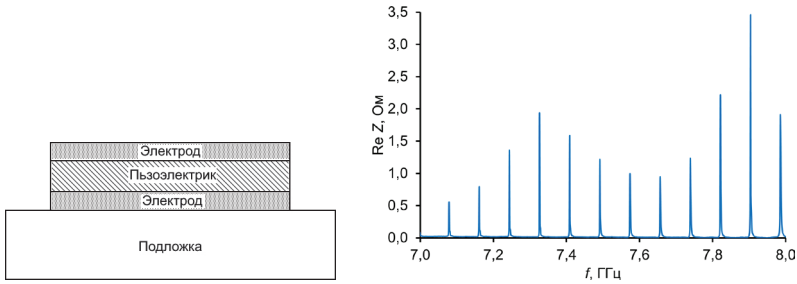
Рассмотрена возможность использования композитных резонаторов на алмазной подложке в качестве сенсоров тонких пленок, жидкостей и суспензий. При помощи сенсора изучен процесс окисления пленки молибдена при высоких температурах. Исследованы жидкости с различным акустическим импедансом.
Ключевые слова: СВЧ; сенсор; окисление молибдена; тонкие пленки

Microwave acoustoelectronic sensors on a diamond substrate for the study of thin films, liquids and suspensions

Yashin D. V.[1,2], Sorokin B. P.[1,2], Doctor of Physico-Mathematical Sciences
[1] The National Research Centre Kurchatov Institute, Kurchatov Complex of Technological Research of Superhard and New Carbon Materials
7a Tsentralnaya St., Troitsk, Moscow, 108840, Russia
[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
iashin.dv@phystech.edu, bpsorokin1953@yandex.ru

The possibility of using composite resonators on a diamond substrate as sensors for thin films, liquids, and suspensions is considered. The process of oxidation of a molybdenum film at high temperatures has been studied using a sensor. Liquids with different acoustic impedances have been studied.
Keywords: microwave; sensor; molybdenum oxidation; thin films

Акустоэлектронные сенсоры давно используются в различных областях: гравиметрия, датчики газа, температуры и т.д. Повышение операционных частот потенциально может увеличить их чувствительность. Композитный резонатор является одним из акустоэлектронных устройств, позволяющих генерировать акустические волны СВЧ-диапазона. Его принципиальная схема и АЧХ представлены на рис. 1. Ключевую роль играет материал подложки, в которой распространяются объемные акустические волны. Так, алмаз обладает низким затуханием, благодаря чему композитные резонаторы с высокой добротностью на его основе работоспособны до частот 40 ГГц [1].



а *б*

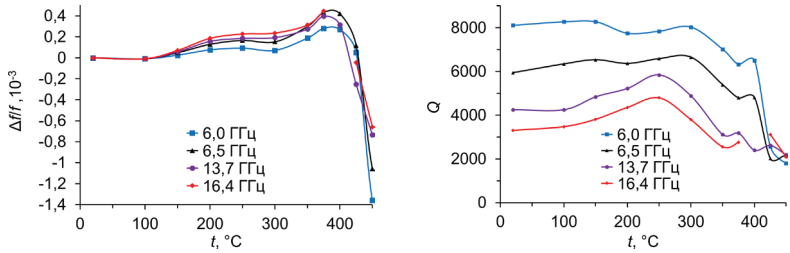
Рис. 1. Принципиальная схема композитного резонатора (*а*) и его АЧХ (*б*)

Целью данной работы было изучение возможностей композитного резонатора на алмазной подложке в качестве сенсоров пленок, жидкостей и суспензий.

В качестве подложек для сенсоров использовались монокристаллические алмазы типа IIa с ориентацией (001), выращенные методом температурного градиента. Металлические электроды и пьезоэлектрический слой AlScN (ASN) наносились на подложку методом магнетронного распыления при помощи установки AJA Orion 8. Чувствительной поверхностью сенсора служила свободная грань алмаза, на которую в ходе экспериментов наносились жидкости и металлические пленки. Показания сенсоров снимались при помощи векторного анализатора цепей E5071C (Agilent).

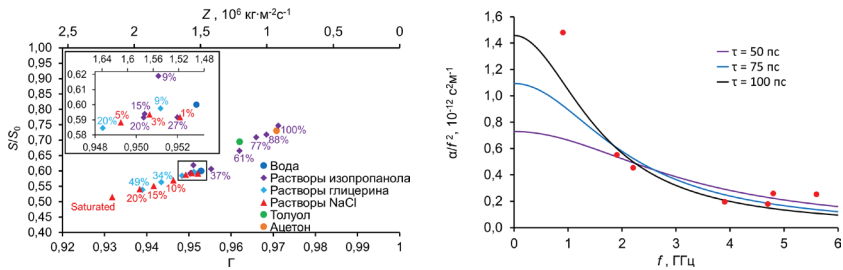
В качестве примера рассмотрим процесс окисления молибдена. Для этого на сенсор со структурой «Al/$Al_{0,72}Sc_{0,28}$N/Mo/(100) алмаз» методом магнетронного распыления был нанесен слой Mo толщиной 1 мкм. Сенсор отжигали на воздухе при температурах $t = 100–500\,^{\circ}C$. Изменения в пленке молибдена изучались методами рентгеноструктурного анализа и растровой электронной микроскопии. Результаты показали уменьшение размеров кристаллитов Mo до 300 °C и окисление до оксидов MoO_2, α-MoO_3 и β-MoO_3 при температурах выше 375 °C. Рабочие частоты сенсора составляли 6,0–16,4 ГГц. Графики зависимостей относительного сдвига частоты $\Delta f/f$ и добротности Q обертонов от температуры отжига t представлены на рис. 2. Рост $\Delta f/f$ и Q до 300 °C мы связываем с уплотнением плени Mo в результате уменьшения размера кристаллитов. Уменьшение значений $\Delta f/f$ и Q выше 400 °C связано с изменением фазового состава пленки.

При помощи 2-х сенсоров со структурами «Al/$Al_{0,72}Sc_{0,28}$N/Mo/(100) алмаз» и «Al/$Al_{0,69}Sc_{0,31}$N/Mo/(100) алмаз» исследовались следующие жидкости: вода, ацетон, толуол, водные растворы NaCl, изопропанола и глицерина с различными концентрациями. Операционные частоты составляли 0,8–5,6 ГГц. Были построены зависимости приведенной амплитуды сигнала сенсора от акустического импеданса жидкости Z и коэффициента отражения акустической волны Г для маловязких жидкостей (рис. 3). По построенным зависимостям была проведена оценка коэффициентов акустического затухания α в глицерине при комнатной температуре на исследованных частотах.



а *б*

Рис. 2. Графики зависимостей $\Delta f/f$ (*а*) и Q (*б*) обертонов от температуры отжига



а *б*

Рис. 3. (*а*) График зависимости приведенной амплитуды сигнала сенсора от Z и Г для маловязких жидкостей для обертона 5,6 ГГц. (*б*) График зависимости α/f^2 от f. Линиями показаны теоретические кривые для разных времен релаксации τ в глицерине

Показано, что СВЧ акустоэлектронные сенсоры на алмазных подложках могут быть использованы для решения широкого круга задач науки, техники и технологий. Получены новые результаты исследования акустических и физико-химических свойств пленок, жидкостей и суспензий (вода, ацетон, толуол, водные растворы NaCl, изопропанола и глицерина с различными концентрациями, высокотемпературное окисление Mo). Ранее было продемонстрировано, что такие сенсоры успешно применялись для исследований фазовых превращений в веществах при высоких и сверхвысоких давлениях. Благодаря тому, что алмаз обладает высокой химической и абразивной инертностью, имеется возможность многократного использования сенсора, в том числе, для анализа агрессивных сред.

Литература

1. Sorokin B. P., Asafiev N. O., Kvashnin G. M., Scherbakov D. A., Terentiev S. A., Blank V. D. Towards 40 GHz excitation of diamond-based HBAR // Appl. Phys. Lett., 2021 — Vol. 118. P. 083501. https://doi.org/10.1063/5.0038867.

УДК 537.312.7

Исследование процессов дрейфа и диффузии в RRAM на основе оксидов металлов

Федотов М. И.[1,2,3], к. ф.-м. н., Ванькаев А. С.[4], Ковешников С. В.[1], к. ф.-м. н.
[1] Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Институтская, 6
skoveshnikov@iptm.ru
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
fedotov.mi@physterch.edu
[4] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78
s.vankaev14@gmail.com

Для исследования роли диффузии при окислении филаментов, а также для проверки справедливости дрейфо-диффузионной модели резистивного переключения проводились измерения величин тока и напряжения в зависимости от времени в процессе Set в ячейках RRAM на основе оксида гафния.
Ключевые слова: энергонезависимая память; резистивный эффект; плавный Reset; нейроморфные сети; мемристоры.

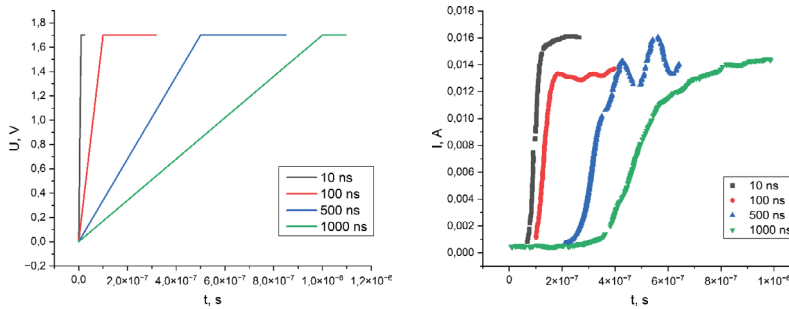
Study of drift and diffusion processes in metal oxide-based RRAM

Ph.D Fedotov M. I.[1,2,3], Vankaev A. S., Ph.D Koveshnikov S. V.[1]
[1] Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of the Russian Academy of Sciences
6 Institutskaya St., Chernogolovka, 142432, Russia
skoveshnikov@iptm.ru
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
fedotov.mi@physterch.edu
[3] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
fedotov.mi@physterch.edu
[4] MIREA — Russian Technological University
78 Vernadskogo Ave., Moscow, 119454, Russia
s.vankaev14@gmail.com

To study the role of diffusion in the oxidation of filaments, and to verify the validity of the drift-diffusion model of resistive switching, measurements of current and voltage as functions of time were performed during the Set process in RRAM cells based on hafnium oxide.

Ключевые слова: non-volatile memory; resistive switching; gradual Reset; neuromorphic systems; memristors.

RRAM является активно исследуемой и перспективной элементной базой для создания аналоговых нейроморфных систем и матриц большого объема [1]. Однако практическое применение RRAM ограничено рядом проблем, ключевой из которой является отсутствие четкого понимания физического механизма резистивного переключения [2]. В частности, до сих пор недостаточно экспериментальных данных о скоростях дрейфа кислородных вакансий и диффузии кислорода в процессах Set и Reset в элементах памяти RRAM.



а *б*

Рис. 1. Зависимость напряжения, подаваемого на ячейку HfOx RRAM в процессе Set от времени (*а*) и тока через ячейку RRAM (*б*)

Представленные на рис. 1 данные, описывающие зависимость подаваемого на ячейку RRAM напряжения как функции времени, показывают, что при приближении к низкоомному состоянию скорость роста тока уменьшается (рис. 1*б*). Для объяснения данного феномена необходимо понять, какие процессы происходят в оксиде в процессе резистивного переключения.

Рост филамента при переходе из низкоомного в высокоомное состояние определяется двумя процессами — дрейфом кислородных вакансий в электрическом поле, за счет которого филамент растет, и диффузии кислорода из окружающего филамент объема диэлектрика, препятствующая росту филамента. Скорость роста филамента за счет дрейфа кислородных вакансий можно оценить по уравнению Мотта и Герни [3] по формуле (1).

$$v = af \exp\left(-\frac{W_0}{kT}\right)\sinh\left(\frac{za}{2kT}E\right). \quad (1)$$

Нами были выполнены расчеты скорости роста филамента для четырех скоростей развертки напряжения, представленных на рис. 1: теоретическая скорость роста за счет дрейфа кислородных вакансий, определяемую формулой (1), и фактическую скорость роста, оцененную по величине зазора между филаментом и электродом Результаты представлены на рис. 2.

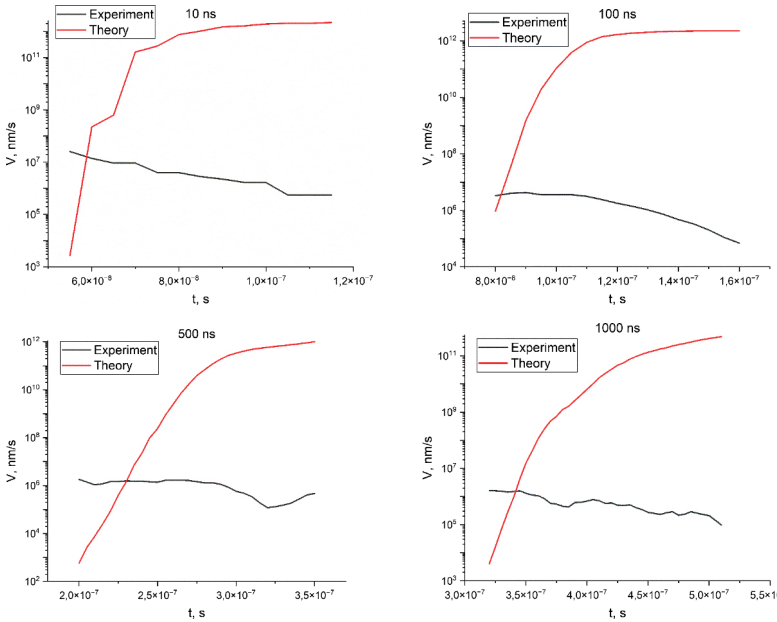


Рис. 2. Сравнение экспериментальной и теоретической зависимости скорости роста филамента с течением времени для времени развертки напряжения 10 нс, 100 нс, 500 нс, 1000 нс

На рис. 3 представлено сравнение теоретической и экспериментальной скорости роста филамента в едином масштабе для всех четырех скоростей развертки.

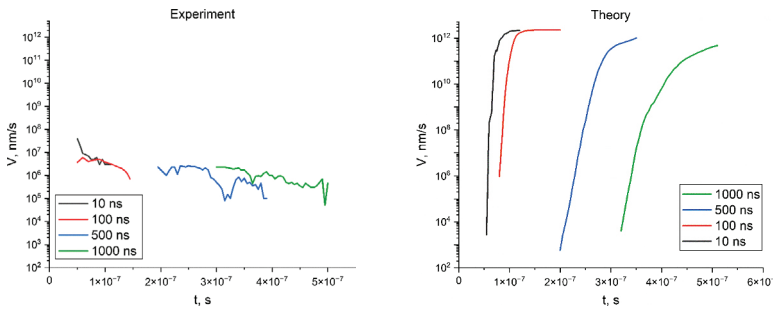


Рис. 3. Сравнение экспериментальной (слева) и теоретической (справа) скоростей роста филамента для различных скоростей развертки напряжения.

Таким образом, получено явное противоречие с экспериментальными данными. Противоречие заключается в том, что, вопреки ожидаемому росту скорости филамента в процессе Set с увеличением напряжения и, соответственно, длины

филамента и возникающего в ячейке RRAM электрического поля, в реальном эксперименте наблюдается падение скорости роста филамента при приближении ячейки к низкоомному состоянию для всех скоростей развертки напряжения. Данное противоречие свидетельствует, что при приближении ячейки к низкоомному состоянию из-за джоулева нагрева филамента активируется диффузия кислорода из объема диэлектрика внутрь филамента, что ограничивает его скорость роста. Другими словами, в низкоомном состоянии ячейки диффузия кислорода начинает доминировать над дрейфом кислородных вакансий. Таким образом, полученное противоречие между теоретическими и экспериментальными оценками скорости роста филамента подтверждает правильность дрейфо-диффузионной модели.

Литература

1. Ielmini D. Resistive switching memories based on metal oxides: mechanisms, reliability and scaling // Semiconductor Science and Technology, 2016. Vol. 31. № 6. Art. no. 063002. DOI: 10.1088/0268-1242/31/6/063002.
2. Fedotov M., Klyukina E., Vankaev A., Znamenskii A., Koveshnikov S. Experimental and Theoretical Study of Multifilamentary Resistive Switching in Nanoscale Transition Metal Oxides // ACS Omega, 2025. Vol. 10. № 35. P. 22345–22356. DOI: 10.1021/acsomega.5c06052.
3. Chen P.-Y., Yu S. Compact modeling of RRAM devices and its applications in 1T1R and 1S1R array design // IEEE Transactions on Electron Devices, 2015. Vol. 62. № 12. P. 4022–4028. DOI: 10.1109/TED.2015.2492421.

УДК 534-16

Исследование температурной чувствительности обратных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах

Дацук Е. Р., Смирнов А. В., к. ф.-м. н., Кузнецова И. Е., д. ф.-м. н.
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7
datsuk.elizaveta@yandex.ru, andre-smirnov-v@yandex.ru, kuziren@yandex.ru

Впервые исследовано влияние температуры на обратные акустические волны в пьезоэлектрических пластинах. Показано, что TCD обратной A_1 волны в YX ниобате лития значительно превосходит TCD прямых волн и ПАВ в том же материале, что перспективно для создания температурных датчиков нового типа.
Ключевые слова: обратные акустические волны; температурный коэффициент задержки; ниобат лития; акустоэлектронный датчик.

Investigation of the temperature sensitivity of backward acoustic waves in piezoelectric plates

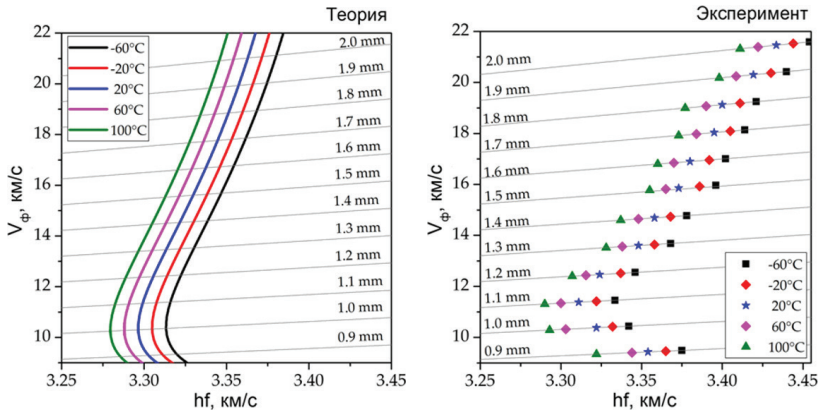
Datsuk E. R., Smirnov A. V., Ph.D, Kuznetsova I. E., Sc.D
Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS
11 Mokhovaya St., Bldg. 7, Moscow, 125009, Russia
datsuk.elizaveta@yandex.ru, andre-smirnov-v@yandex.ru, kuziren@yandex.ru

The effect of temperature on backward acoustic waves in piezoelectric plates has been studied for the first time. It has been shown that the TCD of the backward A_1 wave in YX lithium niobate significantly exceeds that of forward and SAW waves in the same material, which holds promise for the development of new types of temperature sensors.
Keywords: backward acoustic waves; temperature coefficient of delay; lithium niobate; acoustoelectronic sensor.

Температурная чувствительность является важным параметром для акустических волн, поскольку определяет возможные сферы их применения. Акустические волны с низкой чувствительностью к температуре могут быть использованы в радиоэлектронных системах обработки сигналов, а с высокой — в акустоэлектронных датчиках температуры. Обратные акустические волны в пьезоэлектрических пластинах были впервые теоретически обнаружены в начале 21го века. Предполагается, что благодаря близости к частоте отсечки они могут быть более чувствительны к изменениям условий среды, чем прямые волны [1, 2]. Также использование обратных акустических волн может позволить уменьшить размеры сенсорного устройства [3, 4]. Таким образом, обратные волны являются перспективными для разработки новых типов датчиков, однако на данный момент сенсорные свойства таких волн не были изучены. Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное исследование влияния температуры на обратные акустические волны в пьезоэлектрических пластинах.

В качестве исследуемых материалов были выбраны ниобат лития, иодат лития, парателлурит. В каждом из них был выполнен теоретический расчет с использованием метода матрицы передачи. Были найдены дисперсионные зависимости

обратных акустических волн при температурах от −60 до 100 °C. Результаты для обратной A1 волны в YX ниобате лития представлены на рис. 1*а*. Можно видеть, что при увеличении температуры, дисперсионная кривая смещается в область более низких частот, при этом ее форма практически не изменяется.



а *б*

Рис. 1. Теоретические (*а*) и экспериментальные (*б*) дисперсионные зависимости для акустической волны A1 в YX-ниобате лития при температурах от −60 до 100 °C

Для количественной оценки чувствительности волн к температуре были рассчитаны температурные коэффициенты задержки (TCD) для каждой из исследуемых волн. В результате было показано, что в исследуемых материалах обратные акустические волны обладают отрицательным TCD, что объясняется их аномальной дисперсией.

В табл. 1 приведено сравнение TCD волн различного типа в пластине YX ниобата лития. Можно видеть, что по модулю TCD обратной акустической волны A_1 в два раза превосходит значение TCD для прямых волн первого порядка (A_1, SH_1), и примерно в 40 раз превосходит значения для волн нулевого порядка (A_0, S_0, SH_0) и поверхностных акустических волн (ПАВ).

Таблица 1. Температруные коэффициенты задержки акустических волн различного типа в пластине YX ниобата лития

Тип волны	ПАВ	A_0, SH_0, S_0	SH_1, A_1 — прямая ветвь	A_1 — обратная ветвь
TCD, ppm/°C	72	30 | 60	100 | 1000	−1800 | −2500

Также было проведено экспериментальное исследование влияния температуры от −60 до 100 °C на обратную A1 волну в YX ниобате лития. Для создания образца, встречно-штыревые преобразователи были нанесены на пластину YX ниобата лития с помощью методов магнетронного напыления и проекционной фотолитографии. Образец помещался в температурную камеру, амплитудно-частотные

характеристики измерялись при помощи векторного анализатора цепей. Полученные экспериментальные данные (рис. 1*б*) хорошо согласуются с теоретическими.

Таким образом, в работе было проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния температуры на обратные акустические волны в пьезоэлектрических пластинах. На примере пластины YX ниобата лития показано, что TCD обратных акустических волн значительно превосходит TCD прямых акустических волн и ПАВ. Экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими. Полученные результаты демонстрируют, что обратные акустические волны обладают аномально высокой температурной чувствительностью, что открывает возможности для разработки нового типа температурных сенсоров.

Исследование проведено при финансовой поддержке РНФ (грант № 25-19-00872).

Литература

1. Smirnov A. et al. Backward Acoustic Waves in Piezoelectric Plates: Possible Application as Base for Liquid Sensors // Sensors, 2023. Vol. 23. № 2. P. 648.
2. Caliendo C., Hamidullah M. Pressure sensing with zero group velocity lamb modes in self-supported a-SiC/c-ZnO membranes // Journal of Physics D: Applied Physics, 2018. Vol. 51. № 38. P. 385102.
3. Кузнецова И. Е. и др. Влияние апертуры встречно-штыревого преобразователя на характеристики его выходного сигнала в пьезоэлектрической пластине // Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2020. — Т. 84. — № 6. — С. 790–793.
4. Caliendo C., Hamidullah M. Zero group velocity Lamb waves in diamond/AlN-based layered structures // Proceedings. MDPI, 2017. Vol. 60. № 1.

УДК 535.375.5

Усиление комбинационного рассеяния тонкими пленками Ag, Al, Fe, Ni, Ti

Шестопалова М. С.[1,2], Иванов А. В.[3], Сарычев А. К.[3], Быков И. В.[3], Афанасьев К. Н.[3], Олейников В. А.[1,2], Мочалов К. Е.[1,2]
[1] Институт биоорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН
117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 16/10
shestopalova.milena@gmail.com
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
[3] Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН
125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13

Исследовано усиление комбинационного рассеяния (КР) металл-диэлектрическими микрорезонаторами на основе тонких пленок Ag, Al, Fe, Ni и Ti толщиной 100 нм с нанесенными полистирольными микросферами диаметром 300 нм. Показано, что эффективность усиления существенно зависит от материала пленки и длины волны возбуждения.
Ключевые слова: усиление комбинационного рассеяния; тонкие металлические пленки; неблагородные металлы; усиление электрического поля.

SERS-activity of Ag, Al, Fe, Ni, Ti Thin Films

Shestopalova M. S.[1,2], Ivanov A. V.[3], Sarychev A. K.[3], Bykov I. V.[3], Afanasyev K. N.[3], Oleinikov V. A.[1,2], Mochalov K. E.[1,2]
[1] Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic chemistry, RAS
117997, Russia, Moscow, st. Miklukho-Maklaya, 16/10
shestopalova.milena@gmail.com
[2] National Research Nuclear University "MEPhI"
115409, Russia, Moscow, Kashirskoe Hwy., 31
[3] Institute of Theoretical and Applied Electrodynamics, RAS
125412, Russia, Moscow, st. Izhorskaya, 13

The enhancement of Raman scattering (RS) spectra by metal-dielectric microresonators based on 100 nm thick Ag, Al, Fe, Ni, and Ti thin films with deposited 300 nm polystyrene microspheres was investigated. It was shown that the enhancement efficiency strongly depends on the film material and the excitation wavelength.
Keywords: surface-enhanced Raman scattering; thin metal films; non-noble metals; electric field enhancement.

Оптические сенсоры на основе эффекта усиления КР являются перспективным инструментом высокочувствительного детектирования веществ и реализуются как в виде отдельных подложек, так и в составе интегрированных аналитических устройств[1]. Традиционно ключевым элементом таких сенсоров является плазмонная поверхность благородных металлов — серебра или золота. Серебро обеспечивает более высокое усиление по сравнению с золотом, однако склонно к окислению на воздухе, что снижает стабильность и воспроизводимость сигнала.

Исследование возможности усиления КР неблагородными металлами, не имеющими выраженных плазмонных свойств, такими как Fe, Ni, Ti, актуально как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

В данной работе исследовано усиление КР металл-диэлектрическими микрорезонаторами на основе пленок Ag, Al, Fe, Ni и Ti толщиной 100 нм с осажденными на их поверхность полистирольными микросферами (ПС МС) диаметром 300 нм. Спектры КР ПС МС регистрировали на длинах волн 473, 532, 633 нм. Для определения величины усиления полученные спектры сравнивали со спектрами КР ПС МС на чистом стекле.

Обнаружено, что интенсивность сигнала КР существенно зависит от материала подложки и длины волны возбуждения. На длине волны 532 нм наибольшее усиление наблюдалось на Ag, в то время как на 633 нм интенсивность сигнала на Ag и Al была сопоставима. При этом на 473 нм пленки Al, Fe и Ni обеспечивали более высокий КР-сигнал по сравнению с Ag. Для длины волны 532 нм экспериментальные результаты согласуются с моделированием распределения напряженности электромагнитного поля в COMSOL Multiphysics.

Полученные данные показывают, что Al является альтернативой Ag, обеспечивая сопоставимый уровень усиления. Пленки Fe, Ni и Ti также позволяют усиливать КР, а в коротковолновой области видимого диапазона Al и Ni даже превосходят Ag по интенсивности сигнала.

Литература

1. Recent Developments in SERS Microfluidic Chips: From Fundamentals to Biosensing Applications / S. Lian et al. // ACS Applied Materials & Interfaces, 2025. Vol. 17. № 7. P. 10193–10230.

УДК 537.9

Джозефсоновский магнитный туннельный контакт, как квантовый сенсор магнитного поля

Юрлов В. В.[1,2], Лобкова М. Д.[1] к. т. н., Скирдков П. Н.[1,3] к. ф.-м. н., Звездин К. А.[1], д. ф.-м. н.
[1] ООО «Новые спинтронные технологии»
2121205, г. Москва, Инновационный центр Сколково, Большой б-р, 30, стр. 1
m.shkanakina@rqc.ru
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

Приведено описание возможности реализации квантового сенсора на базе магнитного туннельного контакта, работающем в низкотемпературном режиме, соответствующем двухуровневой системе и управляемого внешним магнитным полем. Проведен анализ величин частот блоховских осцилляций, возникающих в следствие действия магнитного поля, а также влияния шумов на когерентность системы.
Ключевые слова: Спинтроника; магнитный туннельный переход; МТП; квантовый сенсор.

Josephson magnetic tunnel junction as a quantum magnetic field sensor

Yurlov V. V.[1,2], Lobkova M. D.[1], Skirdkov P. N.[1,2], Zvezdin K. A.[1]
[1] "New Spintronic Technologies" LLC
121205, Moscow, Innovation Centre Skolkovo, Bolshoi bulvar, 30/1
m.shkanakina@rqc.ru
[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[3] Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilova St., Moscow, 119991, Russia

A description of the feasibility of implementing a quantum sensor based on a magnetic tunnel junction operating in low-temperature mode, corresponding to a two-level system and controlled by an external magnetic field, is presented. An analysis of the Bloch oscillation frequencies arising from the magnetic field is conducted, as well as the effect of noise on the system's coherence.
Keywords: Spintronics; magnetic tunnel junction; MTJ; quantum sensor.

С момента открытия эффекта переноса спина и гигантского магнетосопротивления, динамика магнитного момента, индуцируемая спиновым током в различных гетероструктурах, привлекает все больше внимания из-за значительной

энергоэффективности и скорости спиновой динамики. В частности, эти результаты активно используются для создания современных спинтронных устройств, и магнитные туннельные контакты играют важную роль в этой области. Одним из таких устройств является сенсор магнитного поля на базе эффекта туннельного магнетосопротивления (ТМС-сенсор или англ. TMR — «tunnel magnetoresistance»), чувствительность которых может достигать 100 пТл, что является важной характеристикой для различных приложений в медицине и технике. Однако, подобные магнитные устройства все еще не способны достичь чувствительности сверхпроводящих элементов, таких как СКВИД (от англ. SQUID, superconducting quantum interference device — «сверхпроводящий квантовый интерферометр»), где данная величина способна достигать 1 фТл [1]. Тем не менее, собственные свойства магнетиков при переходе к криогенному диапазону позволяют рассматривать туннельную структуру, как квантовую двухуровневую систему, способную эффективно откликаться, на возбуждение, создаваемое внешним магнитным полем или спиновым током [2].

Объектом исследования является изучение возможности создания квантового сенсора магнитного поля на базе магнитного туннельного перехода. Известно, что в магнитных структурах при низких температурах и низкой диссипации возможно наблюдение некоторых квантовых особенностей, которые могут быть изоморфны известным задачам о создании двухуровневых систем на основе сверхпроводящих Джозефсоновских контактов. В рамках работы продемонстрирована возможность перехода к квантовому режиму работы в магнитных туннельных контактах. Исследован отклик системы на внешнее магнитное поле, выражающийся в изменении величины квазимомента и, как следствие, появление аналогов блоховских осцилляций. Также проанализировано влияние шумов в данной структуре и времени когерентности квантовых состояний, составляющее порядка 1 мкс, что соответствует характерным временам когерентности в джозефсоновских контактах.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 25-22-00693).

Литература

1. Tutorial: Basic principles, limits of detection, and pitfalls of highly sensitive SQUID magnetometry for nanomagnetism and spintronics / Buchner M. et al. // Journal of Applied Physics, 2018. Vol. 124. № 16.
2. Josephson-like magnetic tunnel junction: Transition from classical to quantum regime / Yurlov V. V. et al. // Physical Review B, 2025. Vol. 112. P. 184405.

УДК 537.622.4

Тонкие ферромагнитные пленки вида CoPd/Al2O3/CoPd для применения в магнитной памяти

Здоровейщев Д. А., к. ф.-м. н. Здоровейщев А. В., д. ф.-м. н. Дорохин М. В.
ННГУ им. Н. И. Лобачевского
603950, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, 23/3
daniel.zdorov@nifti.unn.ru

В работе представлены результаты исследований магнитных свойств многослойных пленок вида CoPd/Al_2O_3/CoPd с вариацией толщины немагнитной прослойки оксида алюминия. Показано, что пленки имеют ступенчатую форму петли гистерезиса при температурах ниже комнатной, что дает возможность их применения для создания многоуровневой магнитной памяти.
Ключевые слова: ферромагнитные пленки; магнитная память

Thin ferromagnetic films of the CoPd/Al_2O_3/CoPd for magnetic memory applications

Zdoroveyshchev D. A., Ph.D Zdoroveyshchev A. V., Sc.D Dorokhin M. V.
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
23/3, Gagarina Ave., Nizhny Novgorod, 603950, Russia
daniel.zdorov@nifti.unn.ru

This paper presents the results of a study of the magnetic properties of multilayer CoPd/Al_2O_3/CoPd films with varying thickness of the nonmagnetic aluminum oxide interlayer. It is shown that the films have a stepped hysteresis loop at temperatures below room temperature, suggesting their potential for use in creating multilevel magnetic memory.
Keywords: ferromagnetic films; magnetic memory

Тенденция к многократному увеличению объема цифровой информации требует развития технологии энергонезависимой памяти. Существующие методы повышения плотности записи в уже ставших классическими устройствах хранения информации (SSD, HDD, DVD и др.) близки к своему теоретичекому пределу. Поэтому задача поиска новых материалов/сред хранения информации и конструкций на их основе становится актуальной. Важнейшими для применения в устройствах памяти особенностями магнитных пленок являются: наличие перпендикулярной магнитной анизотропии, малая толщина, устойчивость к коррозии и мелкая доменнная структура. Всеми этими качествами обладают пленки сплавов вида ферромагнетик/тяжелый металл, например CoPd, CoPt, FePt и др. Так, в [1] авторами была показана возможность формирования элементов памяти с плотностью записи около 40 Гбит/см^2 при использовании пленок сплава CoPt или CoPd. С целью еще большего увеличения плотности записи информации в конструкциях на основе данных материалов было предложено использовать многоуровневые ферромагнитные пленки, у которых ферромагнитные уровни разделялись немагнитными прослойками нормального металла [1, 2]. С использованием данного подхода удалось увеличить плотность записи информации в четыре раза [1] при использовании золота в качестве немагнитного разделителя. В данной работе рассматривается

возможность использования в качестве немагнитной прослойки диэлектрика Al_2O_3 в комбинации с ферромагнитными слоями CoPd.

В настоящей работе исследуемые пленки формировались методом электронно-лучевого испарения в условиях высокого вакуума попеременным испарением высокочистых материалов и представляли собой две пленки, состоящие из шести повторений слоев Co(3 Å)/Pd(5 Å), разделенных немагнитными прослойками оксида алюминия (Al_2O_3). Осаждение проводилось на подложку из полуизолирующего GaAs, а в подготовленной серии образцов варьировалась толщина разделяющего слоя без изменения конфигурации магнитных пленок. На полученных структурах исследовались магнитополевые зависимости сопротивления Холла пропорциональных намагниченности в диапазоне температур 9–300 K.

В работе показано, что при пониженных относительно комнатной температурах, данные пленки демонстрирует ступенчатую петлю гистерезиса, имеющую два устойчивых состояния намагниченности, в которые можно переключать пленку за счет намагничивания до разных магнитных полей. Характерная зависимость с демонстрации возможного переключения приведена на рис. 1. Исследованы температурные зависимости петель перемагничивания данных пленок, определены критические температуры в зависимости от толщины пленки, при которых наблюдается ступенчатый характер магнитополевых зависимостей намагниченности. Зависимость критических температур носит нелинейный характер, что дает возможность предположить о наличии обменного взаимодействия между полученными ферромагнитными слоями, которое обусловлено электронами проводимости ФМ металлов. Данные пленки могут быть использованы в разработке систем магнитной памяти для повышения плотности записи информации за счет «многоуровневого» характера намагниченности.

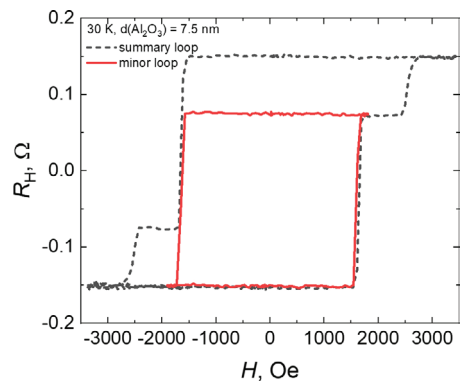


Рис. 1. Магнитополевые зависимости сопротивления Холла для образца CoPd/Al_2O_3(7,5 нм)/CoPd, полученные при 30 K — полная и минорная петли гистерезиса, соответствующие двум состояниям намагниченности

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

1. Zdoroveishchev A.V., Dorokhin M.V., I.L. Kalent'eva et al. // Physics of Metals and Metallography, 2025. V.126, № 13. P. 1627–1636.
2. Tozman P., Isogami S., Suzuki I. et al. // Acta Materialia, 2024. V.271. P. 119869.

УДК 621.3.049

Исследование угла спинового эффекта Холла топологических материалов методом ST-FMR

Силина С. К., Базров М. А., Шестопалов Р. А., Кузнецова М. А., к. ф.-м. н., Козлов А. Г.
ДВФУ, «Лаборатория пленочных технологий»
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
silina.sk@dvfu.ru

Исследование посвящено оценке эффективности зарядово-спиновой конверсии в топологических гетероструктурах на основе $PtTe_2$ и $MoTe_2$ методом ферромагнитного резонанса спиновых моментов (ST-FMR). Экспериментально установлено, что комбинация этих двумерных материалов выращенных эпитаксиально, позволяет увеличить угол спинового Холла более чем в пять раз по сравнению с классическими тяжелыми металлами, тем самым снизив критические плотности токов переключения намагниченности и, в результате открывая возможности для создания высокоэффективных спиновых устройств нового поколения

Ключевые слова: SOT-эффект; топологические материалы; ST-FMR.

Investigation of the Spin Hall Angle in Topological Materials Using the ST-FMR Method

Silina S. K., Bazrov M. A., Shestopalov R. A., Kuznetsova M. A., Ph.D Kozlov A. G.
Far Eastern Federal University (FEFU), Laboratory of Thin Film Technologies
10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russia
silina.sk@dvfu.ru

This study evaluates the efficiency of charge-to-spin conversion in PtTe2 and MoTe2-based topological heterostructures using the spin-torque ferromagnetic resonance (ST-FMR) technique. Experimental results demonstrate that the combination of these epitaxially grown two-dimensional materials increases the spin Hall angle by more than five times compared to conventional heavy metals. This effectively reduces the critical current densities required for magnetization switching, paving the way for the development of highly efficient, next-generation spintronic devices.

Keywords: SOT effect; topological materials; ST-FMR.

Развитие современной наноэлектроники и систем хранения данных требует качественного скачка в энергоэффективности устройств магнитной памяти (MRAM). Одной из центральных задач в области спинтроники является переход от управления намагниченностью с помощью внешних магнитных полей к токоиндуцированному перемагничиванию, за счет механизма передачи спин-орбитальных моментов (SOT). Однако ограничения традиционных тяжелых металлов, связанные с умеренной эффективностью зарядово-спиновой конверсии и сложностью реализации бесполевого переключения, диктуют необходимость поиска новых классов материалов.

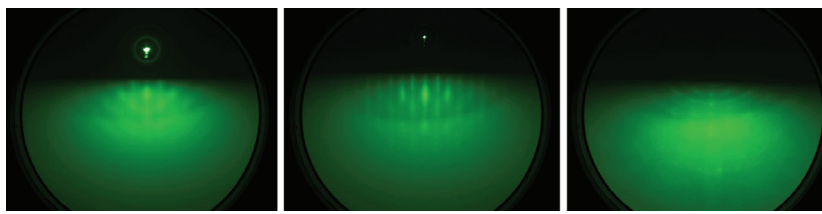
Перспективным решением является использование топологических материалов, например дираковских и вейлевских полуметаллов, к которым относятся дихалькогениды переходных металлов, такие как дителлуриды платины ($PtTe_2$) и молибдена ($MoTe_2$). Эти материалы обладают уникальной электронной структурой и сильным спин-орбитальным взаимодействием. $PtTe_2$ позволяет достичь высокой спиновой проводимости, а $MoTe_2$ за счет пониженной кристаллической симметрии дает возможность генерировать спиновые токи с внеплоскостной поляризацией, что критически важно для детерминированного переключения перпендикулярно намагниченных слоев без участия внешнего поля.

Работа посвящена поиску и исследованию топологических SOT-материалов, демонстрирующих наибольшую эффективность токоиндуцированного перемагничивания. Эффективность SOT может быть оценена количественно и пропорциональна углу спинового эффекта Холла (θSHE). Угол спинового эффекта Холла, в свою очередь, обратно пропорционален критическому току переключения, который определяет энергоэффективность спиновых устройств.

Для количественного анализа параметров спинового тока и эффективности генерации моментов в исследуемых пленках применяется метод ферромагнитного резонанса спиновых моментов (ST-FMR) [1, 2]. Метод ST-FMR основан на возбуждении прецессии намагниченности в ферромагнитном слое под воздействием радиочастотного тока [3]. За счет эффектов анизотропного магнитосопротивления и выпрямления тока на контактах образца регистрируется постоянное напряжение смешивания. Анализ формы полученного резонансного сигнала и разделение его на симметричную и антисимметричную компоненты позволяет напрямую определить спиновый угол Холла и оценить потенциал исследуемых гетероструктур для создания устройств памяти нового поколения.

В рамках данной работы были синтезированы и исследованы магнитные гетероструктуры на основе дихалькогенидов переходных металлов состава: $Al_2O_3/MoTe_2/Pt/Co/Mo/Si$, $Al_2O_3/PtTe_2/Pt/Co/Mo/Si$, $Al_2O_3/PtTe_2/MoTe_2/Pt/Co/Mo/Si$.

Контроль роста пленок и оценка их структурного качества проводились методом дифракции быстрых электронов на отражение (RHEED). Регистрация дифракционных картин осуществлялась до и после осаждения каждого слоя гетероструктуры, включая этапы предварительного прогрева подложек сапфира (Al_2O_3) и напыления слоев теллура, платины, молибдена и кобальта. Анализ дифракционных рефлексов позволяет подтвердить формирование эпитаксиального слоя дителлуридов платины и молибдена, а также оценить качество формируемых интерфейсов (рис. 1).



а *б* *в*

Рис. 1. Дифракционная картина: $MoTe_2$ (*а*), $PtTe_2$ (*б*), $PtTe_2/MoTe_2$ (*в*)

Количественная оценка эффективности зарядово-спиновой конверсии проводилась методом ST-FMR. Анализ симметричной и антисимметричной компонент резонансного сигнала позволил определить ключевые параметры генерации спинового тока (табл. 1).

Таблица 1. Параметры спин-орбитального взаимодействия исследуемых структур

Состав	θ_{SHE}	$4\pi M_{eff}$
$Al_2O_3/MoTe_2/Pt/Co/Mo/Si$	0,04843	14522
$Al_2O_3/PtTe_2/Pt/Co/Mo/Si$	−0,0655	47734
$Al_2O_3/PtTe_2/MoTe_2/Pt/Co/Mo/Si$	0,54467	18450

На основе комплексного анализа структурных и магнитных свойств исследованных гетероструктур сформулированы следующие выводы. Пленки дителлурида молибдена ($MoTe_2$), даже при незначительной толщине слоя, демонстрируют ненулевой спиновый угол Холла. Эффективность конверсии в таких ультратонких слоях оказывается сопоставимой с показателями традиционных тяжелых металлов. В гетероструктуре, содержащей комбинацию слоев $PtTe_2$ и *Pt*, наблюдается отрицательный спиновый угол Холла. Учитывая, что для чистой платины этот показатель является положительным и достигает значений порядка 0,1, можно сделать вывод, что слой *Pt* ингибирует спин-холловский ток, генерируемый теллуридом. Вклад $PtTe_2$ имеет противоположный знак и превосходит вклад платины по абсолютной величине. Комбинация топологических материалов $PtTe_2$ и $MoTe_2$, приводит к существенному увеличению спин-орбитального момента, величина которого более чем в пять раз превышает показатели объемной платины. Возрастание спинового угла Холла на порядок по сравнению с изолированным тонким слоем $MoTe_2$ свидетельствует об объемной природе эффекта. Кроме того, значительную роль играет интерфейс с $PtTe_2$, который обеспечивает дополнительный существенный вклад в общую эффективность генерации спин-орбитальных моментов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 26-72-10158.

Литература

1. Liu L. et al. Spin-torque ferromagnetic resonance induced by the spin Hall effect // Physical review letters, 2011. Vol. 106. № 3. P. 036601.
2. Wang Y., Ramaswamy R., Yang H. FMR-related phenomena in spintronic devices // Journal of Physics D: Applied Physics, 2018. Vol. 51. № 27. P. 273002.
3. Feng Y. et al. Observation of Dzyaloshinskii-Moriya interaction and efficient perpendicular magnetization switching in sputtered (BiSb) 2 Te 3-ferromagnet heterostructures // Physical Review B, 2025. Vol. 112. № 10. P. 104445.

УДК 538.915; 538.958

Изменение свойств материалов на основе твердых растворов β-(InxGa1−x)2O3 и β-(AlxGa1−x)2O3 при вариации концентрации легирующей примеси: расчет из первых принципов

Тютина Е. Р., Рожков А. В., к. х. н., Королев Д. С., к. ф.-м. н.
ННГУ им. Н. И. Лобачевского,
Научно-исследовательский физико-технический институт
603022, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, 23, корп. 3
e.tyutina@unn.ru, rozhkov@chem.unn.ru, dmkorolev@phys.unn.ru

Рассчитаны физико-химические параметры твердых растворов на основе β-Ga_2O_3, легированного атомами In и Al, с применением теории функционала плотности. Получены зависимости ширины запрещенной зоны и параметров решетки от концентрации соответствующих элементов в позиции замещения галлия.
Ключевые слова: оксид галлия; зонный инжиниринг; теория функционала плотности; твердый раствор.

Tuning the properties of β-$(In_xGa_{1-x})_2O_3$ и β-$(Al_xGa_{1-x})_2O_3$ solid-solution materials via dopant concentration variation: a first-principles study

Tyutina E. R., Rozhkov A. V., Korolev D. S.
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Physics and Technology Research Institute
23 Gagarina Ave., Bldg. 3, Nizhny Novgorod, 603022, Russia
e.tyutina@unn.ru, rozhkov@chem.unn.ru, dmkorolev@phys.unn.ru

The physicochemical parameters of β-Ga_2O_3-based solid solutions doped with In and Al atoms were calculated within the framework of density functional theory. The dependencies of the band gap and lattice parameters on the concentration of the corresponding elements occupying gallium substitutional positions were obtained.
Keywords: gallium oxide; band gap engineering; density functional theory; solid solution.

Оксид галлия представляет собой полупроводник с шириной запрещенной зоны 4,5–5,3 эВ, что делает его перспективным материалом для силовой электроники из-за рекордных значений пробивных напряжений по сравнению с другими широкозонными полупроводниками [1]. Также большая величина ширины запрещенной зоны обуславливает поглощение этим материалом света в ультрафиолетовом диапазоне, поэтому на основе Ga_2O_3 возможно создание приборов солнечно-слепой электроники.

Одной из нерешенных задач остается отсутствие методов получения β-фазы Ga_2O_3 с дырочным типом проводимости, из-за чего производство приборов с электронно-дырочными переходами на его основе затруднено. Альтернативным подходом к производству приборов микроэлектроники на основе данного

полупроводника является создание гетеропереходов. Для этого предлагается формирование многослойных структур на основе оксида галлия и его твердых растворов с оксидом алюминия β-$(Al_xGa_{1-x})_2O_3$ [2] и индия β-$(In_xGa_{1-x})_2O_3$ [3], ширина запрещенной зоны которых зависит от концентрации x (такой подход называется зонным инжинирингом).

Одним из методов теоретического исследования объемных материалов является теория функционала плотности (DFT — Density Functional Theory) [4]. Целью данной работы является теоретическое исследование зависимости свойств оксида галлия от концентрации в нем алюминия и индия в позициях замещения галлия методами DFT.

Для расчета была выбрана ячейка β-Ga_2O_3 из восьмидесяти атомов. Путем замены атомов галлия атомами алюминия или индия формировались соответствующие твердые растворы с различными концентрациями примесей. С помощью программного пакета VASP [5] полученные структуры подвергались релаксации, а затем находился минимум распределения электронной плотности с использованием псевдопотенциала HSE06. Таким образом, были получены зонные структуры, параметры решетки и ширины запрещенных зон β-$(In_xGa_{1-x})_2O_3$ и β-$(Al_xGa_{1-x})_2O_3$ с различными концентрациями *x*. Проведен анализ полученных данных применительно к вопросам разработки приборов микроэлектроники.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-10239, https://rscf.ru/project/25-79-10239.

Литература

1. Ion implantation in β-Ga_2O_3: Physics and technology / Alena Nikolskaya, Evgenia Okulich, Dmitry Korolev, Anton Stepanov, Dmitry Nikolitchev, Alexey Mikhaylov, David Tetelbaum, Aleksei Almaev, Charles Airton Bolzan, Antônio Jr Buaczik, Raquel Giulian, Pedro Luis Grande, Ashok Kumar, Mahesh Kumar and Daniela Gogova // Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces and Films, 2021. Vol. 39. P. 30802.
2. Influence of Al content on the optical band-gap enhancement and lattice structure of $(Ga_{1-x}Al_x)_2O_3$ single crystal / Indranil Bhaumik, Mohammad Soharab, Rajeev Bhatt, Amit Saxena, Shailesh Sah and Ashwani Kumar Karnal // Optical Materials, 2020. Vol. 109. P. 110351
3. Indium Gallium Oxide Alloys: Electronic Structure, Optical Gap, Surface Space Charge, and Chemical Trends within Common-Cation Semiconductors / Jack E. N. Swallow, Robert G. Palgrave, Philip A. E. Murgatroyd, Anna Regoutz, Michael Lorenz, Anna Hassa, Marius Grundmann, Holger von Wenckstern, Joel B. Varley and Tim D. Veal // ACS Applied Materials & Interfaces, 2021. Vol. 13. P. 2807–2819
4. Engel Eberhard, Dreizler Reiner. Density Functional Theory: An Advanced Course, Theoretical and Mathematical Physics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. Vol. 1. ISBN: 978-3-642-14089-1.
5. Kresse, G. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set / G. Kresse, J. Furthmüller // Phys. Rev. B, 1996. Vol. 54. № 16. P. 11169–11186.

УДК 53.043

Фотомемристивный эффект резистивного переключения в пленках фталоцианина кобальта и его фторированных производных

Клюкина Е. В.[1], Федотов М. И.[1], к. ф.-м. н., Клямер Д. Д.[2], к. х. н., Басова Т. В.[2], д. х. н., Ковешников С. В.[1], к. ф.-м. н.
[1] Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Институтская, 6
katerina-klyukina@mail.ru, fedotov.mi@phystech.edu, skoveshnikov@iptm.ru
[2] Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН
63009, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 3
klyamerdarya@yandex.ru, basova@niic.nsc.ru

В данной работе представлены результаты исследования фотостимулированного резистивного переключения в пленках фталоцианина кобальта и его фторированных производных. Были определены напряжения пробоя для каждой из структур, а также было оценено время переключения при воздействии светом.
Ключевые слова: фталоцианины; резистивное переключение; фотомемристивный эффект.

Photomemristive effect of resistive switching in films of cobalt phthalocyanine and its fluorinated derivatives

Klyukina E. V.[1], Fedotov M. I.[1], Ph.D, Klyamer D. D.[2]; Ph.D, Basova T. V.2; Ph.D, Koveshnikov S. V.[1], Ph.D
[1]Institute of Problems of Microelectronics Technology and High Purity Materials of the Russian Academy of Sciences
6 Institutskaya St., Chernogolovka, 142432, Russia
katerina-klyukina@mail.ru, fedotov.mi@phystech.edu, skoveshnikov@iptm.ru
[2] Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry of SB RAS (NIIC SB RAS)
3 Akademika Lavrentieva Ave., Novosibirsk, 63009, Russia
klyamerdarya@yandex.ru, basova@niic.nsc.ru

This paper presents the results of a study of photostimulated resistive switching in thin films of cobalt phthalocyanine and its fluorinated derivatives. The breakdown voltages for each of the structures were determined, and the switching time when exposed to light was measured.
Keywords: phthalocyanines; resistive switching; photomemristive effect.

Фталоцианины металлов активно изучаются и рассматриваются в качестве перспективных органических материалов для микроэлектроники. Такой интерес вызван в первую очередь интересными электронными и оптическими свойствами фталоцианинов, связанных с их молекулярной структурой [1], а также термической и химической стабильностью фталоцианинов [2]. Особый интерес представляет

обнаруженное во фталоцианинах кобальта аналоговое резистивное переключение [3], сходного по характеристикам с традиционными оксидами переходных металлов.

В работе исследовались пленки фталоцианина кобальта CoPc и его фторированных производных: CoPcF4 и CoPcF16, которые были нанесены на подложку окисленного кремния, в качестве электродов использовались вольфрамовые зонды и титановые контакты. Измерения вольт-амперных характеристик проводились в латеральном поле в двух режимах: измерение тока в зависимости от напряжения и измерение тока в зависимости от времени при фиксированном напряжении.

Основным результатом проведенных измерений стало обнаружение фотомемристивного эффекта в пленках CoPc и его фторированных производных. На всех трех пленках (CoPc, CoPcF4 и CoPcF16) был обнаружен фотомемристивный эффект: переключение из высокоомного состояния в низкоомное (Set) происходило под действием латерального электрического поля при увеличении напряжения до пробоя, контролируемого величиной тока, а обратный переход в высокоомное состояние (Reset) происходил при облучении ультрафиолетом с длиной волны 253 нм. При этом облучение белым светом не приводило к изменению проводимости. Интересной особенностью УФ-стимулированного процесса Reset является то, что он не зависит от величины приложенного напряжения — Reset происходит как при изменяющемся напряжении той же полярности, что и Set, так и при постоянном напряжении в 2 В и 5 В (напряжение считывания). При этом степень фторирования CoPc влияет на время переключения в процессе Reset: в пленке нефторированного CoPc переключение в процессе УФ-стимулированного Reset происходит почти мгновенно (менее 1 сек), в то время как для CoPcF4 и CoPcF16 требуется примерно 10–20 с и 80–90 с соответственно.

Дополнительно установлено, что УФ-стимулированный Reset происходит при максимальных токах в режиме Set, не превышающих 100 мкА. При больших токах процесс Reset становится крайне нестабильным.

Полученные результаты показывают, что структуры на основе фталоцианина кобальта являются органическими фотомемристорами с УФ-контролируемым напряжением переключения. Данные результаты имеют большое значение для создания перспективных устройств органической электроники и органических фотосенсоров.

Литература

1. Tataroglu, A., Koran, K., Çaliskan, E. et al. Metallo-Phthalocyanines Based Photocapacitors. Silicon 11, 1275–1286 (2019). https://doi.org/10.1007/s12633-018-9917-x.
2. Boileau, N. T., Melville O.A., Mirka, B., Cranston, R., & Lessard, B. H. (2019). P and N type copper phthalocyanines as effective semiconductors in organic thin-film transistor based DNA biosensors at elevated temperatures. RSC advances, 9(4), 2133–2142. https://doi.org/10.1039/c8ra08829b
3. Maity S., Mandal, A., Pradhan, P., Ghosh, A., Topwal, D., Patra B.K., & Som, T. (2026). Versatile Metal Phthalocyanine-Based Memristive Nanowire Network: Unraveling the Dynamics of Digital to Analog Switching. Small science, 6(1), e202500424. https://doi.org/10.1002/smsc.202500424.

УДК 621.3.049

Перенос заряда и электрический пробой в пленках нитрида кремния структур Al/Si3N4/*n*-Si

Ермакова Е. А.[1], Горбачук Н. И.[1], Поклонский Н. А.[1], Шпаковский С. В.[2], Кисель А. Д.[3]
[1] Белорусский государственный университет
220030, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 4
gorbachuk@bsu.by, poklonski@bsu.by, ermakova.7003@gmail.com
[2] ОАО «Интеграл», управляющая компания холдинга «Интеграл»
220108, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Казинца, 121А
shpaks@tut.by
[3] УО «Национальный детский технопарк»
220076, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Франциска Скорины, 25, корп. 3
alex9613358@gmail.com

Показано, что изменение темпов генерации неравновесных носителей заряда при варьировании уровня освещенности структур $Al/Si_3N_4/n$-Si приводит к снижению по абсолютной величине напряжения электрического пробоя обратно смещенных структур и изменению значений напряжения, при которых наблюдаются смена механизма проводимости слоев Si_3N_4 от токов, ограниченных пространственным зарядом, к эмиссии Пула — Френкеля.
Ключевые слова: МДП-структуры; нитрид кремния; область пространственного заряда; электрический пробой.

Charge transfer and electrical breakdown in silicon nitride films of $Al/Si_3N_4/n$-Si structures

Ermakova K. A.[1], Gorbachuk N. I.[1], Poklonski N. A.[1], Shpakovski S. V.[2], Kisel A. D.[3]
[1] Belarusian State University
4 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220030, Belarus
gorbachuk@bsu.by, poklonski@bsu.by, ermakova.7003@gmail.com
[2] JSC "Integral" — Holding Management Company "Integral"
121a Kazintsa St., Minsk, 220064, Belarus
shpaks@tut.by
[3] EI "National Children's Technopark"
25k3 Franziska Skaryna St., Minsk, 220076, Belarus
alex9613358@gmail.com

It is shown that the rate of generation of nonequilibrium charge carriers and illumination level of Al/Si_3N_4/n-Si structures decreases the absolute value of the electrical breakdown voltage of reverse-biased structures and influences the voltage value when conductivity mechanism in the Si_3N_4 layer changes from space charge currents to Poole–Frenkel emission.
Keywords: MOS structures; silicon nitride; space charge region; electrical breakdown.

Тонкие пленки нитрида кремния широко используются в микроэлектронике, как в качестве маскирующих покрытий на различных этапах изготовления дискретных

полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, так и в конструкции завершенных изделий. Несмотря на давнюю историю и огромное количество работ, посвященных изучению механизмов переноса в диэлектриках, (и в частном случае в нитриде кремния), они продолжают активно исследоваться. Это связано с тем, что многообразие диэлектриков, нестехиометрия их состава, наличие дефектов в структуре как диэлектрика, так и полупроводника, наличие поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик/полупроводник приводит к широкому разбросу результатов эксперимента [1–3]. В последнее время интерес к механизмам проводимости пленок нитрида кремния обусловлен также перспективами создания на их основе элементов памяти, в т. ч. на мемристорном эффекте [4, 5].

Цель работы — исследование изменения механизмов проводимости пленок нитрида кремния, входящих в состав структур $Al/Si_3N_4/n$-Si при воздействии сплошного спектра оптического излучения видимого диапазона.

МДП-структуры $Al/Si_3N_4/n$-Si изготавливались на пластинах КЭФ-4,5 (100). Слой Si_3N_4 формировался методом химического осаждения при пониженном давлении из смеси аммиака и моносилана. Исследовались структуры с толщиной Si_3N_4 толщиной 70 нм и 40 нм. Площадь алюминиевых контактов составляла $1{,}85\times1{,}85$ мм^2, а площадь дискретного чипа — $2{,}5\times2{,}5$ мм^2. Вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики регистрировались при комнатной температуре в темноте и при освещении сплошным спектром оптического излучения видимого диапазона, освещенностью от 0 до 2000 Лк.

Помимо хорошо изученной проводимости, связанной с токами, ограниченными пространственным зарядом, и токами по механизму Пула — Френкеля, в исследованных структурах при отрицательных напряжениях наблюдались S-образные вольт-амперные характеристики с участком отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС). Освещение приводило к постепенному исчезновению участка ВАХ с ОДС вследствие формирования стабильного инверсного слоя, обусловленного увеличением темпа генерационно-рекомбинационных процессов. Воздействие излучения приводило также к снижению напряжения электрического пробоя $Al/Si_3N_4/n$-Si и к изменению значений напряжения, при которых наблюдаются смена механизма проводимости Si_3N_4 от токов, ограниченных пространственным зарядом, к эмиссии Пула — Френкеля при увеличении вклада токов, обусловленных последней.

Результаты работы могут представлять интерес для создания мемристорных устройств и отработки методик аттестации полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на стойкость воздействию облучением тяжелыми заряженными частицами.

Литература

1. Механизмы переноса электронов и дырок в диэлектрических пленках / К. А. Насыров, В. А. Гриценко // УФН, 2013. — Т. 183. — № 10. — С. 1009–1114.
2. Атомная структура аморфных нестехиометрических оксидов и нитридов кремния / В. А. Гриценко // УФН, 2008. — Т. 178. — № 7. — С. 727–737.
3. Электронная структура нитрида кремния / В. А. Гриценко // УФН, 2012. — Т. 182. — № 5. — С. 531–541.
4. The missing memristor found / Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., R.S. Williams // Nature, 2008. Vol. 453. № 7191.

5. Накопление и релаксация зарядов в приборных структурах $Al/Si_3N_4/SiO_2/n$-Si в активном режиме / Н. И. Горбачук, Е. А. Ермакова, Н. А. Поклонский, С. В. Шпаковский // ЖТФ, 2025. — Т. 95. — № 11. — С. 2221–2228.

УДК 621.315.592:535

Оптические микрорезонаторы на основе гетероструктур GaP на кремнии

Дворецкая Л. Н.[1,2], к. ф.-м. н., Волосатова В. В.[1], Можаров А. М.[1,3], к. ф.-м. н., Вячеславова Е. А.[1], Минив Д. В.[1], Скороходов А. А.[3], Кавеев А. К.[1,4], д. ф.-м. н., Фёдоров В. В.[1,3], к. ф.-м. н., Макаров С. В.[2], д. ф.-м. н., Мухин И. С.[1], д. ф.-м. н.
[1] СПбАУ РАН, Академический университет им. Ж. И. Алфёрова
124460, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8к3
liliyabutler@gmail.com, volosatovavictoria@yandex.ru, mozharov@spbau.ru, cate.viacheslavova@yandex.ru, dimin4698@gmail.com, skorohod_aa@spbstu.ru, kaveevandrei@yandex.ru, burunduk.uk@gmail.com, imukhin@yandex.ru
[2] Национальный исследовательский университет ИТМО
191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9
s.makarov@metalab.ifmo.ru
[3] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
[4] ФТИ им. А. Ф. Иоффе
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

В работе сформированы и исследованы GaP-микродисковые резонаторы синтезированные на подложке Si в качестве пассивных элементов фотонных интегральных схем (ФИС). С помощью численного моделирования определены требования к геометрии микрорезонаторов для минимизации оптических потерь. Также, показано усиление генерации сигнала второй гармоники от GaP микродисковых резонаторов на Si за счет возникновения неровностей на поверхности микродиска, что может быть использовано в высокоточной диагностики качества изготовления микроструктур.
Ключевые слова: GaP на Si; микродисковые резонаторы; GaP микродиски; нелинейно-оптические свойства GaP.

Optical microresonators based on GaP heterostructures on silicon

Dvoretskaya L. N.[1,2], Ph.D, Volosatova V. V.[1], Mozharov A. M.[1,3], Ph.D, Vyacheslavova E. A.[1], Miniv D. V.[1], Skorokhodov A. A.[3], Kaveev A. K.[1,4], Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Fedorov V. V.[1,3], Ph.D, Makarov S. V.[2], Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Mukhin I. S.[1], Doctor of Physical and Mathematical Sciences
[1] SPbAU RAS, Alferov University
124460, Russia, St. Petersburg, st. Khlopina, 8k3
liliyabutler@gmail.com, volosatovavictoria@yandex.ru, mozharov@spbau.ru, cate.viacheslavova@yandex.ru, dimin4698@gmail.com, skorohod_aa@spbstu.ru, kaveevandrei@yandex.ru, burunduk.uk@gmail.com, imukhin@yandex.ru
[2] ITMO University
9 Lomonosova St., Saint Petersburg, 191002, Russia
s.makarov@metalab.ifmo.ru
[3] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
195251, Russia, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29

[4] *Physicotechnical Institute named after. A.F. Ioffe*
194021, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 26

In this work, GaP microdisk resonators synthesized on a Si substrate as passive elements of photonic integrated circuits (PICs) were formed and studied. Using numerical simulation, the requirements for the geometry of microcavities to minimize optical losses were determined. It is also shown that the generation of the second harmonic signal from GaP microdisk resonators on Si is enhanced due to the appearance of irregularities on the surface of the microdisk, which can be used in high-precision diagnostics of the quality of manufacturing microstructures.
Keywords: GaP on Si; microdisk resonators; GaP microdisks; nonlinear optical properties of GaP.

Одним из ключевых способов повышения энергоэффективности и скорости передачи данных в современных ИТ-системах является переход от электрических соединений в интегральных схемах (ИС) к оптическим методам обработки и передачи информации — созданию фотонных интегральных схем (ФИС) [1]. Классический кремний обладает непрямозонной электронной структурой, что делает его неэффективным для генерации излучения и приводит к сильному поглощению света в видимом диапазоне. В связи с этим перспективной альтернативой выступают эпитаксиальные гетероструктуры на основе азотсодержащих твердых растворов фосфида галлия и его соединений GaP(N,As). Данные материалы являются решеточно-согласованными с кремнием, что открывает возможность монолитной интеграции на Si-платформу светодиодов, лазеров и волноводов, работающих в спектральном диапазоне 600–800 нм [2].

Настоящая работа посвящена созданию пассивных элементов фотоники, а именно, микродисковых резонаторов на базе GaP(N,As). В ходе исследования проведено математическое моделирование микродисковых и кольцевых резонаторов GaP на Si, что позволило оптимизировать их геометрию (диаметр и толщину эпитаксиального слоя), установить параметры, для достижения одномодового режима с эффективным показателем преломления зависящим от толщины эпитаксиального слоя, а также изучить модовый состав данных структур с разной геометрией. Экспериментально были усовершенствованы методы литографии для получения максимально гладких кромок при травлении. Для минимизации оптических потерь была реализована технология «подвешенных» структур путем селективного вытравливания кремниевой подложки под диском удалось создать воздушный зазор, обеспечивающий необходимый высокий контраст показателей преломления и исключающий утечку моды в подложку, рис. 1.

Экспериментальное изучение нелинейно-оптических свойств микродисковых резонаторов GaP на Si выявило локальное усиление генерации второй гармоники (ГВГ), обусловленное наличием субмикронных неоднородностей на поверхности микродиска. Данный эффект связан с локальным нарушением симметрии и эффективным рассеянием на неровностях, что способствует выполнению условий фазового согласования для нелинейных процессов. Обнаруженная зависимость интенсивности нелинейного отклика от морфологии поверхности открывает возможность использования ГВГ в качестве метода высокоточной неразрушающей диагностики качества изготовления и шероховатости фотонных микроструктур.

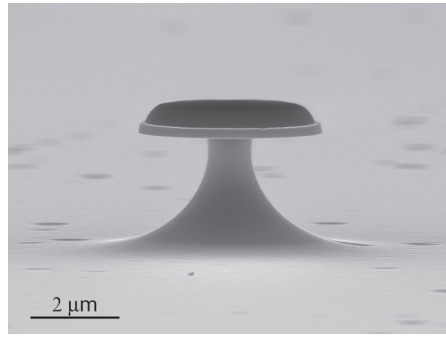


Рис. 1. Блок-схема системы охлаждения ППМ, основанной на адиабатическом расширении газа

Дворецкая Л. Н. благодарит российский научный фонд РНФ (25-72-00195) за финансовую поддержку при выполнении численного расчета. Можаров А. М. благодарит Министерство науки и высшего образования (FSEG-2026-0035) за формирование микродисковых структур.

Литература

1. Schmid H. et al. Template-assisted selective epitaxy of III–V nanoscale devices for co-planar heterogeneous integration with Si // Applied Physics Letters, 2015. Vol. 106. № 23.
2. Ho I., Stringfellow G. B. Solubility of nitrogen in binary III–V systems // Journal of Crystal Growth, 1997. Vol. 178. № 1–2. P. 1–7.

УДК 537.635

Генерация спиновой накачки в металлических системах Co/FeMn/Pt

Богданова Т. В.[1,2], Федоров А. С.[1,2], Сафонов С. С.[2], Федорова А. А.[1,2], Шайхулов Т. А.[2], Калябин Д. В.[1,2], Никитов С. А.[1,2,3]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
bogdanova.tv@phystech.edu
[2]Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
[3]Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского
410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83

Транспорт спина из ферромагнитных в немагнитные материалы был предметом обширных исследований. Особое внимание привлекли чистые спиновые токи, передаваемые из ферромагнетика в металлы обратным спиновым эффектом Холла. В то же время, антиферромагнетики, как важный класс магнитных материалов, традиционно не ассоциируются с транспортом спина, что делает возможность такой передачи спина в значительной степени неизученной. В данной работе продемонстрировано, что введение тонкого слоя FeMn между Co и Pt значительно усиливает спиновые токи, передаваемые в Pt, что указывает на исключительно высокую эффективность переноса спина как на границе раздела Co/FeMn, так и на границе FeMn/Pt. Это создает мощную платформу для изучения антиферромагнитной спиновой накачки и динамики, а также для исследования манипуляции спином в специально созданных структурах, включающих металлические ферромагнетики, антиферромагнетики и тяжелые металлы.

Ключевые слова: спиновая накачка; антиферромагнетики; ферромагнетики; обменное смещение; двухслойные магнитные структуры; интерфейсные магнитные эффекты.

Spin pumping generation in Co/FeMn/Pt metallic systems

Bogdanova T. V.[1,2], Fedorov A. S.[1,2], Safonov S. S.[2], Fedorova A. A.[1,2], Shaikhulov T. A.[2], Kalyabin D. V.[1,2], Nikitov S. A.[1,2,3]
[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2]Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences
11 Mokhovaya St., Bldg. 7, Moscow, 125009, Russia
[3] Saratov State University named after N. G. Chernyshevsky
83 Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russia

Spin transport from ferromagnetic to non-magnetic materials has been the subject of extensive research. Particular attention has been drawn to pure spin currents

transmitted from ferromagnets to metals via the inverse spin Hall effect. At the same time, antiferromagnets, as an important class of magnetic materials, are traditionally not associated with spin transport, making the possibility of such spin transfer largely unexplored. In this work, we demonstrate that the introduction of a thin layer of FeMn between Co and Pt significantly enhances the spin currents transmitted into Pt, indicating an exceptionally high spin transfer efficiency at both the Co/FeMn and FeMn/Pt interfaces. This creates a powerful platform for studying antiferromagnetic spin injection and dynamics, as well as for investigating spin manipulation in specially designed structures that include metallic ferromagnets, antiferromagnets, and heavy metals.

Keywords: spin pumping; antiferromagnets; ferromagnets; exchange bias; two-layer magnetic structures; interface magnetic effects.

В спинтронике спиновый ток, определяемый как разница электрических токов электронов проводимости со спином вверх и вниз, играет ключевую роль в разработке нового типа устройств. Этот ток не связан с переносом электрического заряда, а представляет собой передачу спинового импульса от возбужденного ферромагнетика к соседнему нормальному металлическому слою. В отличие от ферромагнетиков с ненулевой намагниченностью, антиферромагнетики обладают компенсированными магнитными подрешетками, что приводит к нулевой суммарной намагниченности, что существенно затрудняет как возбуждение антиферромагнитного резонанса, так и наблюдение аналогичных эффектов как протекание спинового тока в нормальный металл (НМ). Антиферромагнитные (АФМ) и ферромагнитные (ФМ) материалы, как металлические, так и диэлектрические, также могут поддерживать распространяющиеся спиновые возбуждения.

В работах [1, 2], было экспериментально продемонстрировано, что тонкий слой АФМ, разделяющий ФМ слой и слой нормального металла в гетероструктуре, может передавать и эффективно усиливать спиновый ток. Слой ФМ в условиях ферромагнитного резонанса возбуждает спиновый ток на границе с нормальным металлом, эффективно передающийся через слой АФМ [2]:

$$< J_s >_z = \frac{\hbar}{4\pi} g_r^{\uparrow\downarrow} \left[m \times \frac{dm}{dt} \right]_z . \qquad (1)$$

где $g_r^{\uparrow\downarrow} = g_{r,eff}^{\uparrow\downarrow} \left[1 + \frac{g_{r,eff}^{\uparrow\downarrow} \rho_{AFM} \lambda_{AFM} e^2}{2\pi\hbar \tanh[t_{AFM}/\lambda_{AFM}]} \right]^{-1}$ — реальная часть спиновой проводимости, $g_{r,eff}^{\uparrow\downarrow} = \frac{\Delta\alpha 4\pi M_s t_{FM}}{g\mu_B}$ — эффективная спиновая проводимость, которая определяет эффективность передачи спинового тока из слоя ферромагнетика в слой нормального металла, ρ_{AFM}, t_{AFM}, λ_{AFM}, t_{FM} — удельное сопротивление, толщины и длина спиновой диффузии слоев антиферромагнетика и ферромагнетика, e — заряд электрона, g — фактор Ланде, μ_B — магнетон Бора и $\Delta\alpha = \alpha_{eff} + \alpha_{sp}$ — эффективная константа Гильберта, которая выражается через собственное затухание и спиновую накачку, соответственно.

Спиновый ток (1) может быть обнаружен с помощью обратного спинового эффекта Холла в слое НМ, который определяется выражением [2]:

$$V_{ISHE} \propto \theta_{SH} \left| J_s \times \sigma \right|, \qquad (2)$$

где θ_{SH} — угол спинового эффекта Холла, который определяет эффективность преобразования спинового тока в зарядовый ток, σ — матрица, определяемая спиновой поляризацией.

В данной работе продемонстрирована эффективная передача спинового тока в гетероструктуре АФМ/ФМ/НМ через регистрацию напряжения обратного эффекта Холла в условиях ферромагнитного резонанса при различных углах поворота ориентации постоянного магнитного поля в плоскости пленки. Для сравнений результатов было рассчитано отношение, вызванным чистым спиновым током (спиновой накачкой), напряжений чистового спинового тока для структур АФМ/ФМ/НМ и ФМ/НМ. Было выяснено, аппроксимируя соотношениями (1) и (2), отношение амплитуд величин спинового тока в структуре Co/Pt примерно в 1,6 раза меньше аналогичного сигнала в обменно-смещенной структуре Pt(4 нм)/Co(10 нм)/FeMn(10 нм)/Pt(4 нм):

$$\frac{U_{CT(Co/FeMn/Pt)}}{U_{CT(Co/Pt)}}(Co/Pt) = 1{,}6\,. \qquad (3)$$

В заключение, мы сообщаем о наблюдении спинового транспорта в проводящем антиферромагнетике FeMn и усилении сигнала спиновой накачки при введении слоя FeMn толщиной 10 нм между Co и Pt.

Работа выполнена в ходе реализации Программы развития Научного центра мирового уровня «Центр перспективной микроэлектроники» в рамках соглашения № 075-15-2025-608, заключенного между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и МФТИ.

Литература

1. Antiferromagnonic Spin Transport fromY3Fe5O12into NiO / H. Wang, C. Du, Hammel P. C., F. Yang // Physical Review Letters, 2014. Vol. 113. № 9. P. 097202.
2. Эффект Холла в антиферромагнитном состоянии $Ho_{0.8}Lu_{0.2}B_{12}$ / А. Л. Хорошилов, А. В. Богач, С. В. Демишев, К. М. Красиков, С. Е. Половец, Н. Ю. Шицевалова, В. Б. Филипов, Н. Е. Случанко // Письма в ЖЭТФ, 2022. — Т. 115. — № 3. — С. 130–135.

УДК 537.6; 621.382

Магнитоэлектрические эффекты в туннельных магнитных контактах CoFeB/MgO/CoFeB

Пашенькин И. Ю., к. ф.-м. н., Сапожников М. В., д. ф.-м. н., Караштин Е. А., к. ф.-м. н., Фраерман А. А., д. ф.-м. н., Скороходов Е. В., к. ф.-м. н., Гусев Н. С., Федотов И. А.
Институт физики микроструктур РАН
603087, г. Нижний Новгород, д. Афонино, ул. Академическая, 7
pashenkin@ipmras.ru, msap@ipmras.ru, eugenk@ipmras.ru, andr@ipmras.ru, evgeny@ipmras.ru, gusevns@ipmras.ru, fedotov@ipmras.ru

Исследована зависимость межслоевого обменного взаимодействия в туннельных магнитных контактах CoFeB/MgO/CoFeB от приложенного к барьеру электрического напряжения. Обнаружен новый эффект Холла в туннельных контактах CoFeB/MgO/NM (NM = Pt, Ta), обусловленный спин-орбитальным взаимодействием туннелирующих электронов с внешним электрическим полем в барьере.

Ключевые слова: туннельные магнитный контакт; магнитоэлектрический эффект; магнетосопротивление; обменное взаимодействие; спин-орбитальное взаимодействие; магнитная анизотропия; внешний туннельный эффект Холла.

Magnetoelectric effects in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions

Pashen'kin I. Yu, Ph.D, Sapozhnikov M. V., Sc.D, Karashtin E. A., Ph.D, Fraerman A. A., Sc.D, Skorokhodov E. V., Ph.D, Gusev N. S., Fedotov I. A.
Institute for Physics of Microstructures, RAS
7 Akademicheskaya St., Afonino, Nizhny Novgorod, 603087, Russia
pashenkin@ipmras.ru, msap@ipmras.ru, eugenk@ipmras.ru, andr@ipmras.ru, evgeny@ipmras.ru, gusevns@ipmras.ru, fedotov@ipmras.ru

The dependence of the interlayer exchange coupling in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions on the electric voltage applied to the barrier has been investigated. A new Hall effect has been observed in CoFeB/MgO/NM (NM = Pt, Ta) tunnel junctions, which is caused by the spin-orbit interaction of tunneling electrons with the external electric field in the barrier.

Keywords: magnetic tunnel junction; magnetoelectric effect; magnetoresistance; exchange coupling; spin-orbit interaction; magnetic anisotropy; extrinsic tunnel Hall effect

Поиск способов управления состоянием магнитных наносистем с помощью электрического поля (магнитоэлектрический эффект) является одной из наиболее актуальных и практически значимых задач спиновой электроники. Исследования магнитоэлектрических явлений в том числе направлены на понижение энергии переключения элементов магниторезистивной памяти с произвольным доступом (MRAM) и увеличение плотности записи информации. Наиболее изученным

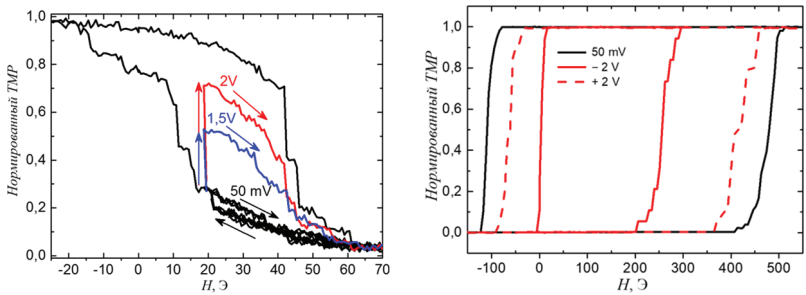
и широко применяемым на практикеспособом переключениярезистивного состояния туннельного магнитного контакта (ТМК) — элемента хранения ячейки MRAM, является использование эффекта передачи спинового момента (spin-transfer torque (STT)), возникающего при протекании спин-поляризованного электрического тока через барьер [1]. Широко исследован и на сегодняшний день активно внедряется способ переключения ячеек магнитной памяти за счет спинового эффекта Холла (spin-orbit torque (SOT)) [2]. Оба механизма объединяет общий недостаток — высокая плотность тока записи (10^6–10^7 А/см^2), сдерживающая процесс миниатюризации MRAM.

Первый магнитоэлектрический эффект, обнаруженный и исследованный в рамках данной работы — зависимость межслоевого обменного взаимодействия магнитных слоев ТМК от электрического поля, приложенного к барьеру. Исследования были проведены в ТМК различным типом магнитной анизотропии. ТМК с анизотропией типа «легкая плоскость» формировались на основе магниторезистивных структур Ta(20)/Pt(10)/Ta(20)/IrMn(10)/CoFeB(3)/MgO(1,5 – 2)/CoFeB(2.5)/Ta(2)/Pt(10). Слой IrMn необходим для наведения однонаправленной анизотропии в закрепленном слое. ТМК с перпендикулярной анизотропией имеют структуру Ta(20)/Pt(10)/Ta(20)/W(3)/CoFeB(1)/MgO(2)/CoFeB(1.5)/W(3)/Ta(2)/Pt(10). Все многослойные пленки выращены методом магнетронного распыления на подложках Si/SiO_2 на установке АТС-2200 (AJA International, Inc.). Постростовая обработка структур для получения ТМК включала последовательные операции оптической литографии, ионного травления и напыления слоев электрической изоляции и контактной металлизации, в также термический отжиг в вакууме при температуре 330 °С в течение 1–2 ч. в присутствие магнитного поля. ТМК с плоскостной анизотропией имеют магнетосопротивление 150–200 % при комнатной температуре, ТМК с перпендикулярной анизотропией — 50 %.

Для обоих типов структур была исследована зависимость формы кривых магнетосопротивления от величины приложенного к барьеру напряжения. В ТМК с плоскостной анизотропией при увеличении напряжения с 50 мВ до 1,25 В наблюдается сдвиг кривой намагничивания свободного слоя по магнитному полю на 10 Э [3]. Кроме того, продемонстрировано переключение резистивного состояния импульсами напряжения величиной 2 В длительностью 100 нс на 50 % от величины магнетосопротивления (рис. 1*а*) [4]. При приложении таких же импульсов напряжения величиной ТМК с перпендикулярной анизотропией происходит изменение положенияи ширины кривой намагничивания свободного слоя (рис. 1*б*), что является результатом совместно проявляющихся эффектов зависимости магнитной анизотропии (VCMA) и межслоевого обменного взаимодействия от электрического поля. Для учета температурных эффектов, были также проведены измерения кривых магнетосопротивления при различных температурах. Показано, что наблюдаемые эффекты не могут быть обусловлены термическим разогревом. Следует отметить, что во всех случаях плотность электрического тока, протекающего через контакт не превышает 10^4 А/см^2, что на 2–3 порядка меньше плотности тока, необходимой для STT или SOT переключения.

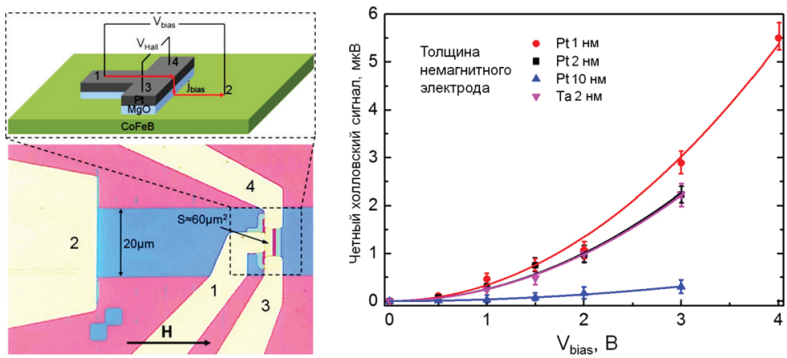
Вторым магнитоэлектрическим эффектом, обнаруженным в туннельных контактах типа CoFeB/MgO/NM (NM = Pt, Ta), является внешний туннельный эффект Холла [5]. Эффект заключается в спин-орбитальном взаимодействии туннелирующих электронов с сильным внешним электрическим полем, приложенным

к барьеру, и проявляется в квадратичной зависимости поперечной разности потенциалов на NM-электродах от напряжения, приложенного к туннельному контакту. Измерения проводились в геометрии обратного спинового эффекта Холла. Для этого из структур Ta(20)/CoFeB(10)/MgO(1.5)/Pt(*t*) были изготовлены туннельные контакты Т-образной формы. Схема образца и геометрия измерений приведена на рис. 2*а*. На рис. 2*б* представлены зависимости холловской разности потенциалов на NM-электроде от величины приложенного к барьеру напряжения при различной толщине NM-электрода из Pt, а также для структуры с верхним электродом из Ta, толщиной 2 нм. Все зависимости аппроксимируются квадратичной функцией. Следует отметить, что величина холловского сигнала не зависит от материала NM-электрода.



а *б*

Рис. 1. *а*) изменение сопротивления TMK с плоскостной анизотропией после подачи импульса напряжения длительностью 100 нс; *б*) кривые магнетосопротивления TMK с перпендикулярной анизотропией в импульсном режиме измерений при величине импульсов напряжения ±2 В и длительности 100 нс



а *б*

Рис. 2. *а*) схема образца и геометрия измерений; *б*) зависимость амплитуды холловского сигнала на NM-электроде от напряжения, приложенного к барьеру туннельного контакта

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИФМ РАН «Физические принципы создания новых функциональных материалов на основе магнитных наноструктур» (тема ГЗ: FFUF-2024-0021).

Литература

1. Huai, Y. Spin-transfer torque MRAM (STT-MRAM): Challenges and pro-spects / Y. Huai // AAPPS Bulletin, 2008. Vol. 18. P. 33.
2. Kazemi, M. All-Spin-Orbit Switching of Perpendicular Magnetization / M. Kazemi, G. E. Rowlands, S. Shi et al. // IEEE Trans. Electron Devices, 2016. Vol. 63. № 11. P. 4499–4505.
3. Пашенькин И. Ю. Магнитоэлектрический эффект в туннельных магни-торезистивных контактах CoFeB/MgO/CoFeB / И. Ю. Пашенькин, М. В. Сапожников, Н. С. Гусев, В. В. Рогов, Д. А. Татарский, А. А. Фраерман, М. Н. Волочаев // Письма в ЖЭТФ, 2020. — т. 111, вып. 12, С. 815.
4. Pashen'kin, I. Yu. Magnetization Reversal of Magnetic Tunnel Junctions by Low-Current Pulses / I. Yu.Pashen'kin, N. S. Gusev, D. A. Tatarskiy, M.V. Sapozh-nikov // IEEE Trans. Electron Devices, 2024. Vol. 71. № 4. —P. 2755–2759.
5. Pashenkin, I. Yu. Extrinsic tunnel Hall effect in MgO-based tunnel junctions / I. Yu. Pashenkin, M. V. Sapozhnikov, N. S. Gusev, E. A. Karashtin, A. A. Fraerman // Phys. Rev. B, 2022. Vol. 106. № 22. P. L220408.

УДК 621.315.592

Анализ методов формирования низкоомных слоев кремния p-типа для pin-диодов СВЧ-диапазона

Халимова К. А.
АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
khalimovaksenia@gmail.com

Рассмотрены способы формирования контактного слоя кремния и определена оптимальная технология их формирования для pin-диодов СВЧ-диапазона. Полученные опытным путем значения об улучшении рабочих характеристик и уменьшении времени формирования контактного слоя в четыре раза, дают сделать вывод о том, что комбинированный метод является оптимальным для получения структур pin-диодов.
Ключевые слова: ионная имплантация; газофазная эпитаксия; pin-диод.

Analysis of methods for forming low-resistance p-type silicon layers for microwave-range PIN diodes

Khalimova K. A.
JSC «RPC «Istok» named after Shokin»
2a Vokzalnaya St., Fryazino, 141190, Russia

Methods for forming the silicon contact layer were examined, and the optimal fabrication technology for microwave-range PIN diodes was identified. Experimental results showing improved performance characteristics and a fourfold reduction in the time required to form the contact layer lead to the conclusion that this method is optimal for producing PIN diode structures.
Keywords: gas-phase epitaxy; ion implantation; PIN diode.

Введение

В настоящий момент наблюдается устойчивый рост интереса к разработке и совершенствованию полупроводниковых приборов СВЧ-диапазона. Это обусловлено их широким применением в радиолокации, аэрокосмической и оборонной промышленности. Одним из ключевых элементов таких устройств являются pin-диоды, характеристики которых в значительной степени определяются параметрами контактных и слаболегированных областей, в частности качеством формирования низкоомных слоев кремния p-типа.

Основная часть

Целью работы было определение оптимальных методов формирования контактных слоев кремния для pin-диодов СВЧ-диапазона. Для эксперимента было изготовлено несколько образцов pin-структур, в которых активный i-слой сформирован методом эпитаксиального наращивания при пониженной температуре, а контактный p^{++}-слой методами: 1 — ионной имплантации, 2 — эпитаксиального наращивания, 3 -комбинированный метод (эпитаксиальный рост основного p-слоя с поверхностным подлегированием), 4 –диффузия.

Ключевым требованием к структурам pin-диодов является величина их сопротивления. Результаты проведенных измерений показали, что наибольшее поверхностное сопротивление характерно для образцов, в которых контактный слой формировался методом эпитаксии. В то же время структуры, полученные с использованием ионной имплантации и комбинированного подхода, показывают в несколько раз меньшие значения поверхностного сопротивления, при этом различия между ними незначительны. Образцы, сформированные методом диффузии, занимают промежуточное положение: их поверхностное сопротивление ниже, чем у эпитаксиальных слоев, но выше по сравнению с имплантационными и комбинированными структурами.

Работа pin-диода характеризуется крутизной его вольт-амперной характеристики (ВАХ) и величиной прямого падения напряжения U_{ds}. Проведенные измерения ВАХ показали, что наилучшие параметры показывает диод, структура которого сформирована с использованием комбинированного метода.

Заключение

Таким образом, в работе показана не только возможность получения контактного слоя основными методами, но и впервые предложен и реализован комбинированный подход, основанный на наращивании контактного p^+-слоя методом газофазной эпитаксии при пониженном давлении с последующим подлегированием поверхности с помощью ионной имплантации. Полученные экспериментальные результаты показывают преимущество разработанного метода, позволяя рассматривать его как наиболее эффективный для формирования структур pin-диодов. Исследования альтернативных методов продолжаются.

Литература

1. Шенгуров, В.Г. Выращивание методом молекулярно-лучевой эпитаксии кремниевых слоев n-типа проводимости на сильнолегированных бором подложках / В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, Д.В. Шенгуров, С.А. Денисов // Физика и техника полупроводников, 2009. — Т. 43. — № 2. — С. 193–196.
2. Бургер Р., Донован Р. (пер. с англ. под ред. В.Н. Мордковича и Ф.П. Пресса). «Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление.Диффузия. Эпитаксия», 969. — 451 с
3. Никулов В.В., Тезикова Л.А.Ю, Рябов В.Н. Исследование профиля легирования эпитаксиальных структур на кремнии вольт-фарадным методом // Электроника СВЧ. 1985. Т.2. — С. 4–13.
4. Зельцер, И. А. Структура кристаллов кремния после имплантации ионами бора, мышьяка, гелия, фосфора, аргона и азота / И.А. Зельцер, Е.Н. Моос // Вестник Рязанского государственного университета им. С.А. Есенина, 2010.
5. Карушкин, Н. Ф. Источники субмиллиметрового излучения на кремниевых лавинно-пролетных диодах / Н.Ф. Карушкин, И.А. Обухов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии, 2021. — Т. 4. — № 2. — С. 95–106.

УДК 537.9

Топологические изоляторы и квантовые эффекты в спинтронике

Пахомов А. С., Бахметьев М. В., к. ф.-м. н., Чернов А. И., д. ф.-м. н.
Центр фотоники и двумерных материалов,
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
a.pakhomov@rqc.ru

Работа посвящена исследованию процессов спиновой инжекции в гетероструктурах на основе топологического изолятора Bi_2Se_3 и процессов спинового рассеяния в спинтронных гетероструктурах с обменно-смещенным ферромагнетиком. Авторами проведен анализ температурной зависимости параметра затухания Гильберта и выявлен механизм обратного потока спинового тока при криогенных температурах. В работе также рассматривается влияние введения в обменно-смещенный ферромагнетик металлических прослоек на эффективность спин-зарядовой конверсии. Результаты обосновывают возможность создания высокоэффективных SOT-устройств на базе изученных материалов.
Ключевые слова: спинтроника; топологический изолятор; ферромагнитный резонанс; спиновая накачка; наноструктурирование

Topological insulators and quantum effects in spintronics

Pakhomov A. S., Bakhemtiev M. V., Chernov A. I.
Center for Photonics and 2D Materials, Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
a.pakhomov@rqc.ru

This work investigates spin injection processes in heterostructures based on the topological insulator Bi_2Se_3 and spin scattering processes in spintronic heterostructures with an exchange-biased ferromagnet. The authors analyzed the temperature dependence of the Gilbert damping parameter and identified the mechanism for reverse spin current flow at cryogenic temperatures. The study also examines the effect of introducing metallic interlayers into the exchange-biased ferromagnet on the efficiency of spin-charge conversion. The results substantiate the possibility of creating highly efficient SOT devices based on the studied materials.
Keywords: spintronics; topological insulator; ferromagnetic resonance; spin pumping; nanostructuring

Переход к квантовым технологиям в спинтронике требует поиска материалов с гигантской спин-орбитальной связью для эффективной генерации спиновых токов. Трехмерные топологические изоляторы (ТИ), такие как Bi_2Se_3, являются идеальными кандидатами на эту роль из-за наличия самой большой величины спин-орбитального взаимодействия и наличия топологического поверхностного состояния, в которых спин электрона жестко связан с его импульсом, что теоретически исключает обратное рассеяние на немагнитных примесях. В работе исследуются

гетероструктуры «ферромагнетик — топологический изолятор» NiFe/Bi_2Se_3, где спиновая инжекция осуществляется методом спин-памп инга при ферромагнитном резонансе. Основное внимание уделено температурной зависимости параметра диссипации (затухания) Гилберта. Эксперименты показывают, что при понижении температуры ниже 90 К наблюдается резкий рост затухания, который не описывается классическими моделями [1]. Такой эффект объясняется конкуренцией между прямой инжекцией спинов и их обратным потоком из ТИ в ферромагнитный слой. Дополнительно рассматривается роль наноструктурирования: сравнение сплошных пленок и массивов наноточек показывает, что квантовые эффекты конверсии сохраняются даже в устройствах субмикронного размера. Важным аспектом является также управление спиновым рассеянием через введение тонких прослоек из меди или тантала. Это позволяет разделять вклады объемных и поверхностных механизмов, таких как обратный спиновый эффект Холла и эффект Рашбы — Эдельштейна. Анализ проводимости указывает на сосуществование двух типов рассеяния — «skew scattering» и «side-jump», баланс между которыми определяет эффективность работы прибора. Использование антиферромагнитных слоев в таких структурах позволяет дополнительно повысить термическую стабильность и защищенность квантовой информации [2]. Таким образом, интеграция топологических изоляторов в наноразмерные гетероструктуры создает фундамент для следующего поколения приборов микроэлектроники. Подобные системы позволяют реализовать переключение намагниченности за счет спин-орбитальных моментов (SOT) с беспрецедентно высокой эффективностью. Изучение фундаментальных механизмов взаимодействия на интерфейсах ТИ является необходимым шагом для перехода от лабораторных образцов к реальным квантовым процессорам и элементам памяти.

Литература

1. Temperature resolved spin-pumping in permalloy-bismuth selenide heterostructure / Pakhomov A. S. et al. // J. Appl. Phys., 2025. Vol. 137. I. 20. –203903.
2. Control of spin scattering via spacer layers in NiFe/nonmagnetic heterostructures / Bakhmetiev M. V. et al. // Phys. Rev. B, 2026. Vol. 113. I. 3. –014442.

УДК 621.3.049.779

Двунаправленный калориметрический датчик скорости потока газа на основе технологии МЭМС

Стекольщиков Е. В.[1,2], Лях М. А.[1,2], Уваров И. В.[2], д. т. н.
[1] Отдел микротехнологий — Ярославль ОФТИ им. К. А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт»
150067, г. Ярославль, ул. Университетская, 21
Stekolshikov.egor.ru@gmail.com
[2] Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова
150003, г. Ярославль, ул. Советская, 14

Разработан датчик скорости потока газа на основе платиновых проводников с аспектным отношением 10^4. Проводники вывешены над каналом в кремнии методом плазмохимического травления. Чувствительность по осям *X* и *Y* составляет 6,7 и 6,0 мВ/(м/с) в диапазоне от 0 до 0,2 м/с при мощности нагрева 10 мВт.
Ключевые слова: МЭМС; датчик потока газа; двунаправленный датчик; платина; плазменное травление.

Bidirectional gas flow rate sensor based on MEMS technology

Stekolshikov E. V.[1,2], Lyakh M. A.[1,2], Uvarov I. V.[2]
[1] Department of Microtechnologies — Yaroslavl OFTI named after K.A. Valiev of the Kurchatov Institute Research Center
21 Universitetskaya St., Yaroslavl, 150067, Russia
Stekolshikov.egor.ru@gmail.com
[2]Yaroslavl State University named after P.G. Demidov
14 Sovetskaya St., Yaroslavl, 150003, Russia

A gas flow velocity sensor based on platinum conductors with an aspect ratio of 10^4 has been developed. Conductors are hung above the channel in silicon by plasma-chemical etching. Sensitivity along the X and Y axes is 6.7 and 6.0 mV/(m/s) in the range from 0 to 0.2 m/s with heating of 10 mW.
Keywords: MEMS; gas flow sensor; bidirectional sensor; platinum; plasma etching.

Тепловые датчики потока газа на основе технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) отличаются малыми размерами, низким энергопотреблением и высокой чувствительностью. Калориметрические датчики регистрируют перепад температур на фронте и спаде теплового облака, создаваемого нагревателем. Большинство датчиков рассчитаны на относительно высокую скорость потока от 10 до 40 м/с и имеют слабую чувствительность в области малых скоростей. В работе представлен датчик для диапазона до 0,2 м/с. Конфигурация датчика позволяет определять не только скорость, но и направление потока.

Чувствительный элемент (ЧЭ) содержит две группы перпендикулярно расположенных проводников длиной 1 мм (рис. 1). В каждой группе центральный проводник шириной 10 мкм служит нагревателем и создает тепловое облако, которое смещается под действием потока. Боковые проводники шириной 2 мкм играют роль терморезисторов. Возникающая разность температур терморезисторов

преобразуется электронной схемой в выходной сигнал, содержащий информацию о скорости и направлении потока. Изготовление ЧЭ проводили на кремниевых пластинах диаметром 100 мм. После термического окисления и вскрытия окон в SiO_2 формировали Ti/Pt-проводники методом взрывной фотолитографии. Далее выполняли двухстадийное травление кремния: анизотропное травление в Bosch-процессе (плазма SF_6/C_4F_8) на глубину 180 мкм и изотропное травление (плазма SF_6) для полного освобождения проводников. «Сухое» вывешивание позволяло избежать обрыва проводников под действием капиллярных сил, возникающих при жидкостном травлении. Фотография ЧЭ представлена на рис. 2.

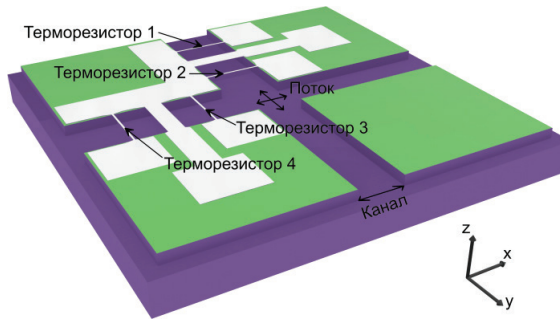


Рис. 1. Схематичное изображение ЧЭ двунаправленного датчика потока газа

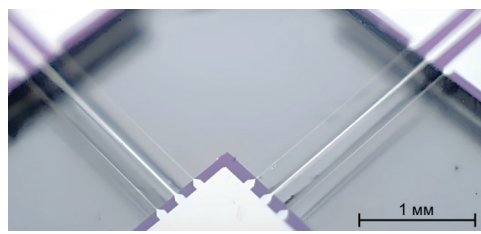


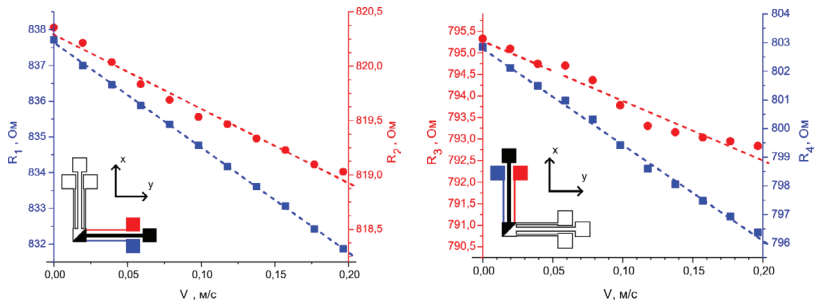
Рис. 2. Фотография ЧЭ датчика

Испытание датчика проводили в потоке азота, контролируемого расходомером РРГ-10. С ростом скорости потока V сопротивление наветренного терморезистора линейно уменьшалось. При V = 0,2 м/с спад составлял 0,8 % относительно исходного значения для направления X (рис. 3*а*) и 0,7 % для направления Y (рис. 3*б*). Сопротивление подветренных терморезисторов также уменьшалось вследствие охлаждения нагревателя. Однако снижение было менее существенным и составляло 0,3 и 0,2 % для направлений X и Y.

Чувствительность датчика представляла собой угловой коэффициент зависимости выходного сигнала пары терморезисторов ΔU от V (рис. 4*а*). Чувствительность составляла 6,7 мВ/(м/с) и 6,0 мВ/(м/с) для направлений X и У. Несовпадение чувствительности в разных направлениях было обусловлено технологическим разбросом характеристик терморезисторов. Чувствительность датчика была сопоставима

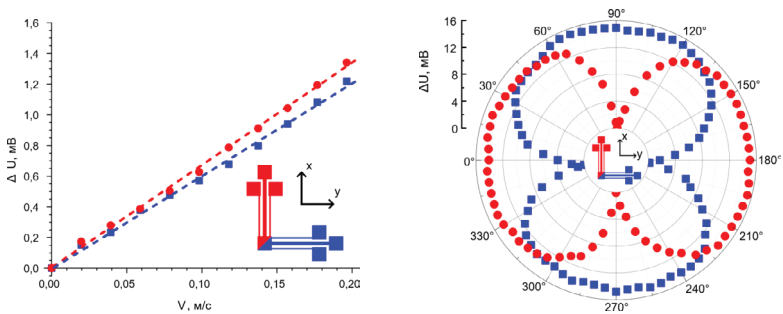
с известными аналогами [1], однако достигалась при существенно меньшей мощности нагрева. Азимутальная характеристика (рис. 4*б*) представляла собой зависимость выходных сигналов ортогональных пар терморезисторов от угла α, под которым поток набегал на датчик. За начало отсчета принимали ось X. Каждая группа проводников имела область нечувствительности шириной около 60°, характеризующуюся слабой зависимостью ΔU от α.

Однако области нечувствительности одной группы соответствовала зона высокой чувствительности другой группы. Таким образом, датчик охватывал все 360°.
Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».



а *б*

Рис. 3. Зависимость сопротивления терморезисторов для направления X (*а*) и Y (*б*) от скорости потока азота



а *б*

Рис. 4. Скоростная (*а*) и азимутальная (*б*) характеристики датчика

Литература

1. Measurement of flow direction and velocity using a micromachined flow sensor / S. Kim, T. Nam, S. Park // Sens. Actuators A. Phys., 2004. Vol. 114. № 2–3. P. 312–318.

УДК 621.3

Исследование факторов влияющих на подвижность зарядов полупроводниковых материалов в печатной электронике

Ульянова М. И.[1,3], Резник А. Ю.[2], к. т. н Тельминов О. А.[1], в. н. с. Воронова Н. В.[1], к. ф.-м. н. Жабин С. Н.[1,3], к. х. н. Винник Д. А.[3]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] АО «МИКРОН»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[3] «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Развитие печатной электроники обуславливает необходимость детального исследования факторов, влияющих на ключевой параметр структур — подвижность зарядов в полупроводниковых материалах. Актуальность работы заключается в анализе процессов переноса носителей заряда для аморфных оксидных полупроводников, и в выборе адекватных моделей для их описания. В ходе исследования был выполнен сравнительный анализ теоретических моделей транспорта носителей заряда, учитывающих перколяционные эффекты и ловушечные состояния, выбрана оптимальная модель для TCAD-моделирования вольт-амперных характеристик аморфного тонкопленочного транзистора и подробно проанализированы особенности расчета подвижности носителей в данной постановке задачи. Для исследования подвижности в печатных a-IGZO TFT также нужно учитывать не только перколяцию и стехиометрию, но и топологию канала, шероховатость, смачиваемость и температурную зависимость, поскольку они напрямую влияют на подвижность через форму ВАХ и субпороговые характеристики.
Ключевые слова: печатная электроника; IGZO; тонкопленочный транзистор; подвижность зарядов.

Research on factors affecting the charge mobility of semiconductor materials in printed electronics

Ulyanova M. I.[1,3], Reznik A. Yu.[2], Telminov O. A.[1], Voronova N. V.[1], Ph.D Zhabin S. N.[1,3], Ph.D Vinnik D. A.[3]
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[2] JSC "Mikron"
6, bld.1, Akademika Valieva St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[3] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

The development of printed electronics necessitates a detailed investigation of the factors affecting one of the key parameters of electronic structures — charge-carrier mobility in semiconductor materials. The relevance of this work lies in the analysis

of charge-transport processes in amorphous oxide semiconductors and in the selection of appropriate models for their description. In this study, a comparative analysis of theoretical charge-transport models accounting for percolation effects and trap states was performed; an optimal model was selected for TCAD simulation of the current–voltage characteristics of an amorphous thin-film transistor, and the specifics of carrier-mobility calculation within this framework were analyzed in detail. For the investigation of mobility in printed a-IGZO TFTs, it is also necessary to consider not only percolation and stoichiometry, but also channel topology, surface roughness, wettability, and temperature dependence, since these factors directly affect the extracted mobility through the shape of the current–voltage characteristics and the subthreshold behavior.
Keywords: printed electronics; IGZO; thin-film transistor; charge carrier mobility.

В работе рассматриваются четыре модели переноса заряда в аморфных оксидных полупроводниках (a-IGZO): зонный перенос в модели случайных барьеров, зонный перенос с ограничением ловушками (multiple trapping), прыжковый (хоппинговый) перенос и модель случайного края зоны с перколяцией. Для каждой из них анализируется согласие с экспериментальными зависимостями подвижности в a-IGZO TFT и возможность извлечения физически интерпретируемых параметров беспорядка и зонной подвижности.

В дополнение к аналитическим моделям в TCAD была выполнена расчетная оценка распределения концентрации носителей заряда на основе классических дрейф-диффузионных уравнений с учетом статистики Ферми — Дирака, рекомбинации Шокли — Рида — Холла и неполной ионизации примесей, что обеспечивает самосогласованное описание профилей потенциала и концентраций в структуре TFT.

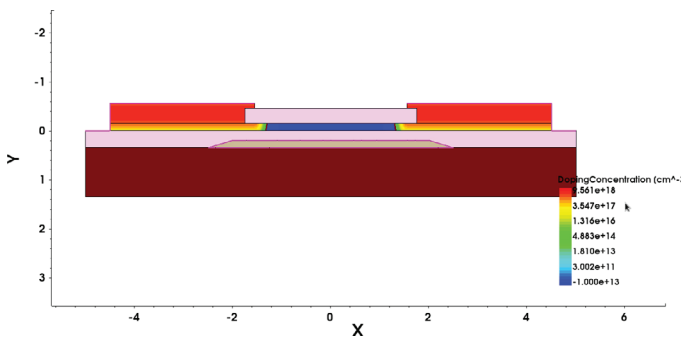


Рис. 1. Результаты TCAD-моделирования концентрации носителей в IGZO-канале TFT

Стехиометрия активного слоя, особенно соотношение In:Ga:Zn, существенно влияет на подвижность носителей, формируя структуру зоны проводимости. Повышение доли индия усиливает перекрытие сферически симметричных In-5s-орбиталей и рост подвижности, тогда как обогащение галлием укрепляет связи Ga–O, расширяет запрещенную зону и снижает утечку, но уменьшает вклад In-орбиталей; таким образом, стехиометрия напрямую определяет эффективную подвижность через орбитальное перекрытие и взаимодействие с механизмами

перколяции и ловушечных состояний [2], что будет учтено при построении модели TCAD.

Для исследования подвижности в печатных a-IGZO TFT нужно учесть не только перколяцию и стехиометрию, но и **топологию канала, шероховатость, смачиваемость и температурную зависимость**, поскольку они напрямую входят в измеряемую подвижность через форму ВАХ и субпороговые характеристики.

Для количественного анализа обычно используют **полевую подвижность**, извлеченную из передаточной характеристики.

Варьируя режимы нанесения (скорость печати, температуру/атмосферу сушки, состав чернил) и, соответственно, **толщину пленки, смачиваемость подложки и шероховатость интерфейса**, необходимо систематически измерять SS и μ по наклону I_D и $\sqrt{I_D}$, чтобы выбрать топологии и режимы, дающие минимальный SS и максимально стабильную μ.

Температурная зависимость подвижности и проводимости дает информацию о ширине запрещенной зоны и энергии активации переноса. Для IGZO часто используют аррениусовскую форму для проводимости:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right), \quad \mu(T) = \frac{\sigma(T)}{qn(T)},$$

где E_A — энергия активации, связанная с положением уровня Ферми относительно края зоны или перколяционного уровня.

Планируется снять температурные зависимости $I_D(T)$, $\sigma(T)$ и $\mu(T)$ для лучших топологий (оптимальные W/L и толщина канала), а также для серий образцов с разной морфологией, чтобы по наклонам аррениусовских графиков $\ln\sigma - 1/T$ и $\ln\mu - 1/T$ определить энергии активации и эффективную ширину запрещенной зоны, а по величине и температурной эволюции рабочих токов оценить стабильность проводимости и влияние перколяции при различных режимах печати.

Таблица 1. Зависимость подвижности образцов при $T = 23\,^{\circ}\mathrm{C}$

Образец (длина канала, номер образца, положительные/отрицательные Vg)	μ, м^2/(В·с)	μ, см^2/(В·с)
30 нм, № 3	4,48e-08	4,48e-04
30 нм, № 6	7,5e-08	7,5e-04
30 нм, № 9	4,6e-09	4,6e-05
30 нм, № 12	1,04e-09	1,04e-05

Таблица 2. Зависимость подвижности образцов при $T = -40\,^{\circ}\mathrm{C}$

Образец (длина канала, номер образца, положительные/отрицательные Vg)	μ, м^2/(В·с)	μ, см^2/(В·с)
30 нм, № 3	4,4e-09	4,4e-05
30 нм, № 6	6,14e-09	6,14e-05
30 нм, № 9	8,8e-11	8,8e-7
30 нм, № 12	2,8e-12	2,8e-8

Образцы по формуле линейной зависимости не дают измерений погрешности по температуре. Значения погрешности по зависимости от корня тока (на участке насыщения) на порядок ниже, чем по линейной формуле.

Также образцы демонстрируют большую асимметрию тока с увеличением температуры.

По данным табл. 1, 2 видно, что оценка подвижности заметно меняется с температурой, тогда как через месяц повторные измерения (по тем же структурам при −40 °C) показывают существенно меньшие значения подвижности и отсутствие выраженной температурной зависимости.

Ранее на той же структуре наблюдалось падение подвижности с ростом температуры, что естественно интерпретировать как усиление рассеяния носителей на тепловых фононах и/или перезаполнение ловушек на границе канал/диэлектрик, приводящее к снижению эффективного числа подвижных носителей. При последующих измерениях этот эффект практически исчез (табл. 3): подвижность для одних и тех же транзисторов стала намного ниже и почти не зависит от температуры, что согласуется с картиной «старения» структуры и релаксации ловушек.

Таблица 3. Зависимость подвижности образцов от температуры

T, °C	μ, *sm* 2Vs (линейная)	μ, *sm* 2Vs (зависимость от корня)
−40	2,431e-03	4,8731e-04
−20	3,614e-03	7,3021e-04
0	5,3961e-03	7,9587e-04
20	7,0244e-03	3,6179e-04
40	4,2621e-03	7,5952e-05
60	3,5145e-03	1,0244e-05

В ходе первых прогонов по напряжению происходит зарядка/разрядка ловушек, смещение порогового напряжения и перераспределение зарядов, после чего часть ловушек оказывается стабильно заполненной, а число действительно подвижных носителей и чувствительность к температуре уменьшаются. В результате после нескольких циклов структура демонстрирует более стабильную температурную зависимость подвижности, что указывает на доминирующую роль ловушек в эволюции транспорта между первым и повторным измерениями.

Литература

1. Percolation description of charge transport in amorphous oxide semiconductors A. V. Nenashev, J. O. Oelerich, S. H. M. Greiner,A. V. Dvurechenskii, F. Gebhard, S. D. Baranovskii.
2. Fundamental Properties of IGZO. (2016). Physics and Technology of Crystalline Oxide Semiconductor CAAC-IGZO.

УДК 621.382.323

Квазистационарные C–V измерения MOS-структур: выбор режима и параметров

Логвинов С. В., Аксенов А. В., Чуканов И. С., Метревели А. А.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
aav047@champus.mephi.ru

В работе рассматривается выбор экспериментальной методики для измерения C-V характеристик MOS-структур в учебно-исследовательской лабораторной постановке. Сопоставлены три подхода: классический режим linear ramp, квазистатический метод Step QSCV и высокочастотный режим HFCV. Показано, что linear ramp целесообразно использовать как базовый и наглядный режим, однако при заметной утечке его точность ограничивается вкладом неемкостного тока. Метод Step QSCV рассматривается как основной рабочий инструмент для квазистатических измерений, требующий обоснованного выбора параметров step voltage, cvoltage, delay time, cinteg, transient response и диапазона тока. Особое внимание уделено влиянию схемы подключения на результат измерения: сравниваются коаксиальная и триаксиальная конфигурации, обсуждается роль экранирования и линии guard при работе с малыми токами утечки и паразитными емкостями.

Ключевые слова: MOS-структуры; C-V измерения; Step QSCV; HFCV; linear ramp; коаксиальное подключение; триаксиальное подключение; ток утечки; паразитная емкость; guard.

Quasistationary C-V Measurements of MOS Structures: Selection of Measurement Mode and Parameters

Logvinov S. V., Aksenov A. V., Chukanov I. S., Metreveli A. A.
National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia
aav047@champus.mephi.ru

The paper considers the selection of an experimental technique for measuring the C-V characteristics of MOS structures in an educational and research laboratory setup. Three approaches are compared: the classical linear ramp mode, the quasi-static Step QSCV method, and the high-frequency HFCV mode. It is shown that the linear ramp method is convenient as a basic and intuitive baseline approach; however, in the presence of noticeable leakage its accuracy becomes limited by the contribution of non-capacitive current. The Step QSCV method is considered as the main operating mode for quasi-static measurements and requires a justified choice of step voltage, cvoltage, delay time, cinteg, transient response, and current range. Special attention is paid to the influence of the connection scheme on the measurement result: coaxial and triaxial configurations are compared, and the role of shielding and the guard line in the presence of low leakage currents and parasitic capacitances is discussed.

Keywords: MOS structures; C-V measurements; Step QSCV; HFCV; linear ramp; coaxial connection; triaxial connection; leakage current; parasitic capacitance; guard.

Работа посвящена выбору оптимального режима измерения C-V характеристик MOS-структур для задач исследовательской деятельности. В качестве базовой точки сравнения рассматривается метод linear ramp, позволяющий наглядно связать емкость с током при линейном изменении напряжения. Однако при наличии утечки и паразитных токов этот подход перестает корректно выделять емкостную составляющую сигнала, поэтому его целесообразно использовать прежде всего как исходный, демонстрационный и сравнительный режим.

Основной акцент сделан на методе Step QSCV, в котором емкость определяется через приращение заряда при малом дополнительном шаге напряжения. Для данного режима критичен выбор параметров step voltage, cvoltage, delay time, cinteg, transient response и токового диапазона. Step QSCV предлагается рассматривать как основной режим последующих экспериментов, поскольку он обеспечивает более гибкую настройку измерения и лучше приспособлен к работе в условиях заметной утечки, чем классический ramp-подход.

Дополнительно рассматривается высокочастотный режим HFCV как средство контрольного сравнения, оценки частотного поведения структуры, проверки модели Cp/Rp, а также верификации качества линий подключения. Показано, что выбор между коаксиальной и триаксиальной схемами подключения является не второстепенной технической деталью, а важной частью всей измерительной методики. Триаксиальная конфигурация с guard особенно важна при малых токах утечки и повышенных требованиях к подавлению паразитных токов и емкостей, тогда как коаксиальная схема может использоваться как более простое и наглядное решение для базовых экспериментов.

Практическим результатом работы является формирование понятной и воспроизводимой схемы эксперимента для трех студентов, каждый из которых может быть ориентирован на отдельный измерительный режим: linear ramp, Step QSCV и HFCV/LCR. Такой подход позволяет быстро развернуть серию согласованных измерений, сопоставить влияние параметров и конфигурации подключения, а также подготовить основу для последующего количественного анализа полученных C-V данных.

УДК 621.3

Исследование физических механизмов гистерезиса в тонкопленочных транзисторах на основе IGZO

Нечаева Д. А.[1,2], Резник А. Ю.[3], к. ф.-м. н. Жабин С. Н.[1,2], к. т. н. Тельминов О. А.[1], к. ф.-м. н. Воронова Н. В.[1], д. х. н. Винник Д. А.[2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] АО «МИКРОН»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В работе исследуются физические механизмы гистерезиса тока в тонкопленочных транзисторах на основе аморфного IGZO. Установлено, что повышение температуры приводит к расширению гистерезисной петли и сдвигает пороговое напряжение вправо. Обработка поверхности кислородной плазмой уменьшает гистерезис.
Ключевые слова: печатная электроника; IGZO; тонкопленочный транзистор; гистерезис.

Investigation of Physical Mechanisms of Hysteresis in IGZO-Based Thin-Film Transistors

Nechaeva D. A.[1,2], Reznik A. Yu.[3], Ph.D, Zhabin S. N.[1,2], Ph.D, Telminov O. A.[1], Ph.D, Voronova N. V.[1], Sc.D, Vinnik D. A.[2]
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[3] "Mikron" JSC
6 Akademika Valieva St., Bldg. 1, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

This work investigates the physical mechanisms of current hysteresis in thin-film transistors based on amorphous IGZO. It was found that an increase in temperature leads to a widening of the hysteresis loop and shifts the threshold voltage to the right. Oxygen plasma surface treatment reduces hysteresis.
Keywords: printed electronics; IGZO; thin-film transistor; hysteresis.

Современная микроэлектроника требует развития технологий печатной электроники, в том числе тонкопленочных транзисторов (ТПТ). Перспективным направлением является использование аморфных прозрачных оксидов т.н. IGZO для канала ТПТ. Данные вещества обладают высокой подвижностью электронов по сравнению с более традиционными материалами, такими как a-Si:H и органическими полупроводниками и [1]. Распространенной проблемой является наличие гистерезиса на переходных характеристиках ТПТ. Причинами возникновения

данного эффекта являются 1) захват электронов/дырок на поверхностных ловушках на границе диэлектрика затвора [2], 2) возникновение ионизованных кислородных вакансий в полупроводнике [3], 3) наличие донороподобных состояний [3]. Для количественной оценки дефектности границы раздела IGZO/диэлектрик в работе использован метод расчета плотности ловушек (D_{it}) по подпороговому наклону (SS) [4]:

$$D_{it} = C_i\left(\frac{SS\log(e)}{kT}\frac{1}{q}\right),$$

где C_i — емкость подзатворного диэлектрика на единицу площади, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, q — элементарный заряд. С увеличением плотности ловушек подпороговый наклон и ширина гистерезиса увеличивается.

В ходе работы были выполнены исследования вольт-амперных характеристик транзисторных структур (рис. 1) с каналом на основе IGZO, выполненным методом сухой аэрозольной печати.

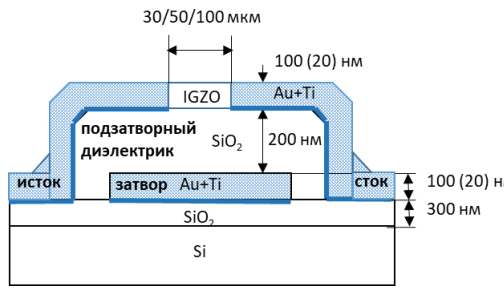
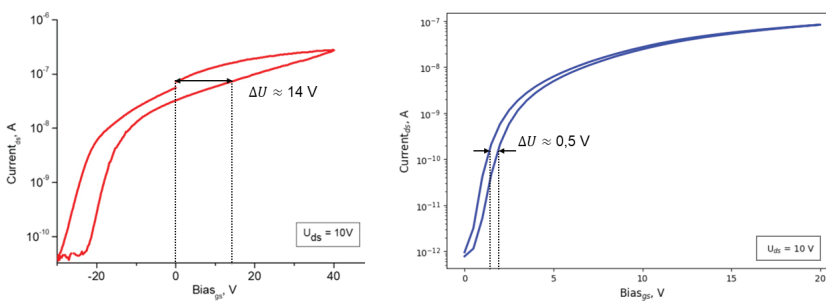


Рис. 1. Поперечное сечение структуры



а *б*

Рис. 2. Переходные характеристики структур:
а) необработанных плазмой, *б*) обработанных плазмой

Были измерены вольт-амперные характеристики для структур без предварительной плазменной обработки и с обработкой (рис. 2). Видно, что при использовании плазмы гистерезисная петля становится значительно меньше. Дополнительные

измерения проводились при 6-х температурах: −40 °C, −20 °C, 0 °C. 20 °C, 40 °C, 60 °C. Для всех температур были определены ширина гистерезисной петли, подпороговый наклон и посчитаны плотности ловушек на границе раздела диэлектрик/полупроводник (рис. 3).

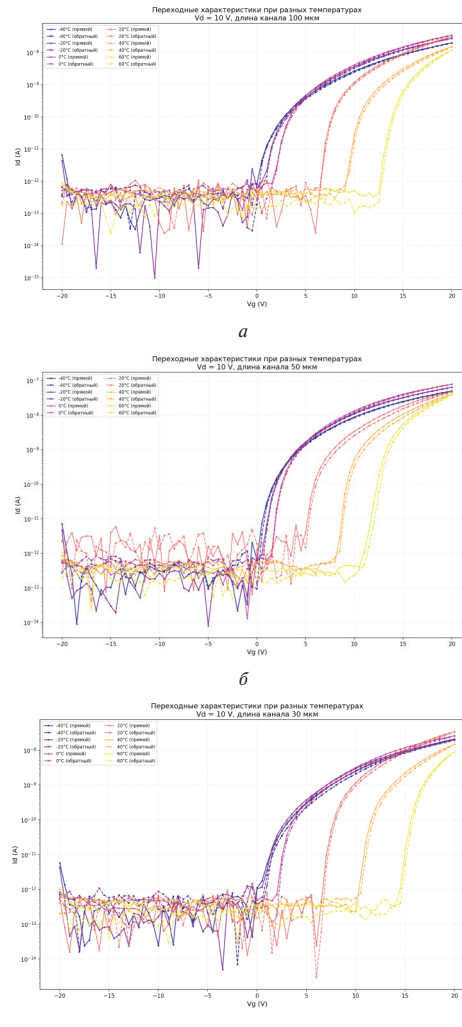


Рис. 3. Переходные характеристики структур, длина канала
а) L = 100 мкм, *б*) L = 50 мкм, *в*) L = 30 мкм

В результате проведенного исследования показано, что повышение температуры приводит к небольшому увеличению ширины гистерезиса в IGZO ТПТ, что связано с бóльшим количеством электронов, захваченных в поверхностных ловушках. Также на всех длинах канала наблюдается сдвиг порогового напряжения вправо по мере увеличения температуры. Это может быть связано с тем, что с увеличением температуры большее количество электронов возбуждается и захватывается ловушками. Они становятся отрицательными, следовательно, нужен больший положительный заряд на затворе, чтобы скомпенсировать отрицательный заряд ловушек.

Предварительная обработка поверхности плазмой так же уменьшает величину гистерезиса. Рассчитанные значения плотности ловушек D_{it} снижаются с ростом температуры, что согласуется с литературными данными [4]. Полученные результаты могут быть использованы для разработки температурно-зависимых компактных моделей гистерезиса IGZO ТПТ.

Литература

1. Suresh A. et al. Room temperature pulsed laser deposited indium gallium zinc oxide channel based transparent thin film transistors // Applied Physics Letters, 2007. Vol. 90:123512.
2. Hung M. P. et al. Negative Bias and Illumination Stress Induced Electron Trapping at Back-Channel Interface of InGaZnO Thin-Film Transistor// Solid-State Letters, 2014. Vol. 3(3):Q13-Q16
3. Oh H. et al. Photon-accelerated negative bias instability involving subgap states creation in amorphous In–Ga–Zn–O thin film transistor // Applied Physics Letters, 2010. Vol. 97:183502
4. Kulchaisit C. et al. High performance top gate a-IGZO TFT utilizing siloxane hybrid material as a gate insulator // Applied Physics Letters, 2018. Vol. 113(9):093501.

УДК 533.9.08

Непрерывный спектр углеродных наночастиц как индикатор газовой температуры в плазмохимическом синтезе алмазных пленок

Кириллов Е. А.[1,2], Минаков П. В.[1], Лопаев Д. В.[1], Рахимов А. Т.[1,2]
[1] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына 119234, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2
[2] МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

В работе показано, что температура газовой смеси, являющаяся критическим параметром для роста алмазных пленок, может быть надежно определена по положению максимума непрерывного планкоподобного спектра, возникающего вследствие присутствия в плазме углеродных наночастиц. Проведено сравнение традиционных методов оптической эмиссионной спектроскопии для определения газовой температуры (анализ полос CN, OH и H_2) с предложенным подходом; установлено их фактическое совпадение. Преимуществом метода является использование компактного мини-спектрометра и простой оптической схемы, что позволяет осуществлять недорогой мониторинг разряда в реальном времени на протяжении длительного процесса осаждения. Данный подход способствует повышению воспроизводимости получения высококачественных алмазных пленок.
Ключевые слова: CVD алмаз; плазмохимическое осаждение; углеродные наночастицы; спектроскопия плазмы.

Continuous spectrum of carbon nanoparticles as an indicator of gas temperature in plasma-chemical synthesis of diamond films

Kirillov E. A.[1,2], Minakov P. V.1, Lopaev D. V.[1], Rakhimov A. T.[1,2]
[1] Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics 119234, GSP-1, Moscow, Leninskie Gory, 1, Bldg. 2
[2] Moscow State University, Faculty of Physics 119991,Moscow, Leninskie Gory, 1

The work shows that the temperature of the gas mixture, which is a critical parameter for the growth of diamond films, can be reliably determined from the peak position of the continuous Planck-like spectrum arising due to the presence of carbon nanoparticles in the plasma. Traditional methods of optical emission spectroscopy for determining gas temperature (analysis of CN, OH and H_2 bands) are compared with the proposed approach; they are found to be in good agreement. The advantage of this method is the use of a compact mini-spectrometer and a simple optical setup, which allows low-cost, real-time monitoring of the discharge over a long deposition process. This approach helps improve the reproducibility of high-quality diamond films.
Keywords: CVD diamond; plasma-chemical deposition; carbon nanoparticles; plasma spectroscopy.

Алмаз благодаря уникальному сочетанию механических, химических, электрических и оптических свойств является перспективным материалом для многих областей промышленности: оптики, микроэлектроники, электрохимии. Одним из наиболее эффективных методов получения как монокристаллических, так и поликристаллических алмазных пленок (АП) служит плазмохимическое осаждение из газовой фазы (plasma-assisted chemical vapor deposition, PACVD).

Несмотря на то что алмаз, синтезированный методом PACVD, потенциально представляет собой самый перспективный широкозонный полупроводник с рядом уникальных, фактически рекордных свойств, его широкое применение в электронике сдерживается рядом факторов. Ключевой среди них — несовершенство технологии получения пленок с высоким кристаллическим совершенством и контролируемым содержанием примесей. В связи с этим важным представляется контроль в реальном времени ключевых физических параметров процесса роста АП как в объеме плазмы, так и на поверхности образца. Для обеспечения такого контроля необходимо понимание ключевых процессов в плазме, позволяющее оптимизировать условия роста АП с заданными параметрами и поддерживать их на протяжении всего процесса осаждения.

Одним из критически важных параметров роста АП является средняя газовая температура возбуждаемых газовых смесей, которая определяет как эффективность образования необходимых для роста радикалов, так и скорость процессов на поверхности растущей пленки [1]. Ранее авторами настоящей работы было показано, что в типичных для PACVD условиях роста АП в эмиссионном спектре плазмы возникает непрерывная составляющая, визуально схожая с планковским спектром черного тела. Это явление можно объяснить только присутствием в объеме плазмы твердотельных углеродных наночастиц [2]. При дальнейшем анализе обнаружилось, что температура, определяемая из положения максимума наблюдаемого планкоподобного спектра от углеродных частиц, совпадает со среднегазовой температурой разряда.

В настоящей работе авторы провели детальное сравнение различных традиционных способов измерения газовой температуры методами оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) — анализ спектра молекулярных полос CN и H_2 [3], OH — с результатами, полученными с помощью анализа непрерывного спектра. Фактическое совпадение данных открывает возможность для упрощенной процедуры контроля разряда в процессе роста АП. Как показано на рис. 1, предложенная методика измерения температуры по непрерывному спектру обладает существенно более высокой чувствительностью по сравнению с традиционными методами ОЭС. Это обусловлено тем, что она позволяет оценить температуру даже в тех областях плазмы, где излучение линий соответствующих молекул значительно подавлено на фоне шума и не дает возможности однозначного определения температуры.

Измерение сплошного спектра не требует сложного и дорогостоящего оборудования, характерного для классической ОЭС; достаточно компактного миниспектрометра и простой оптической системы. Это позволяет осуществлять мониторинг в реальном времени и существенно повысить уровень контроля процесса осаждения АП, который может длиться часами. Предложенный подход является важным шагом на пути к обеспечению воспроизводимого получения высококачественных алмазных пленок.

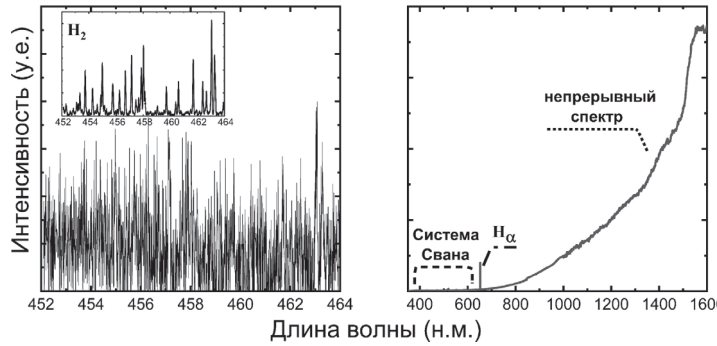


Рис. 1. Эмиссионный спектр излучения, зарегистрированный на периферии плазмы (24 мм от центра разряда). *а*) Фрагмент спектра, соответствующий R-ветви перехода $H_2: G^1\Sigma_g^+ \Rightarrow B^1\Sigma_u^+$, по которой определяется температура. На вставке слева сверху представлен аналогичный спектр, но в центре разряда. *б*) Панорамный спектр ростовой смеси (H_2 (96 %) и C_2H_5OH (4 %)), температура определенная из аппроксимации планковской функцией ~1200 K

Литература

1. Gicquel A., Silva F., Rond C., Derkaoui N., Brinza O., Achard J., Lombardi G., Tallaire A., Michau A., Wartel M., K. Hassouni K. 2014 Ultrafast Deposition of Diamond by Plasma-Enhanced CVD // Comprehensive Hard Materials, 3, 217.
2. Kirillov E.A., Minakov P.V., Lopaev D.V., Rakhimov A.T. 2025 Hot carbon nanoparticles in plasma volume during the plasma-assisted chemical vapor deposition of diamond films // Technical Physics Letters. 51, 33.
3. Chu H.N., Hartog E.A.D., Lefkow A.R., Jacobs J., Anderson L.W., Lagally M.G., Lawler J.E. 1991 Measurements of the gas kinetic temperature in a CH_4-H_2 discharge during the growth of diamond // Phys. Rev. A. 44, 3796.

УДК 621.315.5:621.383

Влияние локальных дефектов на темновые токи и шумы кремниевых фотодиодов

Попов К. А., Демидов С. С., к. ф.-м. н., Климанов Е. А., д. т. н., Конорев Д. С., Макарова Э. А., Молчанов Д. С., Полунеев В. В.
АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
kostya.popov.2001@gmail.com

Было выяснено, что обратные вольт-амперные характеристики кремниевых фотодиодов включают в себя два компонента: генерационный и компонент, определяемый туннельным током. Возникновение туннельного тока связывают с наличием дефектов в диэлектрическом слое (оксиде кремния) и примесных преципитатов в области пространственного заряда p-n перехода.
Ключевые слова: напряженность электрического поля; шум; примесные преципитаты; туннельный механизм протекания тока.

The effect of local defects on dark currents and noise in silicon photodiodes

Popov K. A., Demidov S. S., Ph.D, Klimanov E. A., Sc.D, Konorev D. S., Makarova E. A., Molchanov D. S., Poluneev V. V.
RD&P Center ORION, JSC
9 Kosinskaya St., Moscow, 111538, Russia
kostya.popov.2001@gmail.com

It was found that the reverse current–voltage characteristics of silicon photodiodes include two components: a generation component and a component determined by tunnel current. The occurrence of tunnel current is associated with the presence of defects in the dielectric layer (silicon oxide) and impurity precipitates in the space charge region of the p–n junction.
Keywords: electric field strength; noise; impurity precipitates; tunneling current flow mechanism.

Одним из основных требований к фотодиодам (ФД), используемым в фотоприемных устройствах, является низкий уровень шума, что требует снижения темновых токов и исключения избыточных шумов в низкочастотном диапазоне.

Цикл изготовления кремниевых фотодиодов включает в себя ряд термических операций, в результате которых происходит образование локальных дефектов в окисле, и примесных преципитатов в объеме кремния [1–3]. Указанных дефекты могут вызывать токи утечки [4] и дополнительные шумы.

Целью настоящей работы является исследование дефектов, вызывающих токи утечки и шумы в p^+-n переходах кремниевых фотодиодов.

На пластинах монокристаллического кремния (Cz-Si) n-типа диаметром 100 мм с удельным сопротивлением 4–5 Ом·см и ориентацией (100) изготавливались линейки фоточувствительных элементов (ФЧЭ) с размером площадок 1,4×1,4 мм^2. На изготовленных образцах проводились измерения вольт-амперных

характеристик (ВАХ) ФЧЭ в диапазоне температур от −60 °C до +70 °C и обратных напряжений от 0,01 В до 20 В, а также шумов в диапазоне частот 100–12000 Гц. С помощью оптического микроскопа определялось число дефектов окисла.

Для определения количества дефектов при 400-кратном увеличении микроскопа проводился поиск дефектов на фоточувствительных площадках и измерение их линейного размера с помощью метрической шкалы на микроскопе. После исследования всех фоточувствительных площадок на пластине проводилось сопоставление площадок с определенным числом дефектов и темновым током на них.

На части образцов наблюдалось значительное увеличение темновых токов (I_d) с ростом обратного смещения и слабая температурная зависимость I_d (рис. 1).

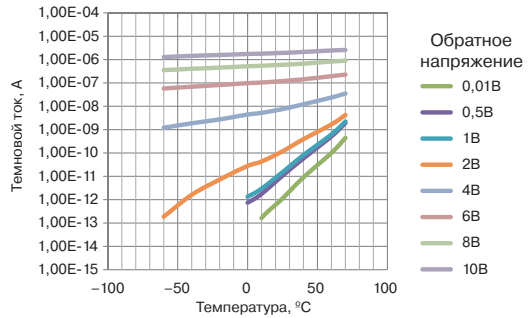


Рис. 1. Температурные зависимости темнового тока при напряжениях от 0,01 В до 10 В

Для определения характера зависимости I_d от обратного напряжения строились ВАХ в координатах I_d/V от $V^{-1/2}$ (рис. 2), на которых наблюдается переход от участка с зависимостью $I_d \sim V^{1/2}$, характерной для генерационного тока, к участку с экспоненциальным ростом тока

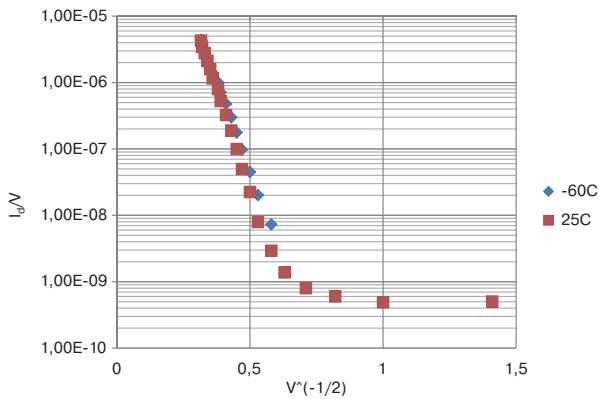


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики ФЧЭ с утечками

На ФЧЭ с утечками проводились измерения напряжения шума и спектральной плотности шума в полосе частот 100–12000 Гц при обратных напряжениях в диапазоне 1–10 В, показывавшие резкое возрастание спектральной плотности шума с ростом напряжения от 1 В до 10 В.

Полученные зависимости темнового тока от обратного напряжения указывают на туннельный механизм протекания тока. Поскольку распределение ФЧЭ с утечками по площади пластин носит случайный характер, причиной их возникновения могут быть локальные дефекты, такие как дефекты в окисле, образующиеся при диффузии фосфора [4] и примесные преципитаты в ОПЗ p-n переходов.

Определялась зависимость числа ФЧЭ со значениями темнового тока при U = 1 В в диапазоне $I_d = 10^{-11}$–10^{-10} А от числа дефектов на ФЧЭ N = 0–5 (рис. 3). Качественная корреляция величин N и I_d указывает на влияние наблюдаемых дефектов окисла на величину темнового тока I_d.

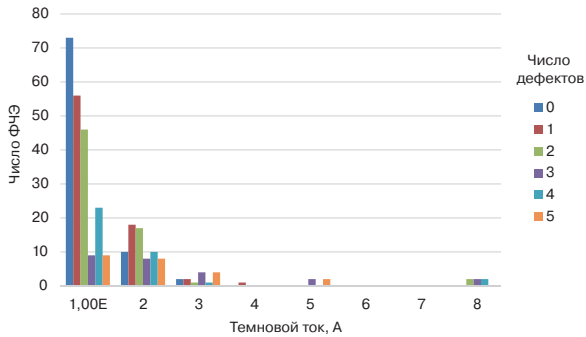


Рис. 3. Распределение числа ФЧЭ с разным числом дефектов по значениям темновых токов

Литература

1. W.Storch, U.Mohr, L.Elstner, and R.Leihkauf, A Discrete Defect Created during the Phosphorus Diffusion of High Voltage Planar Si Thyristor, Phys. Stat.sol.(a) 132,K109 (1992).
2. Вильдяева М. А., Макарова Э. А., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Малыгин В. А. Влияние режимов диффузии фосфора на формирование дефектов в окисле // Прикладная физика, 2021. — № 5. с.53.
3. К. О. Болтарь, М. Н. Вильдяева, Н. А. Иродов, Е. А. Климанов, А. В. Ляликов, А. В. Малыгин, Д. С. Молчанов, Э. А. Макарова Образование дефектов диэлектрических слоев в процессах диффузии в кремнии // Прикладная физика, 2025. — № 2. с.39.
4. К. О. Болтарь, М. Н. Вильдяева, С. С. Демидов, Е. А. Климанов, Д. С. Молчанов, Э. А. Макарова, К. А. Попов, А. А. Жукович-Гордеева, А. В. Егоров Влияние локальных дефектов в окисных слоях на вольт-амперные характеристики кремниевых фотодиодов // Прикладная физика, 2025. — № 6. с.7.

УДК 621.355.5 + 534-14

Разработка комбинированного метода на основе акустических и электрохимических подходов для исследования параметров электролита в свинцово-кислотных батарея, изменяющихся в процессе заряда/разряда

к. ф.-м. н. Шамсутдинова Е. С., Иванова Е. С.
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7
shes1996@bk.ru

Представлена экспериментальная установка для исследования лабораторного макета свинцово-кислотной электролитической ячейки, сочетающая методы гальваностатического циклирования, импедансной спектроскопии, акустической диагностики (параметр передачи S_{12}) и кондуктометрии. Рассмотрены физические основы взаимосвязи состояния заряженности аккумулятора с акустическими свойствами электролита.
Ключевые слова: свинцово-кислотный аккумулятор; импедансная спектроскопия; объемные акустические волны; S-параметры; электропроводность электролита.

Development of a combined method based on acoustic and electrochemical approaches for studying electrolyte parameters in lead-acid batteries during charge/discharge cycles

Ph.D Shamsutdinova E. S., Ivanova E. S.
Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics,
Russian Academy of Sciences
11 Mokhovaya St., Bldg. 7, Moscow, 125009, Russia
shes1996@bk.ru

A experimental setup for studying a laboratory lead-acid electrochemical cell model is presented, combining galvanostatic cycling, impedance spectroscopy, acoustic diagnostics (transmission parameter S12), and conductometry. The physical basis of the relationship between the battery state of charge and the acoustic properties of the electrolyte is discussed.
Keywords: lead-acid battery; impedance spectroscopy; bulk acoustic waves; S-parameters; electrolyte conductivity.

Свинцово-кислотные аккумуляторы являются одними из наиболее распространенных химических источников тока (ХИТ), применяемых в транспортной и промышленной отраслях [1]. В связи с этим существует необходимость контроля параметров таких батарей, например, емкости, перегрева и эффективности. Большинство методов для определения характеристик свинцово-кислотных аккумуляторов не могут использоваться в режиме реального времени (ареометры, импедансометрия и т. п.). Кроме того, в настоящее время аккумуляторы такого типа являются в основном необслуживаемыми, что не позволяет извлечь изнутри кислоту и исследовать ее свойства (электропроводность/сопротивление,

плотность, вязкость и т. д.). В процессе заряда/разряда концентрация серной кислоты (H_2SO_4) в электролите изменяется, что влечет за собой изменение плотности, вязкости и скорости звука в растворе. Данная взаимосвязь позволяет использовать акустический метод, датчики на основе которого чувствительны к механическим характеристикам среды и их изменениям и могут крепиться к внешней поверхности корпуса батареи. В данном случае для диагностики можно использовать объемные акустические волны (ОАВ), поскольку параметры распространения ОАВ через электролит коррелируют с состоянием заряженности ячейки.

В настоящей работе предложен экспериментальный подход, объединяющий методы электрохимической диагностики и акустической спектроскопии для исследования лабораторного макета свинцово-кислотной электролитической ячейки.

Вышеуказанный макет состоял из двух свинцовых (Pb) электродов в растворе серной кислоты плотностью 1,28 г/см^3. Корпус ячейки из прозрачного пластика имел размеры рабочего объема 5×5×2 см, расстояние между электродами составляло ~2 см. Преобразователи продольных ОАВ были закреплены на двух противоположных стенках ячейки в пространстве между электродами. Акустический сигнал распространялся в направлении, перпендикулярном плоскости свинцовых электродов, через объем электролита.

Экспериментальная установка (рис. 1) содержала потенциостат-гальваностат P-40X с модулем измерения электрохимического импеданса FRA-24M (Electrochemical Instruments), векторный анализатор цепей Keysight E5061B (Keysight Technologies) и многопараметрический анализатор M500T (MT Measurement).

Потенциостат P-40X использовался для управления режимами заряда/разряда и регистрации электрохимических параметров. С его помощью было проведено гальваностатическое циклирование и импедансная спектроскопия. Векторный анализатор цепей использовался для измерения полных вносимых потерь S_{12} при прохождении продольных ОАВ через объем электролита. Анализатор M500T позволял регистрировать удельную электропроводность электролита.

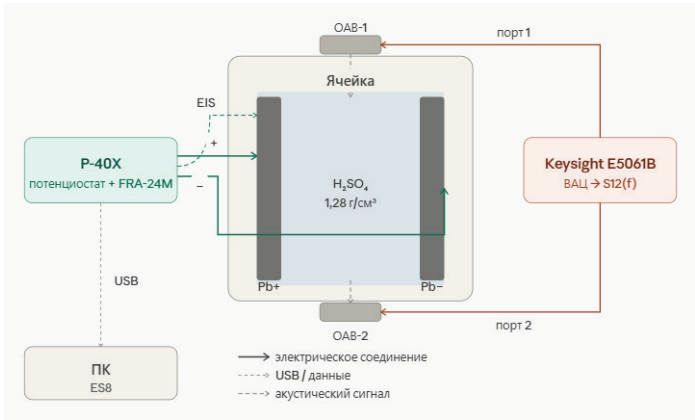


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, вид сверху

В результате были получены частотные зависимости полных вносимых потерь S_{12} при различных значениях степени заряженности исследуемой ячейки. Также для ячейки были получены гальваностатические циклы заряда/разряда и емкость. Кроме того, были получены значения электропроводности электролита в заряженном и разряженном состоянии ячейки. Полученные результаты показывают возможность создания акустических методов контроля за состоянием электролита в свинцово-кислотных аккумуляторах.

Работа выполнена при поддержки Российского научного фонда (проект РНФ № 25-29-01104 2026-2027 гг.).

Литература

1. Peng J., Zhao X., Ma J., Meng D., Zhu J., Zhang J., Yan S., Zhang K., Han Z. Enhancing lithium-ion battery monitoring: a critical review of diverse sensing approaches // ETransportation, 2024. Vol. 22. P. 100360. DOI: 10.1016/j.etran.2024.100360.

УДК 537.86

Выделение вкладов сверхбыстрого размагничивания и спин-зарядовой конверсии в генерацию ТГц-излучения в структурах Co/CoxOx

Кузнецов К. Г.[1], Горбатова А. В.[1], к. ф.-м. н., Буряков А. М.[1], к. ф.-м. н., Гусев Н. С.[2], Сапожников М. В.[2], д. ф.-м. н.
[1] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78
[2] ИФМ РАН
603087, Нижегородская область, д. Афонино, ул. Академическая, 7

Экспериментально исследованы механизмы ТГц-генерации в тонких пленках Co с оксидом кобальта. Выделены вклады сверхбыстрого размагничивания и спин-зарядовой конверсии в таких структурах.
Ключевые слова: Спинтроника; ТГц-излучение; тонкие пленки; ферромагнетизм.

Contribution of ultrafast demagnetization and spin-charge conversion to THz radiation generation in Co/Co_xO_x structures

Kuznetsov K. G.[1], Gorbatova A. V.[1], Ph.D, Buryakov A. M, Ph.D, Gusev N. S.[2], Sapozhnikov M. V.[2], Sc.D
[1] MIREA — Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia
[2] IPM RAS
7 Akademicheskaya St., Afonino, Nizhny Novgorod Region, 603087, Russia

The mechanisms of THz generation in thin Co films with cobalt oxide have been studied experimentally. The contributions of ultrafast demagnetization and spin-charge conversion in such structures have been identified.
Keywords: Spintronics; THz radiation; thin films; ferromagnetism.

В последние 20 лет одним из наиболее стремительно развивающихся направлений микро- и наноэлектроники является ТГц-спинтроника [1]. Терагерцевое излучение широко применяется в медицине, фармацевтике, системах безопасности и многих других сферах человеческой жизни [2]. Перспективными источниками ТГц-излучения являются спинтронные ТГц эмиттеры, которые в простейшем случае представляют собой бислойные структуры из ферромагнитной и немагнитной пленки нанометровой толщины. В таких структурах преобладающими механизмами генерации ТГц-излучения являются механизмы, связанные со спин-зарядовой конверсией [3]. Однако на поверхности незащищенных металлических пленок образуется естественный окисел, который при нормальных условиях чаще всего является парамагнетиком или диамагнетиком [4]. Образование нового слоя обеспечивает возникновение дополнительных механизмов генерации ТГц-излучения, что затрудняет дальнейшее исследование эффектов генерации в более сложных структурах. В связи с этим для более качественного понимания процессов, происходящих в электронной и спиновой подсистемах ферромагнитного слоя, нужно

исследовать, как толщина этого слоя влияет на образование оксидной пленки и ее влияние на генерацию ТГц-излучения.

В данной работе мы представляем исследование механизмов генерации ТГц-излучения в структурах Co/Co_xO_x. Слой кобальта был нанесен на сапфировую подложку с помощью метода магнетронного напыления. Толщина пленок варьировались в диапазоне от 2 до 5 нм.

Для исследования генерации ТГц-излучения был использован метод ТГц спектроскопии с временным разрешением (THz-TDS). Для генерации ТГц-излучения был использован фемтосекундный лазер с длиной волны 800 нм, длительностью импульса 35 фс и частотой следования импульсов 3 кГц. Предложена модель ТГц-генерации, разграничивающая вклады сверхбыстрого размагничивания и процессов спин-зарядовой конверсии. Показано влияние толщины слоя кобальта на параметры генерируемого ТГц-излучения, а также изменение вкладов SCC и UDM.

Исследование выполнено при поддержке государственного задания FSFZ-2025-0002.

Литература

1. Papaioannou, Evangelos Th. and Beigang, René. THz spintronic emitters: a review on achievements and future challenges // Nanophotonics, 2021. Vol. 10. № 4. P. 1243–1257.
2. Pawar A. Y., Sonawane D. D., Erande K. B., Derle D. V. Terahertz technology and its applications // Drug Invention Today, 2013. № 5. P. 157–163.
3. Seifert T., Jaiswal, S., Martens, U., Hannegan, J., Braun, L., Maldonado, P., Freimuth, F., Kronenberg, A., Henrizi, J., Radu, I. and Beaurepaire, E., 2016. Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation. Nature photonics, 10(7). P. 483–488.
4. Okpechi, K.U.P., Nwaokorongwo, E.C. and Joseph, U., 2024. Physical Properties of Magnetic Materials of Cobalt Oxide, Iron Oxide and Manganese Oxide. Journal of Basics and Applied Sciences Research, 2(1). P. 129–134.

УДК 539.1.074

Кремниевый детектор с тонким входным окном для регистрации альфа-частиц

Григорьева Т. В.[1,2], Петушков В. Л.[1,2], Голубков С. А.[2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
tanya.gri.02@mail.ru
[2] АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

Разработан кремниевый детектор с тонким входным окном для регистрации низкоэнергетичных альфа-частиц. Входное окно составило 500 Å и представляло собой тонкий p-слой в кремниевом детекторе pin-диодного типа. Были представлены особенности технологического маршрута изготовления детекторов с тонким p+-слоем.
Ключевые слова: кремниевый детектор излучения; pin-диод; альфа-частицы.

Silicon detector with a thin entrance window for alpha particle registration

Grigoreva T. V.[1,2], Petushkov V. L.[1,2], Golubkov S. A.[2]
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
tanya.gri.02@mail.ru
[2] «Zelenograd Nanotechnology Center» JSC
6 Sunny alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia

A silicon detector with a thin entrance window for the detection of low-energy alpha particles has been developed. The entrance window thickness was 500 Å, and it consisted of a thin p-layer in a silicon PIN diode detector. The features of the technological route for manufacturing detectors with a thin p+-layer were presented.
Keywords: silicon radiation detector; pin-diode; alpha particles.

Кремниевые детекторы широко применяются для регистрации ионизирующих частиц. Одна из важных задач, которую они реализуют — это регистрация низкоэнергетичных альфа-частиц. Это сложная задача, так как низкоэнергетичные альфа-частицы сложно детектировать ввиду их высокого поглощения и малого пробега. При этом такие частицы представляет наибольшую опасность при облучении: попадая внутрь организма, альфа-частицы вызывают ионизацию биологических тканей, что повышает риск различных заболеваний [1].

Разработанный детектор альфа-частиц pin-диодного типа имеет входное окно толщиной около 500 ангстрем, представляющее собой тонкий p+-слой. Для формирования p+ области использовалась имплантация бора под углом, что позволило точно контролировать глубину залегания p-n-перехода.

Разработанная технология формирования тонкого входного окна может быть также применена для создания детекторов низкоэнергетичных электронов, востребованных в растровых электронных микроскопах. Такие детекторы используются

для регистрации обратноотраженных электронов с энергиями до единиц кэВ [2]. Их тонкое входное окно обеспечивает высокую чувствительность, так как излучение поглощается не во входном окне, а создает электронно-дырочные пары в i-слое.

Литература

1. Cruz-Nova P., Trujillo-Nolasco M., Aranda-Lara L., Ferro-Flores G., Ocampo-García B. Radiobiological effect of alpha particles. The scientific basis of targeted alpha-particle therapy // Nuclear Medicine and Biology, 2025. Vol. 146–147. P. 109044.
2. A. Sakic et al. Versatile Silicon Photodiode Detector Technology for Scanning Electron Microscopy with High-Efficiency Sub-5 keV Electron Detection // 2010 International Electron Devices Meeting. IEEE, 2012. P. 31.4.1–31.4.4.

УДК [544.163:621.793]:681.586.72

Определение кислотности вина на основе полевых транзисторов с каналом из 2D материалов

Телелюхин К. С.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1
astro-const@yandex.ru

Изготовлены полевые транзисторы на основе восстановленного оксида графена (вГО) для экспресс-определения pH вина. Сенсоры изготовлены осаждением вГО на функционализированные встречно-штыревые электроды. Методом сдвига точки Дирака исследован отклик сенсоров в буферных растворах и реальном вине. Показано, что кратковременная обработка кислородной плазмой (1–5 мин) повышает их чувствительность. Результаты подтверждают перспективность вГО-сенсоров для быстрого полевого контроля качества вина.
Ключевые слова восстановленный оксид графена; полевой транзистор; pH-сенсор; вино; кислородная плазма; точка Дирака; встречно-штыревые электроды.

Determination of Wine Acidity Based on Field-Effect Transistors with a 2D Material Channel

Telelyukhin K. S.
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
1A Kerchenskaya St., Bldg. 1, Moscow, 117303, Russia
astro-const@yandex.ru

Field-effect transistors based on reduced graphene oxide (rGO) were fabricated for rapid pH determination of wine. The sensors were manufactured by depositing rGO onto functionalized interdigitated electrodes. The sensor response was investigated in buffer solutions and real wine via the Dirac point shift method. It was shown that short-term oxygen plasma treatment (1–5 min) enhances their sensitivity. The results confirm the promise of rGO-based sensors for rapid in-field wine quality monitoring.
Keywords: reduced graphene oxide; field-effect transistor; pH sensor; wine; oxygen plasma; Dirac point; interdigitated electrodes.

Введение

Измерение pH вина играет важную роль при производстве, хранении, контроле вкуса и качества продукта. Современные лабораторные и производственные измерения pH обычно производят с помощью электродов или при помощи колориметрических методов. Колориметрические методы требуют большого числа реагентов, в то время как электроды часто требуют особого хранения. В 2011 году был продемонстрирован датчик pH на основе однослойного графена, который показывает линейную зависимость между значением pH и изменением сопротивления датчик [1–3]. Целью настоящей работы является разработка и исследование

доступных полевых транзисторов на основе вГО, модифицированных кислородной плазмой, для детектирования pH в сложных органических средах. В рамках исследования проводится анализ влияния параметров плазменной обработки на чувствительность сенсоров, а также их апробация на реальных образцах вина для подтверждения возможности создания портативных аналитических систем.

Материалы и методы

Для изготовления микросхем полевых транзисторов (ПТ) с жидкостным затвором монослой оксида графена (ОГ) был нанесен на коммерчески доступные золотые встречно-штыревые электроды (ВШЭ). Рабочий прибор был изготовлен путем суспендирования оксида графена в смеси вода/NMP (10/90 %) для достижения концентрации 0,2 мг/мл (pH = 7,3) с последующим нанесением методом капельного осаждения на ВШЭ [4]. Перед осаждением поверхность стекла между электродами была активирована APTES (2 % об./об. в этаноле) в течение 1 часа инкубации с последующим двухчасовым термическим отжигом при 120 °C, в то время как золотая поверхность была модифицирована цистеамином (0,1 М в воде) в течение 2 часов инкубации. Размер отдельного листка ОГ меньше расстояния между золотыми электродами. В заключение, 40 мкл суспензии ОГ было нанесено капельным методом на ВШЭ с последующей 2-часовой инкубацией и 30-минутным отжигом при 100 °C для испарения остатков растворителя вода/NMP. Восстановление ОГ проводили при термическом отжиге при 200 °C, 1 час, чтобы избежать повреждения золотых электродов. Качество восстановленного ОГ (вОГ) контролировалось методами спектроскопии комбинационного рассеяния непосредственно на чипах. Было подготовлено несколько растворов фосфатного буфера с различной кислотностью. Для обработки образцов атмосферной плазмой использовалась низкотемпературная плазменная установка марки Diener electronic Femto. Обработка проводилась в атмосферной плазме при следующих параметрах: давление в реакторной камере составляло 0,3 Па (мбар), мощность ВЧ-генератора (частота 13,56 МГц) — 300 Вт, расход кислорода — 7,5 sccm . Длительность плазменной обработки варьировалась от 1,6 до 5 минут.

Выводы и результаты

В работе продемонстрирована возможность использования полевых транзисторов с жидкостным затвором на основе восстановленного оксида графена (вГО-ПТ) для определения кислотности вина. Анализ вольт-амперных характеристик и сдвига точки Дирака показал стабильный отклик сенсоров как в модельных буферах, так и в реальных образцах вина, что подтверждает перспективность вГО-ПТ для быстрого полевого детектирования. Ключевым результатом является разработка метода управления параметрами сенсоров посредством обработки атмосферной плазмой. Установлено, что кратковременное плазменное воздействие (от 1 до 5 минут) приводит к модификации поверхности канала и существенному увеличению чувствительности прибора. Полученные результаты создают основу для разработки портативных аналитических систем контроля качества на винарнях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-19-00062, https://rscf.ru/project/26-19-00062.

Литература

1. Salvo P. et al. Graphene-based devices for measuring pH // Sensors and Actuators B: Chemical, 2018. Vol. 256. P. 976–991.
2. Lei N. et al. Simple graphene chemiresistors as pH sensors: fabrication and characterization // Measurement science and technology, 2011. Vol. 22. № 10. P. 107002.
3. Angizi S. et al. Defect engineering of graphene to modulate pH response of graphene devices // Langmuir, 2021. Vol. 37. № 41. P. 12163–12178.
4. Jarić S. et al. Femtomolar detection of the heart failure biomarker NT-proBNP in artificial saliva using an immersible liquid-gated aptasensor with reduced graphene oxide // Microchemical Journal, 2024. Vol. 196. P. 109611.

УДК 538.953

Исследование путей релаксации электронов в графене под воздействием суб-терагерцевого излучения методом шумовой термометрии

Измайлов Р. И., Шеин К. В., Титченко А. Н., Гайдученко И. А., Гольцман Г. Н.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
109028, г. Москва, Покровский б-р, 11

Исследован разогрев электронной системы графена при воздействии постоянного тока и излучения 130 ГГц. Температура электронов измерена методом шумовой термометрией. Определены электротранспортные и тепловые характеристики, оценены поглощение, NEP и теплопроводность.
Ключевые слова: терагерцы; двумерные материалы; графен

Investigation of electron energy relaxation in graphene under sub-terahertz radiation using the noise thermometry method

Izmaylov R. I., Shein K. V., Titchenko A. N., Gayduchenko I. A., Goltsman G. N.
National Research University Higher School of Economics
11 Pokrovsky Blvd., Moscow, 101000, Russia

Graphene electron heating under DC current and 130 GHz radiation was studied. Electron temperature was measured via noise thermometry. Electrical and thermal properties were determined, and absorption, NEP, and thermal conductance were estimated.
Keywords: terahertz; two-dimensional materials; graphene

Терагерцевый диапазон электромагнитного излучения рассматривается как перспективное направление исследований благодаря множеству возможных применений.

К числу этих применений относятся:

- 6G телекоммуникация;
- системы безопасности (в качестве альтернативы рентгеновскому сканированию);
- астрофизические наблюдения;
- биомедицинские исследования.

Графен выделяется на фоне других материалов своей рекордно малой электронной теплоемкостью и чрезвычайно слабым электрон-фононным взаимодействием, поэтому он является многообещающим материалом для ТГц-болометров. В литературе описаны высокочувствительные инфракрасные [1] и микроволновые болометры на основе графена. Основной проблемой графеновых ТГц-болометров является слабая температурная зависимость сопротивления [2]. Однако вследствие слабого электрон-фононного взаимодействия и малой электронной теплоемкости поглощение ТГц-излучения вызывает существенный нагрев электронной подсистемы графена [1]. Для измерения температуры электронного газа графена используются различные методы считывания: шумовая термометрия [3], регистрация джозефсоновских переходов и фототермоэлектрический эффект.

В данной работе с помощью шумовой термометрии мы исследовали релаксацию горячих электронов в графене при двух способах нагрева: протекании постоянного электрического тока и облучении суб-ТГц-излучением частотой 130 ГГц. В качестве образца был использован отщепленный графен, инкапсулированный в гексагональный нитрид бора, с верхним затвором. Полученное устройство представляет собой полевой транзистор с графеном в качестве проводящего канала. Экспериментальные измерения проводились в криостате замкнутого цикла при температуре 3,7 K. Для фокусировки суб-ТГц-излучения образец помещался на медный держатель со встроенной кремниевой линзой. По результатам анализа транспортных свойств была определена подвижность порядка $8 \cdot 10^4$ см^2/(В·с) при температуре 3,7 K и около $4 \cdot 10^3$ см^2/(В·с) при комнатной температуре. Эти значения согласуются с результатами для чистых образцов, изготовленных аналогичным способом [4].

Исследование тепловых свойств показало, что зависимость электрон-фононной теплопроводности от температуры описывается степенным законом с показателем $\delta = 4$. Такой показатель характерен для «чистого предела» электрон-фононного взаимодействия и согласуется с результатами из литературы [5]. Наибольший разогрев электронной подсистемы наблюдался вблизи точки электрической нейтральности. По оценкам, теплопроводность графена составила 0,1 нВт/K, а внутренняя эквивалентная мощность шума детектора (NEP) — 0,3 фВт/Гц^{0,5}. Кроме того, было показано, что облучение образца суб-ТГц-излучением приводит к заметному повышению электронной температуры. Сопоставление нагрева при облучении с результатами при протекании постоянного тока позволило оценить коэффициент поглощения графенового устройства. Оказалось, что поглощается лишь около 0,5 % излучения, что объясняется неэффективным согласованием оптического тракта с детектором.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-72-00014).

Литература

1. Ultrasensitive and Wide-Bandwidth Thermal Measurements of Graphene at Low Temperatures / K. C. Fong, K. C. Schwab // Physical Review X, 2012. Vol. 2. № 3. Art. 031006.
2. Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems / F. Koppens et al. // Nature Nanotechnology, 2014. Vol. 9. № 10. P. 780–793.
3. Fast thermal relaxation in cavity-coupled graphene bolometers with a Johnson noise read-out / D. K. Efetov et al. // Nature Nanotechnology, 2018. Vol. 13. № 9. P. 797–801
4. Hot carriers in graphene: fundamentals and applications / M. Massicotte et al. // Nanoscale, 2021. Vol. 13. № 18. P. 8376–8411
5. Thermal detection of single photons using Dirac fermions / B. Huang et al. // Nature Communications, 2026. Vol. 17. Art. 3845.

УДК 621.382

Исследование процессов накопления и релаксации радиационно-индуцированного заряда в слоях диоксида кремния при воздействии импульсного ионизирующего излучения

Земцов А. Э.[1,2], Петров А. С.[1], Таперо К. И.[1,2]
[1] АО «Научно-исследовательский институт приборов»
140080, г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1
m1705366@edu.misis.ru

Проведено облучение МОП-транзисторов на установках — источниках тормозного излучения при различных электрических и температурных режимах. Исследовано влияние условий проведения облучения на темпы релаксации заряда и величины выхода заряда в слоях диоксида кремния при воздействии импульсного ионизирующего излучения.
Ключевые слова: МОП-транзисторы; ионизирующее излучение; релаксация заряда; выход заряда; оксид кремния.

Investigation of accumulation and relaxation processes of radiation-induced charge in silicon dioxide layers during pulsed ionizing radiation exposure

Zemtsov A. E.[1,2], Petrov A. S.[1], Tapero K. I.[1,2]
[1] RISI
140080, Moscow region, Lytkarino, industrial zone Turaevo, 8
[2] University of Science and Technology MISIS
119049, Moscow, Leninskiy Ave., 4
m1705366@edu.misis.ru

MOSFETs were irradiated at various electrical and thermal conditions using sources of braking radiation. The influence of irradiation conditions on the charge relaxation rates and charge yield values in silicon dioxide layers at pulsed ionizing radiation exposure has been investigated.
Keywords: MOSFETs; ionizing radiation; charge relaxation; charge yield.

Несмотря на тенденцию к утоньшению подзатворных диэлектриков современных МОП-транзисторов, радиационная деградация микросхем со структурами Si/SiO_2 остается актуальной проблемой. Это связано с накоплением заряда в изолирующих и скрытых оксидах, в которых из-за значительной толщины нейтрализация заряда посредством туннельного отжига несущественна. Процессы накопления и релаксации заряда в данных структурах происходят в условии слабого поля, что изменяет характер их протекания в сравнении с классической картиной, наблюдаемой в тонких подзатворных оксидах при стандартных электрических режимах. Наиболее выражены эти различия при импульсном воздействии ионизирующего излучения, когда генерируется большое количество носителей заряда: собственное поле дырок

может значительно искажать внешнее поле в оксиде и влиять на процессы переноса и рекомбинации заряда, а также возможно усиление темпов рекомбинации.

Целью данной работы являлось исследование процессов накопления и релаксации заряда в диоксиде кремния при слабых электрических полях, моделирующих условия в изолирующих и скрытых окислах. Исследование предполагало решение комплекса задач, основными из которых стали оценка величины выхода заряда и темпов релаксации при различных условиях облучения.

Для достижения поставленной цели было проведено облучение р-канальных МОП-транзисторов с толщиной подзатворного диэлектрика равной 400 нм на импульсных ускорителях электронов УИН-10 и РИУС-5 (АО «НИИП», г. Лыткарино). В процессе и после облучения на затвор транзисторов подавалось постоянное напряжение в диапазоне от минус 4 до 4 В. Для определения концентрации дырок в SiO_2 при воздействии импульсного ионизирующего излучения производилась регистрация сток-затворных характеристик посредством резкого изменения напряжения на затворе и измерение падения напряжения на токосъемном резисторе, включенном последовательно с каналом транзистора. Измерения осуществлялись в диапазоне времени от 10^{-3} до 10^{2} секунд после импульса излучения с шагом, соответствующим увеличению времени после импульса в 3–10 раз. На основе полученных данных определялось пороговое напряжение объекта исследования в каждый момент времени методом линейной экстраполяции (подробно методика измерений описана в [1]).

Воздействие ионизирующего излучения осуществлялось при комнатной (300 K) и пониженной (140 K) температурах. Охлаждение образцов производилось для замедления переноса дырок в оксиде и регистрации максимального сдвига порогового напряжения, соответствующего наибольшей концентрации дырок. Для каждого значения напряжения на затворе (электрического поля в оксиде) проводилось облучение при дозах порядка 1 крад(SiO_2) и 10 крад(SiO_2). На основе полученных экспериментальных данных производилась оценка величины выхода заряда согласно выражению:

$$f(E_{OX})_{\text{эксп}} = 2\frac{\Delta V_{\text{th max}} \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{g_0 \cdot D \cdot t_{ox}^2 \cdot q},$$

где D — поглощенная доза, рад; t_{ox} — толщина оксида, см; $g_0 = 8{,}1 \cdot 10^{12}$ см$^{-3}$/рад(SiO_2) — параметр, определяющий начальную плотность зарядовых пар, приходящуюся на дозу в 1 рад; $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; ε — относительная диэлектрическая проницаемость материала подзатворного оксида; $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см — электрическая постоянная.

На рис. 1 представлена зависимость величины выхода заряда в SiO_2 от напряжения на затворе при дозах за импульс менее 1 крад(SiO_2) и более 4 крад(SiO_2). Полевая зависимость данного параметра выражена слабо, так как при дозах 5 крад(SiO_2) и больше собственное поле дырок становится соразмерно внешнему в условиях эксперимента. Однако очевидна зависимость величины выхода заряда от значения дозы за импульс. При малых дозах за импульс (менее 1 крад(SiO_2)) значения соответствуют теоретическим. При дозах более 4 крад(SiO_2) выход заряда уменьшается примерно в два раза. Вероятно, это связано с возрастанием роли бимолекулярной рекомбинации.

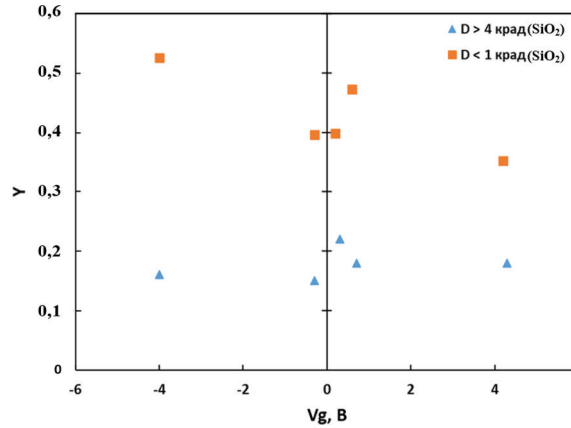


Рис. 1. Зависимость величины выхода заряда от напряжения на затворе транзисторов при дозах за импульс менее 1 крад(SiO_2) и более 4 крад(SiO_2)

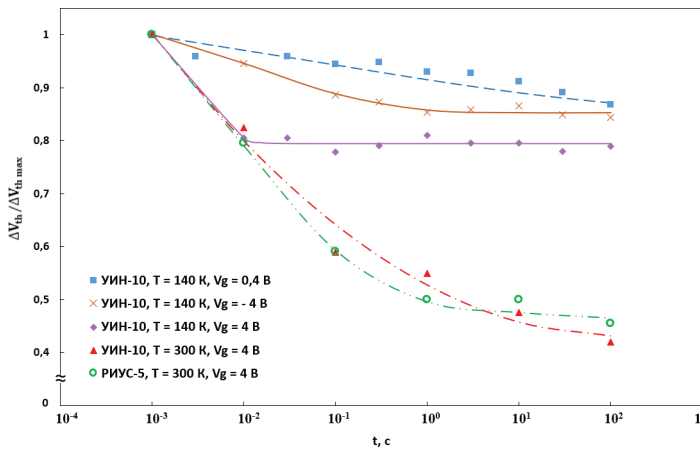


Рис. 2. Зависимость относительного изменения порогового напряжения р-канальных МОП-транзисторов после воздействия импульса ионизирующего излучения при различных температурах и напряжениях на затворе

На рис. 2 показана зависимость относительного изменения порогового напряжения р-канальных МОП-транзисторов от времени после воздействия импульса ионизирующего излучения, отражающая динамику релаксации заряда в оксиде при различных напряжениях на затворе (электрическом поле в оксиде) и температурах. Можно заметить значительное замедление темпов релаксации при понижении температуры (более 30%), так как перенос дырок — термически активируемый процесс. Также независимо от температуры при напряжениях на затворе 4 В

и минус 4 В наблюдается участок быстрого спада и тенденция к насыщению после изгиба. Участок плато отражает захват заряда на ловушки с более глубокими энергетическими уровнями.

Литература

1. Земцов А. Э., Таперо К. И., Емельянов В. В., Петров А. С., Бесецкий А. В., Филимонов А. В. Методика регистрации вольт-амперной характеристики МОП транзистора после воздействия импульсного ионизирующего излучения в диапазоне времени от 10^{-4} до 10^{2} секунд // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. –В. 4. –2024.

УДК 537.312.7:004.332.3

Аналитические исследования процесса электроформовки элемента хранения ReRAM на основе HfO_2

Паймурзин Д. М.[1,2], Гришин Т. С.[3], Горячев А. В.[3], Теплов Г. С.[1,2], Рудаков Г. А.[3], Дудин А. А.[3], Скоморохов Д. В.[2], Матвеева А. С.[2], Матвеев Н. Н.[2]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[3] Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН
119334, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А

В работе представлены результаты аналитических исследований процесса электроформовки элементов хранения ReRAM на основе HfO_2. Исследовались структуры TiN/HfO_2(ALD)/Ti/Al и TiN/HfO_2(PEALD)/Ti/Al, электроды толщиной ~50 нм получены методом магнетронного напыления, оксидные слои толщиной ~10 нм нанесены методами атомно-слоевого осаждения (ALD) и плазменно стимулированного атомно-слоевого осаждения (PEALD), обе структуры содержат подслой титана толщиной ~5 нм для отвода кислорода из оксидного слоя при формовке. Электрофизические измерения проводились в импульсном и квазистатическом режимах.
Ключевые слова: ReRAM; электроформовка; оксид гафния.

Analytical studies of the electroforming process of a ReRAM storage element based on HfO_2

Paimurzin D. M.[1,2], Grishin T. S.[3], Goryachev A. V.[3], Teplov G. S.[1,2], Rudakov G. A.[3], Dudin A. A.[3], Skomorohov D. V.[2], Matveyeva A. S.[2], Matveyev N. N.[2]

[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[3] Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences
32A Leninsky Ave., Moscow, 119334, Russia

This paper presents the results of analytical studies on the electroforming process of ReRAM storage elements based on HfO_2. The TiN/HfO_2(ALD)/Ti/Al and TiN/HfO_2(PEALD)/Ti/Al structures were investigated. The electrodes, approximately 50 nm thick, were deposited by magnetron sputtering. The oxide layers, approximately 10 nm thick, were deposited using atomic layer deposition (ALD) and plasma-enhanced atomic layer deposition (PEALD). Both structures contain a titanium sublayer approximately 5 nm thick to facilitate oxygen scavenging from the oxide layer during electroforming. Electrophysical measurements were performed under pulsed and quasi-static modes.
Keywords: ReRAM; forming; hafnium oxide.

Резистивная память (ReRAM) — тип энергонезависимой памяти, работа которого основана на переключении между высокоомным и низкоомным состояниями под действием внешнего электрического поля. Элементы хранения (ЭХ) ReRAM отличаются высокой скоростью переключения, низким энергопотреблением и хорошей масштабируемостью, однако малой повторяемостью. Полноценной интеграции ReRAM в КМОП-технологии препятствует, как раз, слабая повторяемость от устройства к устройству [1].

Устройство ReRAM представляет из себя сэндвич структуру (электрод/функциональный слой/электрод), сопротивление которого определяется, в основном, функциональным слоем. Основными материалами, используемыми в качестве функционального слоя, являются оксиды переходных металлов, таких как оксид гафния HfO_2 [2], оксид титана TiO_2 [3] и др. Для работы ЭХ ReRAM необходимо предварительно провести процесс электроформовки — первичное образование проводящих нитей (филаментов) в функциональном слое между электродами. В устройствах на основе оксидов переходных металлов филамент состоит из кислородных вакансий, такой тип памяти называется OxRAM [4]. Механизм переключения элементов хранения OxRAM предполагает обрыв и восстановление филамента. Характеристики устройства ReRAM зависят от материалов слоев, их толщины, стехиометрии и шероховатости [5].

Методами магнетронного напыления на подложке из SiO_2 были получены пленки TiN и TaN толщинами ~50 нм. Далее на нитридные пленки были нанесены слои HfO_2 методами термического атомно-слоевого осаждения (ALD) и плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения (PEALD) толщинами ~10 нм. Поверх всей структуры с использованием трафаретов был напылен верхний электрод. Топология полученных образцов представлена на рис. 1. Методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) были проведены исследования морфологии пленок нижнего электрода и оксидного слоя, методами оже-спектрометрии был исследован элементный состав полученных пленок, методами эллимпсометрии проведен анализ толщины слоев. Измерения электрофизических свойств полученных структур проводились в импульсном и квазистатическом режимах.

Таблица 1. Результаты измерения шероховатости

	Средняя шероховатость по пластине, нм	Средняя шероховатость ALD слоя HfO_2, нм	Средняя шероховатость PEALD слоя HfO_2, нм
TiN	0,835	0,935	0,805
TaN	0,251	0,342	0,304

В табл. 1 представлены значения шероховатостей соответствующих пленок, полученные методами АСМ. На рис. 1 приведены результаты исследования химического состава образцов. Можно заметить, что поверхность пленки TaN более гладкая, однако, согласно оже-спектрометрии, в ее объеме выделяется преимущественная металлическая фаза тантала, атомная доля которой больше 70 %. Концентрация фазы TaN составляет 28 %. Пленка TiN, в свою очередь, обладает большей шероховатостью, но атомная концентрация TiN, при этом, составляет более 90 %, что делает электрод из TiN менее химически активным, предположительно стабилизируя процесс электроформовки. Все полученные оксидные пленки имеют

среднюю шероховатость, сопоставимую с шероховатостью нижних электродов. Слои HfO_2, полученные методами PEALD, оказались более гладкими, чем те, что получены с помощью ALD. По составу пленки HfO_2 у всех четырех образцов неоднородны и содержат избыточный кислород, что может ограничить возникновение кислородных вакансий и затруднить процесс электроформовки.

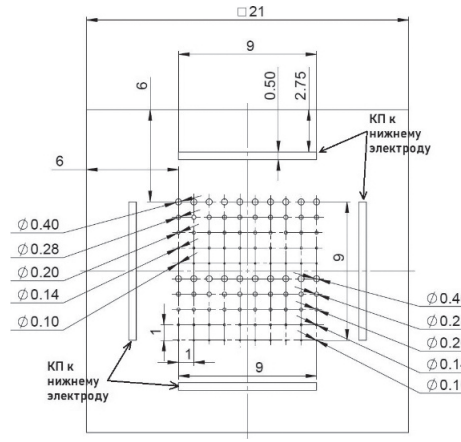
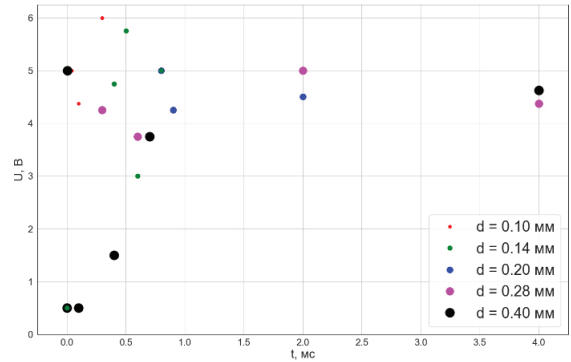


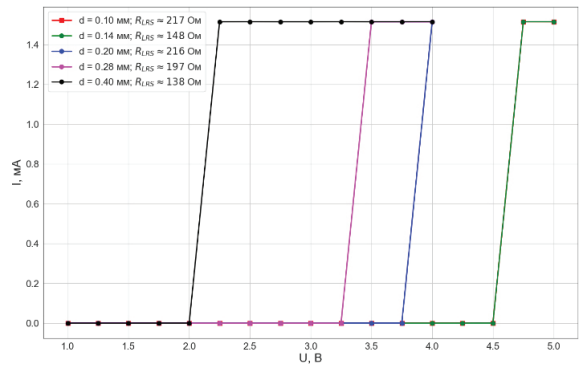
Рис. 1. Топология образцов

Для всех структур проводилось исследование процесса электроформовки в импульсном режиме. Нижний электрод заземлялся, а на верхний электрод подавались чередующиеся формующие и считывающие импульсы, при этом варьировалась амплитуда и длительность формующих импульсов. Ни один из образцов не демонстрировал резистивное переключение, поэтому для более подробного изучения были выбраны наиболее перспективные образцы со структурой стека TiN/HfO_2(ALD)/Ti/Al и TiN/HfO_2(PEALD)/Ti/Al. В импульсном режиме были исследованы 45 таких структур, однако лишь у двух наблюдалось резистивное переключение, выдерживали они не более трех циклов перезаписи, что говорит о необходимости оптимизации технологического процесса. Данные об амплитуде и длительности импульсов, изменивших сопротивление структур, представлены на рис. 2*а*. При исследовании электроформовки в квазистатическом режиме на верхний электрод подавалось ступенчато возрастающее положительное напряжение, нижний электрод при этом заземлен. Начальное напряжение $E_{нач} = 1$ В, шаг нарастания $\Delta E = 0{,}01$ В, конечное напряжение $E_{кон} = 5$ В, время измерения $T_{изм} = 100$ мс, ограничение по току составляло 1,5 мА. Данным методом были исследованы 5 элементов хранения ReRAM, вольт-амперная характеристика одного из них представлена на рис. 2*б*. Можно заметить, что основная масса структур пробилась при амплитуде импульса более 3 В, также можно заметить зависимость этого напряжения от диаметра верхнего электрода, что может быть связано с увеличением вероятности макроскопических дефектов структур, образованных при изготовлении образцов. Также пробой большинства структур может быть связан

с методами электрофизических исследований с помощью вольфрамовых зондов, которые при взаимодействии с верхним слоем алюминия могут повредить тонкую оксидную пленку под ним.



а



б

Рис. 2. *а*) Амплитуда и длительность формующих импульсов, которые привели к изменению сопротивления структуры; *б*) Вольт-амперная характеристика для пяти структур с составом стека TiN/HfO_2(ALD)/Ti/Al.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-91-06000).

Литература

1. Pan F. et al. Nonvolatile resistive switching memories-characteristics, mechanisms and challenges // Progress in Natural Science: Materials International, 2010. (20). P. 1–15.
2. Matveyev Y. et al. Resistive switching and synaptic properties of fully atomic layer deposition grown TiN/HfO2/TiN devices // Journal of Applied Physics, 2015. (117). P. 044901.

3. Gale E. TiO2-based memristors and ReRAM: materials, mechanisms and models (a review) // Semiconductor Science and Technology, 2014. № 10 (29). P. 104004.
4. Kumar D. et al. Metal oxide resistive switching memory: Materials, properties and switching mechanisms // Ceramics International, 2017.
5. Charpin-Nicolle C. et al. Impact of roughness of TiN bottom electrode on the forming voltage of HfO2 based resistive memories // Microelectronic Engineering, 2020. Vol. 221: 111194.
6. He, H. et al. Ti/HfO2-Based RRAM with Superior Thermal Stability Based on Self-Limited TiOx // Electronics 2023, 12, 2426.

УДК 537. 9

Коллективные моды в структурах тяжелый металл — массив наноточек ферромагнетика и потенциальные устройства

Киктева В. Р.[1,2], Пахомов А. С.[1,3], к. ф.-м. н. Кичин Г. А.[1,3], к. ф.-м. н. Скирдков П. Н.[1,4], д. ф.-м. н. Звездин К. А.[1,2]
[1] ООО «Новые спинтронные технологии», 121205, г. Москва, ул. Большой б-р, 30
v.kikteva@rqc.ru
[2] МИРЭА — Российский технологический университет 119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78
[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[4] Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

Экспериментально исследовано как расстояние между наноточками и их диаметр влияет на состав мод ферромагнитного резонанса. Показано, что уменьшение расстояния между точками усиливает дипольное взаимодействие, что приводит к объединению мод в две практически неразличимые моды на единой частоте, что указывает на коллективные возбуждения намагничивания. Наши наблюдения прокладывают путь к разработке спинтронных устройств для частотно-селективных систем, которые используют как геометрические параметры, так и спин-орбитальные эффекты для настраиваемого коллективного управления намагниченностью.
Ключевые слова: ферромагнитный резонанс; обратный спиновый эффект Холла; наноструктурирование; наноточки.

Collective modes in heavy metal — ferromagnet nanodots array structures and potential devices

Kikteva V. R.[1,2], Pakhomov A. S.[1,3], Ph.D, Kichin G. A.[1,3], Ph.D, Skirdkov P. N.[1,4], Ph.D, Zvezdin K. A.[1,4]
[1] "New spintronic technologies" LLC
30 Bolshoy Blvd., Moscow, 121205, Russia
v.kikteva@rqc.ru
[2] MIREA — Russian Technological University
78 Vernadskogo Ave., Moscow, 119454, Russia
[3] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[4] Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilova St., Moscow, 119991, Russia

We experimentally investigated how the distance between nanodots and their diameter affect the ferromagnetic resonance modes. We show that decreasing distance between the points the dipole interaction enhances, which leads to the unification of modes into

two practically indistinguishable modes at a single frequency, which indicates collective magnetization excitations. Our observations pave the way for the development of spintronic devices for frequency-selective systems that use both geometric parameters and spin-orbit effects for tunable collective magnetization control.
Keywords: ferromagnetic resonance; inverse spin Hall effect; nanostructuring; nanodots.

Исследования наноструктурированных материалов показывают их перспективность и важность для развития современных спинтронных устройств, например, магнонных [1–2], в которых большую роль играет коллективная магнитная динамика в периодических массивах [3]. Контроль поведения намагниченности является ключом к достижению стабильности и высокой эффективности операций.

Открытым остается вопрос о влиянии наноструктурирования на моды в структурах тяжелый металл — ферромагнетик. Например, в работе [4] показано влияние радиуса индивидуального наностолбика на магнитные моды для похожей системы ферромагнетик — топологический изолятор. Целью нашей работы является исследование дипольного взаимодействия между наноточками путем контроля расстояния между точками и диаметров точек.

Для экспериментального исследования были взяты структуры следующего состава слоев, в скобках указана толщина слоя в нм: W (5 нм)/NiFe (20 или 4 нм)/MgO (4 нм), представляющие собой полоску тяжелого металла от 20 до 100 микрон с наноточками ферромагнетика сверху. Наноструктурированный слой представляет собой массив точек диаметром 200 или 400 нм и расстоянием между центрами (периодом) точек 400, 600 или 1200 нм. Измерения проводились методом ферромагнитного резонанса и обратного спинового эффекта Холла. Показано, что точки диаметром 200 нм и периодом 600 нм демонстрируют наличие четырех мод намагниченности, разнесенных по частотам. Эти моды, по нашему предположению, соответствуют динамике намагниченности в центре отдельной точки, на краю отдельной точки, в центре массива и на краю массива, что также объясняет их смещение по частотам. Массив с точками диаметром 400 нм и периодом 600 нм показывают единственную моду на частоте ферромагнитного резонанса, мы связываем это с сильным дипольным взаимодействием между наноточками по сравнению с эффективными полями, которые синхронизируют моды, сдвигая их по частоте к резонансу. Для образцов с периодом 1200 нм снова наблюдается несколько мод, но несимметричных относительно внешнего магнитного поля. Обратный спиновый эффект Холла в данном случае использовался для оценки конверсии в выходное напряжение благодаря возникающему эффекту спиновой накачки в системе и эффекту Рашбы — Эдельштейна. Дополнительно исследованы образцы с толщиной наноточек 4 нм. В этих образцах поведение мод полностью повторяет случай сплошных пленок, демонстрируя классический ферромагнитный резонанс. Также аналитически рассчитаны четыре моды и как расположены они по частотам и отдельно аппроксимированы резонансные пики кривой Лоренца.

Организация разного состава мод намагниченности в зависимости от геометрических характеристик позволяет создавать множество адресуемых резонансных режимов. Эти результаты открывают путь к созданию наноструктурированных магнитных массивов с настраиваемыми резонансными характеристиками, что

открывает потенциально их применение в устройствах спинтроники и частотно-селективных системах.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-79-30019.

Литература

1. Magnonics: Spin waves on the nanoscale / S. Neusser and D. Grundler // Advanced materials 21, 2009.
2. Magnon spintronics / A. V. Chumak, V. I Vasyuchka, A. A. Serga, and B. Hillebrands // Nature physics 11, 2015.
3. Spin-waves in cylindrical magnetic dot arrays with in-plane magnetization / K. Y. Guslienko and A. Slavin // Journal of Applied Physics 87, 2000.
4. Spin pumping and probe in permalloy dots-topological insulator bilayers / H. Han, Y. Chen, M. Davydova, P. Petrov, P. Skirdkov, J. Lin, J.Wu, J. Huang, K. Zvezdin, and A. Zvezdin // Physics Letters 111, 2017.

УДК 537.533.2

Разработка автоэмиссионного источника электронов для приборов СВЧ диапазона

Ковалец А. И., Евсиков И. Д., Демин Г. Д., д. т. н., Путря М. Г.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
koval_21@vk.com

Изготовлены и исследованы автоэмиссионные катоды в форме лезвий на основе кремния n-типа проводимости, легированного сурьмой. Приведены результаты экспериментальных испытаний в вакуумной камере, включая вольт-амперную характеристику, пороговое напряжение и максимальный ток эмиссии.
Ключевые слова: холодные катоды; полевая эмиссия; кремний; лезвийные катоды; матричные катоды.

Development of field emission electron sources for RF devices

Kovalets A. I., Evsikov I. D., Demin G. D., Ph.D, Putrya M. G.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
koval_21@vk.com

Blade-shaped field-emission cathodes based on n-type silicon doped with antimony were fabricated and studied. The results of experimental tests in a vacuum chamber are presented, including the current-voltage characteristic, threshold voltage, and maximum emission current.
Keywords: cold cathodes; field emission; silicon; blade cathodes; matrix cathodes.

Вакуумная микроэлектроника представляет собой одно из наиболее динамично развивающихся направлений современной электроники. Вместе с тем, широкое внедрение ее достижений сдерживается рядом проблем, среди которых — необходимость формирования наноразмерной элементной базы и ее технологическая совместимость с уже сложившимися микроэлектронными маршрутами. В этом контексте особое значение приобретают исследования, направленные на создание катодных структур [1–3].

В ходе исследования были изготовлены лезвийные катоды на основе кремния n-типа, легированного сурьмой. Технологический маршрут включал: термическое окисление кремния (300 нм SiO_2);фотолитографию; плазмохимическое травление SiO_2 в CF_4; плазмохимическое травление кремния в SF_6; снятие фоторезиста;удаление остаточного SiO_2.

Экспериментальные исследования проведены в вакуумной камере при давлении ~10^{-6} Торр. Межэлектродный зазор составлял ~100 мкм. В результате была построена ВАХ (рис. 1).

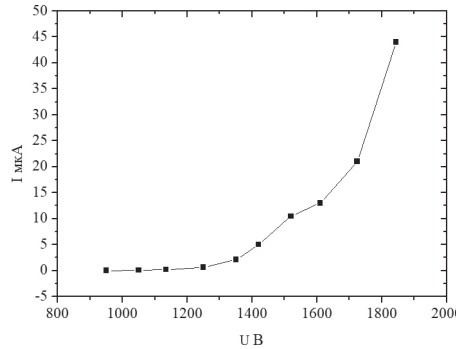


Рис. 1. ВАХ матрицы автоэмиссионных катодов

Таким образом, исследование позволило определить ВАХ полевой эмиссионной ячейки с лезвийным катодом на основе кремния n-типа. Были выявлены напряжения включения (при токе 0,01 мкА) составило 950–1300 В. При максимальном напряжении 1844 В зарегистрирован ток эмиссии 44 мкА. При этом в конечной точке стабильность токовых характеристик сохранялась в течении около 10 минут с отклонением менее 10%.

Литература

1. Demin G. D., Djuzhev N. A., Filippov N. A., Glagolev P. Yu., Evsikov I. D., Patyukov N. N. Comprehensive analysis of field-electron emission properties of nanosized silicon blade-type and needle-type field emitters // Journal of Vacuum Science & Technology B, 2019. Vol. 37. P. 022903.
2. Ławrowski R., Hausladen M., Buchner P., Schreiner R. Silicon Field Emission Electron Source With Individually Controllable Single Emitters // IEEE Transactions on Electron Devices, 2021. Vol. 68. P. 4116–4122.
3. Shesterkin V. I. Operating Emission Characteristics of Various Types of Field-Emission Cathodes // Journal of Communications Technology and Electronics, 2020. Vol. 65. P. 1–26.

УДК 621.317.39.084.2

Формирование трехмерных архитектур на основе углеродных наноматериалов для гибких датчиков давления

Демирская Е. А.[1], Морозова А. С.[1], Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
katedemirskaya@mail.ru
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Разработаны трехмерные электропроводящие структуры из гибридов углеродных наноматериалов для гибких датчиков давления. Исследованы стабильность дисперсных сред, морфология покрытий и пьезорезистивные характеристики. Показано, влияние типа подложки на чувствительность и сопротивление датчиков.
Ключевые слова: углеродные нанотрубки; восстановленный оксид графена; гибкие датчики давления; трехмерные структуры; пьезорезистивные характеристики.

Formation of Three-Dimensional Architectures Based on Carbon Nanomaterials for Flexible Pressure Sensors

Demirskaya E. A.[1], Morozova A. S.[1], Gerasimenko A. Yu.[1,2]
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
katedemirskaya@mail.ru
[2] I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University)
8/2 Trubetskaya St., Moscow, 119048, Russia

Three-dimensional electrically conductive structures based on hybrids of carbon nanomaterials for flexible pressure sensors have been developed. The stability of dispersed media, coating morphology, and piezoresistive characteristics have been studied. The influence of the substrate type on sensor sensitivity and resistance is demonstrated.
Keywords: carbon nanotubes; reduced graphene oxide; flexible pressure sensors; three-dimensional structures; piezoresistive characteristics.

Разработка гибких датчиков давления представляет собой одно из направлений в области биомедицинской электроники [1]. Такие устройства применяются для создания электронной кожи, распознавания жестов и контроля биомеханических движений [2]. Одностенные и многостенные углеродные нанотрубки (ОУНТ и МУНТ, соответственно) и восстановленный оксида графена (ВОГ), рассматриваются в качестве перспективной основы для сенсорных систем благодаря высокой электропроводности и механической гибкости [3]. Вместе с тем практическое применение ограничивается нестабильностью дисперсных сред наноматериалов и низкая чувствительность получаемых структур [2, 3].

В данной работе были приготовлены дисперсные среды на основе ОУНТ, МУНТ и ВОГ. Дисперсная среда на основе МУНТ готовилась в смеси дистиллированной воды и этанола (2:1). Дисперсные среды с ВОГ стабилизировались дезоксихолатом натрия с добавлением 20% (ВОГ_20) или 25% этанола (ВОГ_25). Дисперсные среды с ОУНТ стабилизировались холатом натрия с добавлением 20% (ОУНТ_20) или 25% этанола (ОУНТ_25). Методом динамического рассеяния света оценены гидродинамические радиусы частиц. Наиболее однородными являются дисперсные среды на основе МУНТ с радиусом частиц 107–115 нм и вкладом рассеяния 82–90%, а также ВОГ_20, имеющая радиус частиц 160–167 нм и вклад рассеяния 92–98%. ОУНТ_20 имеет радиус частиц 125–174 нм с вкладом рассеяния 65–87%. Повышение концентрации этанола до 25% приводит к образованию крупных агрегатов. Для ВОГ_25 размер агрегатов составляет $6{,}6\cdot10^4$–$6{,}7\cdot10^4$ нм, для ОУНТ_25–$4{,}2\cdot10^4$–$4{,}9\cdot10^4$ нм.

Формирование трехмерных структур проводилось методом спрей-осаждения с использованием автоматизированной установки. Технологический процесс включал нанесение дисперсных сред на подложки из полидиметилсилоксана и силикона при следующих параметрах: диаметр сопла распылительной головки составлял 0,3 мм, расстояние до подложки фиксировалось на уровне 13 см, рабочее давление поддерживалось в диапазоне 1–3,5 кг/см^2. Скорость перемещения распылительной головки составляла 1 см/с. Проводящий слой создавался последовательным нанесением сначала 54 мл дисперсной среды на основе МУНТ при температуре нагревательного столика 90 ± 5 °C, что соответствовало 1200 циклам распыления, а затем 2,5 мл дисперсной среды на основе ВОГ с 20% этанола при температуре нагревательного столика 60 ± 5 °C, что составляло 56 циклов. Такая последовательность обеспечивала формирование стабильного проводящего каркаса из нанотрубок и чувствительного слоя из ВОГ. Отклонение от оптимального количества слоев ВОГ приводит к растрескиванию покрытия. При использовании дисперсной среды на основе ОУНТ формируются глобулярные структуры размером до 38 мкм, нарушающие сплошность покрытия.

Пьезорезистивные измерения показали, что чувствительность датчиков с силиконовой подложкой достигает $1{,}13\pm0{,}47$ кПа$^{-1}$, что значительно превышает чувствительность датчиков с подложкой из ПДМС, которая не превышает $0{,}20\pm0{,}05$ кПа$^{-1}$. Сопротивление датчиков на силиконе составляет 1600 ± 700 кОм, тогда как на ПДМС — $37{,}5\pm10{,}5$ кОм. Следовательно, датчики на силиконе обладают более высокой чувствительностью, а датчики на ПДМС характеризуются более низким сопротивлением и большей механической стабильностью.

Измерения показали, что выбор типа подложки определяет характеристики датчика. Для задач, требующих высокой чувствительности к давлению, предпочтительны силиконовые подложки, тогда как для применений, где критично низкое сопротивление, более подходят подложки из ПДМС. В зависимости от конкретной задачи можно выбрать подходящий тип подложки, что расширяет возможности применения разработанных трехмерных углеродных структур. По чувствительности разработанные датчики сопоставимы с известными композитами на основе ВОГ/МУНТ/ПДМС, для которых в литературе сообщается о чувствительности около 1,62 кПа$^{-1}$ [4]. Разработанные гибкие датчики давления могут быть использованы в системах мониторинга артериального давления, а также в носимых медицинских устройствах для непрерывного контроля физиологических параметров.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (Проект FSMR-2024-0003).

Литература

1. Jeong Y., Park J., Lee J. et al. Ultrathin, Biocompatible, and Flexible Pressure Sensor with a Wide Pressure Range and Its Biomedical Application // ACS Sensors, 2020. Vol. 5. № 2. P. 481–489.
2. Yang H., Sun Y., Feng Y. et al. Dual-Sided Microstructured rGO–CNT Flexible Sensors for High-Sensitivity and Wide-Range Pressure Detection // ACS Applied Electronic Materials, 2025. Vol. 7. № 4. P. 1234–1245.
3. Zhang T., Shen C., Cao G. et al. Preparation and properties of rGO/MWCNT/PDMS composite flexible pressure sensor // Journal of Zhejiang Textile Science and Engineering, 2023. Vol. 15. № 3. P. 45–52.
4. Lu H., Zhang Y., Wang X. et al. Porous reduced graphene oxide/multi-walled carbon nanotubes/polydimethylsiloxane piezoresistive pressure sensor for human motion detection // Materials Today Nano, 2024. Vol. 28. P. 100512.

УДК 616.8-089:621.38

Исследование *in situ* формирования электропроводящих конструкций на основе слоев углеродных нанотрубок для восстановления нейронной проводимости

Иванова А. С.[1], Сучкова В. В.[1,2], Герасименко А. Ю.[1,2], д. т. н.
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
ivanovasasha1444@gmail.com, molodykh1999@gmail.com
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
119991, г. Москва, ул. Большая Пироговская, 8, стр. 2

Разработаны электропроводящие биокомпозиты на основе одностенных углеродных нанотрубок, формируемые *in situ* для восстановления электрической непрерывности нервной ткани. Показаны высокая электропроводность, биосовместимость, биодеградация и механические свойства, близкие к нервной ткани.
Ключевые слова: углеродные нанотрубки; нейроинтерфейс; нейрохирургия; биополимеры; лазерная биопайка; электропроводящие композиты.

Investigation of In Situ Formation of Electrically Conductive Structures Based on Carbon Nanotube Layers for the Restoration of Neural Conductivity

Ivanova A. S.[1], Suchkova V. V.[1,2], Gerasimenko A. Yu.[1,2]
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
ivanovasasha1444@gmail.com, molodykh1999@gmail.com
[2] I. M. Sechenov First Moscow State Medical University
8/2 Bolshaya Pirogovskaya St., Moscow, 119991, Russia

Electrically conductive biocomposites based on single-walled carbon nanotubes were developed for in situ restoration of neural tissue conductivity. The materials demonstrated high conductivity, biocompatibility, biodegradability, and mechanical properties comparable to neural tissue.
Keywords: carbon nanotubes; neural interface; neurosurgery; biopolymers; laser tissue soldering; electrically conductive composites.

Восстановление проводимости поврежденных нервов остается актуальной задачей реконструктивной нейрохирургии. Лазерная пайка является современным биофотонным методом для хирургического восстановления целостности мягких тканей. Она основана на прямом фототермическом воздействии лазерного излучения на биокомпозитные материалы, которые при нагреве образуют прочное и эластичное соединение *in situ*.

Материалы и состав биокомпозитов

Биоорганический припой представляет собой однородную дисперсию на основе белков и воды (состав в табл. 1). Основными компонентами биоприпоя являются белок крови — бычий сывороточный альбумин (БСА) и структурный

белок — коллаген. Под воздействием лазерной энергии коллагеновые волокна расплетаются и затем формируют межволоконные связи, обеспечивая прочное соединение нервной ткани [1], а БСА денатурирует и коагулирует, образуя твердую адгезивную матрицу [2]. Для локальной пайки места повреждения в состав припоя включается индоцианин зеленый с пиком поглощения в ближней ИК-области спектра, что совпадает с длиной волны применяемого полупроводникового ИК-лазера (810 нм, AlGaAs) с системой температурной обратной связи.

Наличие одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в биоприпое обеспечивает дополнительную прочность и стабильность соединения. ОУНТ, инкапсулированные в белковую матрицу, обладают низкой цитотоксичностью и индуцируют активную пролиферацию клеток.

Таблица 1. Концентрации компонентов биоорганического припоя

Компонент	Массовая концентрация
БСА	25 масс.%
Коллаген	12 масс.%
ОУНТ	0,1 масс.%
Холат натрия	0,9 масс.%
ИЦЗ	0,01 масс.%

Исследование механических свойств методом наноиндентирования

Для оценки модуля упругости было проведено наноиндентирование структурированных образцов биоприпоя в сухом и гидратированном состояниях при нагрузке 60 мН (табл. 2).

Таблица 2. Модуль упругости биоприпоя в сухом и гидратированном состояниях

Состояние	*E*, ГПа
Сухое	$5{,}2 \pm 1{,}8$
Гидратированное	$0{,}057 \pm 0{,}008$

Высокий модуль упругости сухого композита указывает на формирование плотной полимерной матрицы, усиленной ОУНТ. Поскольку биоприпой предназначен для скрепления мягкой нервной ткани, оценивался модуль упругости в гидратированном состоянии (поверхностное увлажнение образца 0,25 мл воды 5 минут). Взаимодействие полимерной матрицы с жидкостями вызывает ее набухание и пластификацию. При гидратации наблюдается значительное снижение модуля упругости почти в 90 раз. Одновременно возрастает глубина внедрения индентора с 3010 до 32295 нм. Полученные результаты свидетельствуют о выраженной влагозависимой механике и биомиметичности разработанного композита.

Электропроводящие свойства

Для восстановления нервных тканей важно, чтобы композиты были электропроводящими, поскольку нейронная проводимость осуществляется потенциалами действия и ионными токами в проводящей среде. После травмы электропроводность

ткани уменьшается из-за нарушения целостности структур. Электропроводящий композит восстанавливает локальную электрическую связность в зоне повреждения, тем самым обеспечивая нормальное проведение эндогенных сигналов.

Удельное сопротивление определялось четырехзондовым методом: для лазерно-индуцированного биоприпоя оно составило $1{,}7 \pm 0{,}4$ Ом·см. В литературе удельное сопротивление нервных тканей оценивается в диапазоне десятков–тысяч Ом·см [3].

Высокая электропроводность композитов обусловлена формированием сплошной перколяционной сети из ОУНТ, обеспечивающей распространение эндогенных потенциалов с минимальными потерями сигнала. Наличие ионизируемых групп в полимерной матрице придает композиту свойства смешанного электронно-ионного проводника.

Спектрометрический анализ

Биодеградацию композита оценивали спектрофотометрически по изменению оптической плотности раствора продуктов деградации. Образцы инкубировали в фосфатно-солевом буфере при 37 °C в течение 24 суток, после чего проводили спектральный анализ раствора на спектрофотометре Genesys UV-Vis (рис. 1).

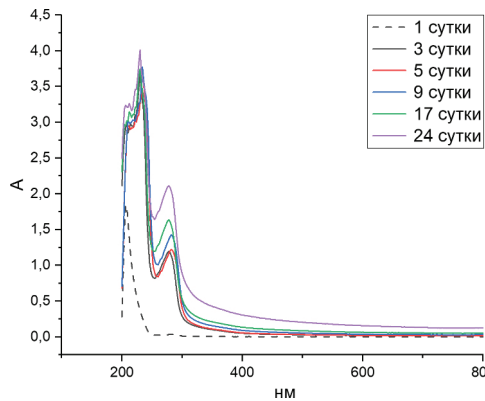
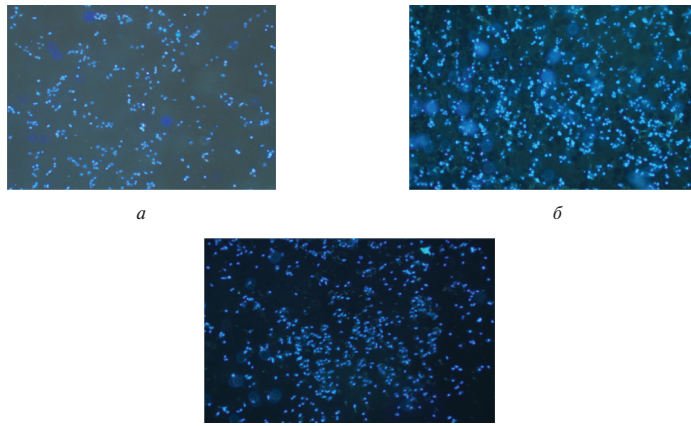


Рис. 1. Спектры поглощения раствора продуктов деградации композита на основе альбумина и коллагена в различные сроки инкубации

Для исследуемого материала наблюдается постепенное увеличение оптической плотности раствора с увеличением времени инкубации, что свидетельствует о деградации материала и переходе продуктов распада в раствор. Наиболее выраженные изменения спектров фиксируются в диапазоне 200–350 нм.

Оценка цитотоксичности

По данным флуоресцентной микроскопии клетки Neuro-2A сохраняли нормальную морфологию. Количество клеток увеличивалось с 398 ± 12 (рис. 2*а*) в контроле до 856 ± 25 (рис. 2*б*) и 652 ± 20 (рис. 2*в*) в присутствии жидкого и структурированного биоприпоя соответственно, что свидетельствует об отсутствии цитотоксичности и стимулировании клеточной адгезии и пролиферации.



а *б* *в*

Рис. 2. Флуоресцентные фотоизображения клеток Neuro-2A: в контрольной группе (*а*); в присутствии жидкого биоприпоя (*б*); в присутствии лазерно-индуцированного биоприпоя (*в*)

Выводы

Разработан электропроводящий биокомпозит на основе ОУНТ, БСА и коллагена, формируемый *in situ* под действием ИК-лазера. В гидратированном состоянии материал обладает модулем упругости, близким к нервной ткани, демонстрирует биодеградацию, низкое удельное сопротивление и отсутствие цитотоксичности. Полученные результаты подтверждают перспективность применения композита в реконструктивной нейрохирургии для восстановления нейронной проводимости.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Биоинтегрированная электроника на основе углеродных нанотрубок и графена» (Проект FSMR-2024-0003).

Литература

1. Suchkova V. V., Ryabkin D. I., Yang L., Telyshev D. V., Gerasimenko A. Yu. Modern trends in laser non-invasive reconstruction of biological tissues // The Eurasian Journal of Life Sciences, 2025. Vol. 1. № 1. P. 4–16.
2. Рябкин Д. И., Ставцев Д. Д., Сучкова В. В., Морозова Е. А., Пьявченко Г. А., Коновалов А. Н., Селищев С. В., Герасименко А. Ю. Апробация технологии лазерного восстановления мягких тканей с помощью лазерной спекл-контрастной визуализации in vivo // Журнал технической физики, 2025. –Том 95. — № 5. — С. 1058–1068.
3. Horn M. R., Vetter C., Bashirullah R., Carr M., Yoshida K. Characterization of the electrical properties of mammalian peripheral nerve laminae // Artificial Organs, 2023. Vol. 47. № 4. P. 705–720.

УДК 539.231

Лазер-индуцированная карбонизация нейроинтерфейсов из титана

Кузнецова Е. А.[1], Ефремова К. Д.[1,2], Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
kyzya.evgen8@yandex.ru
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Показано влияние методики формирования углеродных покрытий и лазер-индуцированной карбонизации на свойства нейроинтерфейсов. Установлено повышение эффективности переноса заряда, а также улучшение адгезии, механической устойчивости и долговременной стабильности покрытий.
Ключевые слова: биомедицинская микроэлектроника; нейроинтерфейсы; углеродные покрытия; лазер-индуцированная карбонизация; адгезия; перенос заряда; электрохимические характеристики

Laser-induced carburization of titanium neural interfaces

Kuznetsova E. A.[1], Efremova K. D.[1,2], Gerasimenko A. Yu.[1,2]
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
kyzya.evgen8@yandex.ru
[2] I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University)
8/2 Trubetskaya St., Moscow, 119048, Russia

The impact of the carbon coating formation method and laser-induced carbonization on the properties of neural interfaces was demonstrated. Increased charge transfer efficiency, as well as improved adhesion, mechanical resistance, and long-term stability of the coatings, were demonstrated.
Keywords: biomedical microelectronics; neural interfaces; carbon coatings; laser-induced carbonization; adhesion; charge transport; electrochemical properties.

Развитие биомедицинской микроэлектроники требует создания эффективных и стабильных нейроинтерфейсов, обеспечивающих надежное взаимодействие электронных устройств с нервной тканью. Ограниченные электрохимические характеристики традиционных титановых электродов снижают эффективность передачи стимуляционных сигналов [1]. Перспективным решением является формирование проводящих углеродных покрытий, обеспечивающих увеличение эффективной поверхности и улучшение параметров интерфейса «электрод–ткань».

Традиционные углеродные покрытия, формируемые на металлических электродах, характеризуются ограниченной адгезионной прочностью и склонностью к деградации в физиологических средах, что может приводить к их частичной деламинации и ухудшению стабильности функционирования нейроинтерфейсов. В качестве подхода к решению данной проблемы рассматривается применение лазерного излучения, позволяющего модифицировать структуру и морфологию

углеродного слоя, повышая его адгезию к подложке, механическую устойчивость и стабильность в физиологических условиях, а также улучшая электрофизические характеристики интерфейса. В частности, перспективным является подход, основанный на лазер-индуцированной карбонизации поверхности титановых нейроинтерфейсов, обеспечивающий формирование устойчивого проводящего слоя [2].

В работе предложен подход к модификации титановых нейроинтерфейсов посредством лазер-индуцированной карбонизации углеродных покрытий, обеспечивающий увеличение зарядовой емкости, улучшение адгезии и повышение стабильности электрохимических характеристик при стимуляции.

В рамках первого этапа исследовано управление электрохимическими параметрами нейроинтерфейсов за счет варьирования условий формирования углеродного покрытия. Показано, что оптимизация параметров способствует формированию однородной проводящей сети, обеспечивающей эффективный перенос заряда. Повышение зарядовой емкости и стабильности покрытий способствует более эффективной передаче стимуляционных импульсов. По результатам циклической вольт-амперометрии установлено увеличение передаваемого заряда с 6,3 до 42,5 мкКл, а зарядовой емкости — с 3,2 до 21,3 мкКл/см^2, что соответствует росту более чем в шесть раз по сравнению с чистым титаном.

На втором этапе исследовано влияние лазерного излучения на свойства покрытий. Установлено, что лазерная обработка способствует улучшению адгезии углеродного слоя и повышению его структурной однородности, что приводит к увеличению механической прочности и стабильности нейроинтерфейсов. При этом сохраняются высокие значения передаваемого заряда, а устойчивость электрохимических характеристик при 20 циклах стимуляции возрастает до 98,8 %.

Таким образом, продемонстрировано, что лазерная обработка в сочетании с контролируемыми условиями формирования покрытия является эффективным инструментом управления свойствами углеродных покрытий нейроинтерфейсов. Полученные результаты подтверждают перспективность разработанного подхода для применения в системах нейростимуляции.

Работа выполнена в рамках реализации крупного научного проекта, Соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.

Литература

1. Abbott J. R., Joshi-Imre A., Cogan S. F. In vitro electrochemical properties of titanium nitride neural stimulating and recording electrodes as a function of film thickness and voltage biasing // 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). –IEEE, 2021. P. 6647–6650.
2. Vajari, D. A. et al. Laser-Induced Carbon Pyrolysis of Electrodes for Neural Interface Systems // European Journal of Translational Myology, 2016. Vol. 26. Iss. 3. P. 6062.

УДК 615.46:537.311.3:620.17

Биомиметические электропроводящие композиты для имплантируемых нейроэлектродов

Оцупко Е. П.[1], Савельев М. С.[1], Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
ekaterinaotsupko@mail.ru
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Улучшена электропроводность композиционного гидрогеля за счет использования многостенных углеродных нанотрубок, графена и наночастиц оксида железа. Исследованы электрофизические характеристики материала. Проведено исследование ферментативной биодеградации in vitro с использованием модельных ферментов.
Ключевые слова: композит; биополимер; углеродные нанотрубки; металлические наночастицы; электропроводность; модуль Юнга; биодеградация.

Biomimetic electrically conductive composites for implantable neural electrodes

Otsupko E. P.[1], Savelyev M. S.[1], Gerasimenko A. Yu.[1,2]
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
ekaterinaotsupko@mail.ru
[2] I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University)
8/2 Trubetskaya St., Moscow, 119048, Russia

The electrical conductivity of the composite hydrogel was enhanced through the incorporation of multi-walled carbon nanotubes, graphene, and iron oxide nanoparticles. The electrophysical characteristics of the material were investigated. An in vitro enzymatic biodegradation study was conducted using model enzymes.
Keywords: composite; biopolymer; carbon nanotubes; metallic nanoparticles; electrical conductivity; elastic modulus; biodegradation

Актуальная задача биомедицины — разработка материалов для имплантируемых нейроинтерфейсов, сохраняющих электропроводящий контакт и минимизирующих инкапсуляцию [1]. В работе исследованы электрофизические характеристики композита из биополимеров (альбумин, хитозан, коллаген) и проводящих наночастиц. Комплексный состав матрицы обеспечивает биомиметику. Синтез композита осуществлен лазер-индуцированной полимеризацией на 1070 нм. Переход от одно- к многостенным углеродным нанотрубкам и добавление графена и наночастиц оксида железа увеличивает удельную проводимость до 80 мСм/см. При этом рабочее окно фотополимеризации смещается с 6–18 до 12–18 Дж/см^2. Модуль Юнга (0,6 ГПа) и твердость (0,08 ГПа) композита более чем на два порядка ниже, чем у металлических электродов (модуль Юнга 80–500 ГПа), что уменьшает механическое

несоответствие с тканью [2]. Исследована кинетика деструкции в модельных средах с разной концентрацией ферментов. Оптимальной концентрацией протеазы, исключающей автоингибирование, является 0,5 ЕД/мл. Композит теряет до 96% массы за 9 суток инкубации, оставляя слаборазлагаемый остов из хитозана, армированный наночастицами. Композит является перспективным в дальнейшей разработке покровных материалов для нейроэлектродов и электропроводящих скаффолдов для временной электростимуляции [3].

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (Проект FSMR-2024-0003).

Литература

1. Advances in conductive hydrogels for neural recording and stimulation / H. Dawit, Y. Zhao, J. Wang, R. Pei // Biomaterials Science, 2024. Vol. 12. № 11. P. 2786–2800.
2. A review of electrodes for the electrical brain signal recording / C. Im., J. M. Seo // Biomedical Engineering Letters, 2016. Vol. 6. № 3. –P.
3. Conducting Hydrogel-Based Neural Biointerfacing Technologies / P. Zhang, Y. Yang, Z. Li, Y. Xue, F. Wang, L. Shan, Y. Wang, X. Shi, K. Wu, J. Liu // Advanced Functional Materials, 2025. Vol. 35. № 25. P. 1–24.

УДК 004.048+612.766.1

Применение порождающих моделей для восстановления высокоплотного сигнала электромиограммы по малоканальным данным

Пустовит Г. М.[1,2], Гончарова А. В.[1,2,3]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[3] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
gpustovit@niime.ru

В работе предложен подход к восстановлению высокоплотного сигнала поверхностной электромиографии (пЭМГ) по малоканальным данным с использованием порождающих моделей. Метод основан на реконструкции пространственной структуры мышечной активности по частично наблюдаемым RMS-признакам с применением различных стратегий маскирования. Предварительные эксперименты на наборе данных Hyser (256 каналов, 20 испытуемых) показали, что при маскировании 80% каналов блочным методом среднеквадратичная ошибка восстановления (MSELoss) составляет 0,06 при нормировке амплитуды в диапазон [0, 1]. Подход ориентирован на создание энергоэффективных носимых ЭМГ-устройств.
Ключевые слова: поверхностная электромиография; порождающие модели; гибкие электроды.

Application of Generative Models for Reconstruction of High-Density Electromyographic Signals from Low-Channel Data

Pustovit G. M.[1,2], Goncharova A. V.[1,2,3]
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[3] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
gpustovit@niime.ru

This paper proposes a method for reconstructing high-density surface electromyography (sEMG) signals from low-channel data using generative models. The approach reconstructs spatial muscle activity patterns from partially observed RMS features using various masking strategies. Preliminary experiments on the Hyser dataset (256 channels, 20 subjects) demonstrated that with block-wise masking of 80% of channels, the reconstruction mean squared error (MSELoss) reached 0.06 with amplitude

normalized to the [0, 1] range. The proposed solution is aimed at developing energy-efficient wearable EMG systems.

Keywords: sEMG signal; bionic prosthesis; gesture classification; neural networks; continuous classification.

Поверхностная электромиография (пЭМГ) развивается в сторону миниатюризации и портативности с повышением уровня технологической базы: применением искусственного интеллекта в микроэлектронике [1] и унификации компонентной базы для робототехнических систем [2]. Для пЭМГ используют сухие Ag/AgCl электроды с гелем или ЭМГ браслеты, однако сухие электроды обладают низкой адгезией, что приводит к искажению регистрируемого сигнала при движении. Данную проблему решают гибкие электроды и электродные матрицы, сохраняющие регистрирующие свойства при растяжении и сжатии. Для точной карты близкорасположенных мышц необходима высокоплотная электродная матрица, обладающая повышенной площадью, что приводит к усложнению конструкции и снижению энергоэффективности.

В данной работе представлен подход восстановления высокоплотной ЭМГ по малоканальным данным, являющимся способом решения компромисса между точностью регистрации и миниатюризации устройства с использованием порождающих моделей.

Восстановленный порождающей моделью сигнал должен обладать среднеквадратической ошибкой (MSELoss) не более 0,04 (при нормировке амплитуды RMS-признаков в диапазон [0, 1]) [3], что позволит применять его для управления протезами и анализа активности отдельных мышц

Задача модели состоит в том, чтобы восстановить ЭМГ матрицу (1):

$$X \in \mathbb{R}^{C \times T}, \tag{1}$$

где X — ЭМГ матрица с C — каналов и T — окон, в которой x_{ij} — RMS-значение i-го канала в j-м временном окне длиной τ. С использованием бинарной маски M, где $M_{ij} = 1$ для наблюдаемого канала, минимизируя квадрат $L2$ нормы (2):

$$\mathcal{L} = \left\| (1 - M) \odot (X - \hat{X}) \right\|_2^2, \tag{2}$$

где X — исходная ЭМГ матрица, $\hat{X}$ — восстановленная. Переход от сырого сигнала к RMS снижает временное разрешение, но упрощает задачу генерации, поскольку модель восстанавливает пространственные карты мышечной активности, а не исходные временные ряды.

Для обучения предлагается использовать, многоканальные пЭМГ [4–7], при выполнении жестов кистью, движением ноги как у здоровых испытуемых, так и испытуемых с ампутацией. Перед обучением в исходной матрице маскируется 80 % данных. Исследуются различные стратегии маскирования: случайное поэлементное, маскирование целых каналов (имитация фиксированного браслета) и блочное маскирование смежных каналов (имитация выпадения области), что позволяет оценить применимость данного подхода в ЭМГ датчиках. Обученная модель будет использоваться на малоканальных данных, в пределах предыдущего расположения гибкой электродной матрицы.

Предварительная проверка метода выполнена на открытом наборе данных Hyser [8] (256-канальная пЭМГ предплечья, 20 испытуемых, 34 жеста). Сигнал

разбивался на окна по 200 мс, для каждого окна рассчитывалась RMS. Амплитуда RMS-признаков нормировалась в диапазон [0, 1] по максимальному значению в каждом канале. В ходе эксперимента 80% каналов случайным образом маскировалось блочным методом, имитирующим отказ участка электродной матрицы. Потери вычислялись как среднеквадратичная ошибка (MSELoss) между исходной и восстановленной матрицей. На отложенных сессиях значение MSELoss составило 0,06, что приближается к целевым показателям и свидетельствует о способности модели восстанавливать пространственную структуру мышечной активности по маскированным данным.

Результатом работы является сравнительная оценка стратегий маскирования и определение минимального числа каналов, при котором восстановление сохраняет качество, достаточное для классификации жестов с точностью не менее 93,5%. Разработанный метод позволит упростить конструкцию носимых ЭМГ-устройств и повысить их энергоэффективность, что важно для повседневного применения в протезировании и нейрореабилитации.

Благодарности

Автор выражает благодарность Горневу Евгению Сергеевичу, заместителю руководителя приоритетного технологического направления по электронным технологиям АО «НИИМЭ», член-корреспонденту и академику РАН, Гончаровой Александре Владимировне, научному руководителю, за ценные советы и поддержку в проведении исследования.

Литература

1. Мещанинов Ф. П. и др. ИИ в микроэлектронике // Наноиндустрия, 2025. — Т. 18. — № S11-2(135). — С. 451–458.
2. Горнев Е. С., Рубцов Ю. В. Унификация ЭКБ для беспилотных систем и робототехники // Наноиндустрия, 2025. — Т. 18. — № S11-1(135). — С. 10–14.
3. Kim K. K. et al. A simplified wearable device powered by a generative EMG network for hand-gesture recognition and gait prediction // Nature Sensors, 2025. № 1 (1). P. 27–38.
4. Atzori M. et al. Electromyography data for non-invasive naturally-controlled robotic hand prostheses // Scientific Data, 2014. № 1 (1). P. 140053.
5. Kyranou I., Szymaniak K., Nazarpour K. EMG Dataset for Gesture Recognition with Arm Translation // Scientific Data, 2025. № 1 (12). P. 100.
6. Rumman U. et al. FORS-EMG: A Novel sEMG Dataset for Hand Gesture Recognition Across Multiple Forearm Orientations.
7. Zúñiga-Castillo C. A. et al. SurfaceEMG Datasets for Hand Gesture Recognition Under Constant and Three-Level Force Conditions // Data, 2025. № 12 (10). P. 194.
8. Jiang X., Dai C., Liu X., Fan J. Open Access Dataset and Toolbox of High-Density Surface Electromyogram Recordings (version 2.0.0) // PhysioNet, 2023. https://doi.org/10.13026/hxan-pe94.

УДК 57.087.1 + 004.032.26

Разработка адаптивного алгоритма классификации жестов по ЭМГ-сигналам с управляемым компромиссом между задержкой и точностью

Павлова Т. Д.[1,2], **Гончарова А. В.**[1,2,3]
[1] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[3] *Московский физико-технический институт*
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
tpavlova@niime.ru

Бионические протезы верхних конечностей сталкиваются с компромиссом между точностью распознавания жестов и временем отклика. В работе установлено, что оптимальное окно анализа ЭМГ-сигналов составляет 200–300 мс (85% окон локально стационарны). Предложен двухстадийный нейросетевой алгоритм распознавания, направленный на повышение общей точности классификации и снижение средней временной задержки.
Ключевые слова: ЭМГ-сигнал; бионический протез; классификация жестов; нейронные сети; время отклика системы.

Development of an adaptive gesture classification algorithm based on EMG signals with a controlled compromise between delay and accuracy

Pavlova T. D.[1,2], **Goncharova A. V.**[1,2,3]
[1] *National Research University of Electronic Technology (MIET)*
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[2] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
[3] *Moscow Institute of Physics and Technology*
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
tpavlova@niime.ru

Bionic upper-limb prostheses face a trade-off between gesture recognition accuracy and response time. The study establishes that the optimal analysis window for EMG signals is 200–300 ms (85% of windows are locally stationary). A two-stage neural network recognition algorithm is proposed, aimed at increasing overall classification accuracy and reducing the average time delay.
Keywords: EMG signal; bionic prosthesis; gesture classification; neural networks; system response time.

Ключевой задачей бионического протеза является максимальное приближение к функционалу естественной конечности. Для этого протез должен обеспечивать:

интуитивность управления, функциональную полноту и адаптивность. Однако существующие бионические протезы верхней конечности частично соответствуют этим критериям [1]. Основной проблемой является противоречие между высокой точностью распознавания множества жестов и минимальным временем отклика устройства.

Целью данной работы является анализ влияния длины окна анализа ЭМГ-сигнала на время отклика и разработка схемы двухстадийного алгоритма, обеспечивающего баланс между точностью распознавания и скоростью реакции протеза.

Анализ работ по сегментации ЭМГ-сигналов показал, что данный этап является ключевым для систем управления протезами. Ключевой вывод — выбор длины окна представляет собой фундаментальный компромисс между точностью распознавания и временем отклика: длинные окна точнее, но медленнее, короткие — быстрее, но менее точны. Существует два подхода к сегментации: без перекрытия и скользящими окнами с перекрытиями, при этом второй метод дает более высокие показатели точности классификации для диапазона длин окон 200–300 мс [2]. При этом выбор подхода к сегментации также напрямую влияет на расчет временной задержки отклика протезного устройства [3].

Для оценки локальной стационарности ЭМГ был проведен модифицированный тест обратных расположений. Для исследования была использована открытая база данных NinaPro DB2, выбранная после сравнительного анализа трех популярных датасетов. Экспериментально установлено, что не менее 85 % окон анализа в интервале 100–300 мс являются локально стационарными, что подтверждает актуальность применения данного диапазона для сегментации ЭМГ-сигналов.

Предыдущий алгоритм непрерывной классификации с фиксированным окном 100 мс достиг точности 76 %, что на 25 % выше исходной модели, но он обладает ключевым недостатком, а именно неспособностью адаптироваться к изменчивости ЭМГ-сигнала.

На основе полученных результатов предложена схема двухстадийного нейросетевого алгоритма. На первой стадии в нейросеть подается окно 200–300 мс, что удовлетворяет условиям времени отклика и локальной стационарности. При превышении порога уверенности, который будет задаваться заранее, результат классификации передается на исполнение. Если уверенность низкая, начинается вторая стадия: анализируется сигнал большей длины, а протез удерживает предыдущий жест или остается в покое.

Таким образом, предлагаемая стратегия позволит повышать общую точность за счет глубокого анализа в сложных случая и сокращать среднее время отклика.

Благодарности

Автор выражает благодарность Горневу Евгению Сергеевичу, заместителю руководителя приоритетного технологического направления по электронным технологиям АО «НИИМЭ», член-корреспонденту и академику РАН, Гончаровой Александре Владимировне, научному руководителю, за ценные советы и поддержку в проведении исследования.

Литература

1. Capsi-Morales P. et al. Functional assessment of current upper limb prostheses: An integrated clinical and technological perspective // Plos one, 2023. Vol. 18. № 8. –P. e0289978.

2. Ashraf H., Waris, A., Gilani S. O., Kashif A. S., Jamil M., Jochumsen M., Niazi I. K. Evaluation of windowing techniques for intramuscular EMG-based diagnostic, rehabilitative and assistive devices // Journal of Neural Engineering, 2021. Vol. 18. № 1. P. 016017.
3. Farrell T. R. Determining delay created by multifunctional prosthesis controllers // Journal of rehabilitation research and development, 2011. Vol. 48. № 6.

УДК 519.876.2

Математическое моделирование контринсулярных механизмов для разработки алгоритмов управления мультигормональными биомедицинскими системами терапии сахарного диабета 1-го типа

Струкова Э. И., Пожар К. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Предложена математическая модель, объединяющая подсистемы глюкагона и прамлинтида и описывающая их влияние на гликемию при подкожном введении в условиях терапии сахарного диабета 1-го типа. Модель может служить основой для *in silico* тестирования алгоритмов мультигормональных замкнутых систем.
Ключевые слова: математическая модель; сахарный диабет 1-го типа; глюкагон; прамлинтид; замкнутая система управления.

Mathematical modeling of counter-insulin mechanisms for the development of control algorithms for multihormonal biomedical systems in type 1 diabetes therapy

Strukova E. I., Pozhar K. V.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

A mathematical model integrating glucagon and pramlintide subsystems and describing their effects on glycemia upon subcutaneous administration in type 1 diabetes therapy is proposed. The model can serve as a basis for *in silico* testing of multihormonal closed-loop system algorithms.
Keywords: mathematical model; type 1 diabetes mellitus; glucagon; pramlintide; closed-loop control system.

Современная биомедицинская электроника в области терапии сахарного диабета (СД) 1-го типа движется к созданию полностью автоматизированных замкнутых систем, способных в непрерывном режиме имитировать гормональную функцию поджелудочной железы. Несмотря на прогресс в точности непрерывного мониторинга глюкозы и алгоритмов управления доставкой инсулина, фундаментальным ограничением существующих систем с замкнутым контуром остается использование в терапии только одного гормона. Терапия исключительно инсулином не воспроизводит физиологические механизмы в полной мере, что обусловливает сохранение высокого риска гипогликемических состояний, особенно на фоне ошибок дозирования или невозможности компенсации постпрандиальных пиков гликемии без сопутствующего замедления всасывания нутриентов [1].

Появление стабильных аналогов глюкагона (дасиглюкагон) и амилина (прамлинтид) устранило фармацевтические барьеры для подкожной доставки нескольких гормонов посредством носимых инфузионных устройств. Однако ключевым сдерживающим фактором развития терапевтических устройств остается

отсутствие адекватного математического описания фармакокинетики и фармакодинамики новых лекарственных форм в условиях совместного гормонального воздействия. В работе предложена структура математической модели, объединяющей подсистемы глюкагона и прамлинтида и описывающей их влияние на гликемический профиль с учетом действия инсулина.

Система глюкагона представлена двумя ключевыми блоками, описывающими фармакокинетику и фармакодинамику гормона. Фармакокинетический блок, или блок абсорбции, представлен системой линейных дифференциальных уравнений первого порядка, отражающих поступление гормона из подкожного депо в системный кровоток и его последующую элиминацию. Параметризация данного блока опирается на известные клинические данные о динамике концентрации дасиглюкагона после подкожного введения [2]. Фармакодинамический блок, отражающий влияние гормона на гликемию, описывает связывание глюкагона с рецепторами гепатоцитов с использованием кинетики Михаэлиса — Ментен, что позволяет учесть эффект насыщения рецепторного аппарата при высоких концентрациях гормона и предотвратить чрезмерную стимуляцию гликогенолиза.

Подсистема прамлинтида описывает фармакокинетику аналога амилина и его физиологические эффекты, значимые для регуляции постпрандиальной гликемии. Абсорбция из подкожного депо моделируется как двухфазный процесс: начальная быстрая фаза, определяющая достижение терапевтической пиковой концентрации, и последующая медленная фаза, обеспечивающая пролонгированное действие в течение характерного периода полувыведения. Влияние прамлинтида на скорость опорожнения желудка описывается функцией, зависящей от его текущей концентрации и обеспечивающей дозозависимое замедление поступления нутриентов в тонкий кишечник и, как следствие, сглаживание постпрандиальных пиков гликемии.

Разработанная модель представляет собой инструментальную основу для разработки и верификации *in silico* алгоритмов управления мультигормональными замкнутыми системами. Ее интеграция в состав предиктивных контроллеров устройств биомедицинской электроники позволит осуществлять скоординированную доставку инсулина, прамлинтида и глюкагона, минимизируя риск гипогликемии и повышая безопасность автоматизированной терапии СД 1-го типа.

Литература

1. Dual-hormone artificial pancreas for management of type 1 diabetes: Recent progress and future directions / Infante M., Baidal D.A., Rickels M.R., Fabbri A., Skyler J.S. et al. // Artificial organs, 2021. Vol. 45. №9. P. 968–986.
2. Pharmacokinetic and pharmacodynamic characteristics of dasiglucagon, a novel soluble and stable glucagon analog / Hovelmann U., Bysted B.V., Mouritzen U., Macchi F., Lamers D. Et al. // Diabetes Care, 2018. Vol. 41. №3. P. 531–537.

УДК 004.048 + 616.073.756.5

Адаптация нейросетевой архитектуры для выявления стенозов коронарных артерий на статических ангиографических данных

Костышина А. О.[1,3], Гончарова А. В.[1,2,3]
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Разработана и экспериментально подтверждена эффективность модифицированной архитектуры U-Net с механизмами внимания и комбинированной функцией потерь. Модель показала стабильное улучшение качества сегментации. Предложен метод детекции стенозов на основе скелетизации предсказанных масок и анализа диаметра.
Ключевые слова: U-Net; пространственные блоки внимания; канальные блоки внимания; ангиография; сегментация сосудов; стеноз; сверточные нейросети.

Adaptation of neural network architecture for detecting coronary artery stenoses based on static angiographic data

Kostyshina A. O.[1,3], Goncharova A. V.[1,2,3]
[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] *National Research University of Electronic Technology (MIET)*
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[3] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

The effectiveness of a modified U-Net architecture with attention mechanisms and a combined loss function has been developed and experimentally confirmed. The model showed a steady improvement in segmentation quality. A method for detecting stenoses based on skeletonization of predicted masks and diameter analysis is proposed.
Keywords: U-Net; Attention Gates; Squeeze-and-Excitation; angiography; vessel segmentation; stenosis; convolutional neural networks.

Рентгеновская ангиография является ключевым способом при выявлении стенозов коронарных артерий. Интерпретация снимков врачами осуществляется вручную, поэтому носит субъективный характер, требует высокой квалификации специалиста и осложняется временными затратами.

Автоматизация анализа ангиограмм сталкивается с трудностями реальных изображений, среди которых низкая контрастность, технические артефакты, сложная геометрия коронарного русла и сильный дисбаланс классов [1, 2]. Архитектура базовой сети, несмотря на эффективность при малых выборках, имеет

ограниченное рецептивное поле и не адаптирована для работы с несбалансированными данными [3]. В связи с этим целью работы является адаптация модели U-Net [4] для более точного выделения стенозов на базе датасета ARCADE [5].

Проведена сегментация стенозов напрямую. Модель была обучена на 1000 изображениях с бинарными масками сужений. Результат оказался неудовлетворительным: коэффициент Dice = 29 %, IoU = 17 %. Этот результат подтвердил необходимость использования промежуточного этапа. Сначала научиться надежно сегментировать всю сосудистую сеть, затем на ее основе искать стенозы.

Для испытания модели на датасете сосудов использовалась нарезка на перекрывающиеся патчи размером 128×128 пикселей. Лучшая модель достигла на тестовой выборке Dice = 65 % и IoU = 55 %. Этот результат, сопоставим с опубликованными исследованиями на датасете ARCADE и может служить надежным бейзлайном.

Для улучшения фокусировки сети на значимых областях и подавления фонового шума в архитектуру были внедрены блоки внимания: пространственные (Attention Gates) и канальные (Squeeze-and-Excitation) [6, 7]. Это позволяет модели динамически взвешивать значимость признаков, отдавая приоритет сосудистым структурам.

С целью преодоления дисбаланса классов была создана комбинированная функция потерь. Она обеспечивает стабильность обучения, ориентируется на совпадение границ сегментов, акцентирует внимание на сложных для классификации пикселях.

Предложенные доработки модели позволили повысить коэффициент Dice на 4–6 % благодаря более точному совпадению прогнозируемых и реальных границ сосудов. Показатель IoU возросла на 5–7 % за счет более четкой локализации патологий и сокращения числа ложных срабатываний. Снизился Loss на 8–12 %, что отражает более устойчивый процесс оптимизации и улучшение общей сходимости модели.

Планы дальнейшую работу. Первое направление: переход от сегментации сосудов к детекции стенозов. Предсказанная бинарная маска сосудистого русла будет подвергнута скелетизации — построению центральной линии. Вдоль этой линии будет вычисляться профиль диаметра сосуда. Участки, где диаметр локально уменьшается более чем на 50 % относительно среднего значения в соседних областях, будут помечаться как кандидаты в стенозы. Затем эти кандидаты будут сопоставлены с экспертными аннотациями стенозов из датасета ARCADE. По результатам сопоставления будет вычислена чувствительность и точность детекции.

Второе направление: классификация выделенных стенозов по степени сужения. На основе вычисленного профиля диаметра стенозы будут разделяться на категории: менее 50 %, 50–70 %, более 70 %. Классификация будет реализована программно без обучения дополнительной нейросетевой модели, на основе пороговых значений, что обеспечит интерпретируемость результатов.

Литература

1. Kalisz K. et al. Artifacts at cardiac CT: physics and solutions // Radiographics, 2016. Vol. 36. № 7. P. 2064–2083.
2. Qin B. et al. Robust pca unrolling network for super-resolution vessel extraction in x-ray coronary angiography // IEEE Transactions on Medical Imaging, 2022. Vol. 41. № 11. P. 3087–3098.

3. Yao W. et al. From cnn to transformer: A review of medical image segmentation models // Journal of Imaging Informatics in Medicine, 2024. Vol. 37. № 4. P. 1529–1547.
4. Neha F. et al. U-Net in Medical Image Segmentation: A Review of Its Applications Across Modalities // arXiv preprint arXiv:2412.02242. 2024
5. Popov M. et al. Dataset for automatic region-based coronary artery disease diagnostics using X-ray angiography images // Scientific data, 2024. Vol. 11. № 1. P. 20–29.
6. Hu J., Shen L., Sun G. Squeeze-and-excitation networks // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. –2018. –С. 7132–7141 7.
7. Oktay O. et al. Attention u-net: Learning where to look for the pancreas // arXivpreprint arXiv:1804.03999. –2018.

УДК 615-47

Повышение точности непрерывного мониторинга глюкозы методом взаимокоррекции данных сенсора и цифрового двойника на основе фильтра Калмана

Чупраков Д. А., Пожар К. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Предложен метод повышения точности непрерывного мониторинга глюкозы в системах персонализированной автоматизированной инсулинотерапии на основе фильтра Калмана. Метод объединяет данные с сенсора обратной связи и прогнозы цифрового двойника пациента, что позволяет нивелировать выбросы и учитывать физиологическую изменчивость.
Ключевые слова: автоматизированная инсулинотерапия; непрерывный мониторинг глюкозы; цифровой двойник; фильтр Калмана; персонализированная медицина.

Improving the Accuracy of Continuous Glucose Monitoring by Mutual Correction of Sensor Data and Digital Twin Based on the Kalman Filter

Chuprakov D. A., Pozhar K. V.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

A method for improving the accuracy of continuous glucose monitoring in personalized automated insulin therapy systems based on the Kalman filter is proposed. The method combines data from the feedback sensor and predictions of the patient's digital twin, which makes it possible to suppress outliers and account for physiological variability.
Keywords: automated insulin therapy; continuous glucose monitoring; digital twin; Kalman filter; personalized medicine

Автоматизированная инсулинотерапия является востребованным направлением развития биомедицинской электроники, поскольку направлена на повышение качества компенсации сахарного диабета 1-го типа [1]. Ключевым элементом таких систем являются устройства непрерывного мониторинга глюкозы, которые обеспечивают обратную связь. Однако существующие сенсоры представляют собой электронные устройства с присущей им инструментальной погрешностью и физиологическим запаздыванием сигнала [2]. Эти ограничения негативно сказываются на качестве терапии, поскольку управление базальным инсулином на основе зашумленных и запаздывающих данных с датчика обратной связи может приводить к неадекватным дозам и развитию критических эпизодов гипер- или гипогликемии.

Современные возможности математического моделирования метаболических процессов позволяют создавать цифровых двойников пациентов — прогнозирующие модели углеводного обмена, калибруемые на основе индивидуальных физиологических данных и клинических наблюдений конкретного человека. Такой цифровой двойник позволят прогнозировать динамику глюкозы с учетом

индивидуальных параметров пациента, что открывает возможность формирования опережающей оценки уровня глюкозы. Однако выраженная временная нестабильность внутренних физиологических процессов и реакций организма на внешние воздействия ограничивает способность предварительно откалиброванной модели поддерживать высокую точность прогноза в течении долгого периода времени.

В работе предлагается подход, направленный на повышение точности данных, получаемых с датчиков обратной связи, за счет применения алгоритма взаимокоррекции данных, поступающих от непрерывного монитора глюкозы и результатов предиктивного моделирования на основе цифрового двойника. В качестве алгоритмической основы используется фильтр Калмана — фильтр, который объединяет зашумленные измерения с прогнозом модели для получения оптимальной оценки уровня глюкозы в крови в реальном времени [3]. Новизна предлагаемого подхода заключается в совместной обработке данных, поступающих от физического сенсора и виртуального цифрового двойника, что позволяет нивелировать влияние различных факторов, искажающих данные.

Реализация алгоритма взаимокоррекции построена на дискретном фильтре Калмана, который каждые пять минут получает измерение непрерывного монитора глюкозы и одновременно опрашивает цифровой двойник для получения прогноза текущей гликемии. На основании прогнозируемого и измеренного значений, а также анализа динамики с учетом внешних факторов и истории состояний, рекуррентно вычисляется коэффициент доверия к каждому информационному каналу. При резком, физиологически нехарактерном скачке показаний сенсора доминирующий вес на текущей итерации отдается прогнозу цифрового двойника, иначе большее доверие получают данные мониторинга. Таким образом, результатом работы алгоритма является текущий уровень глюкозы с учетом ее физиологических особенностей. В отличие от традиционных методов, не устраняющих систематическую задержку и не адаптирующихся к физиологическим особенностям сигнала, предложенный подход работает в реальном времени одновременно подавляя шум сенсора и компенсируя искажения цифрового двойника. Валидация предложенного алгоритма на 10 виртуальных пациентах симулятора UVA/Padova T1DMS показала, что применение предложенного алгоритма позволило снизить погрешность данных, получаемых с непрерывного монитора глюкозы, с приблизительно 16 мг/дл до 8 мг/дл.

Таким образом, предложенный подход к взаимокоррекции данных непрерывного монитора глюкозы и цифрового двойника позволяет снизить негативное влияние погрешности непрерывного монитора глюкозы на эффективность систем персонализированной автоматизированной инсулинотерапии. Дальнейшие исследования направлены на интеграцию разработанного алгоритма в аппаратную платформу замкнутого контура управления системой автоматизированной инсулинотерапии.

Литература

1. Phillip M. et al. Consensus recommendations for the use of automated insulin delivery technologies in clinical practice // Endocrine reviews, 2023. Vol. 44. № 2. P. 254–280.
2. Bequette B. W. Continuous glucose monitoring: real-time algorithms for calibration, filtering, and alarms // Journal of diabetes science and technology, 2010. Vol. 4. № 2. P. 404–418.
3. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems, 1960.

УДК 617.57-77.

Разработка гибридного тактильного модуля для очувствления бионических протезов верхних конечностей

Бумагин П. В.[1,2], Гончарова А. В.[1,3,4]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
pbumagin@niime.ru, agoncharova@niime.ru
[2] Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1
[3]Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[4] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Разработана концепция гибридного тактильного модуля для бионических протезов. Модуль объединяет пьезоэлектрический датчик, МЭМС-барометр и акселерометр. При помощи математического моделирования обоснована необходимость минимизации толщины эластомера для точного распознавания высокочастотных вибраций.
Ключевые слова: бионический протез; тактильный модуль; пьезоэлектрический эффект; МЭМС; математическое моделирование.

Development of a hybrid tactile module for sensory feedback in bionic upper limb prostheses

Bumagin P. V.[1,2], Goncharova A. V.[1,3,4]
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
pbumagin@niime.ru, agoncharova@niime.ru
[2] Bauman Moscow State Technical University
5 2nd Baumanskaya St., Bldg. 1, Moscow, 105005, Russia
[3] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[4] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

A concept of a hybrid tactile module for bionic prostheses has been developed. The module combines a piezoelectric sensor, a MEMS barometer, and an accelerometer. Using mathematical modeling, the necessity of minimizing the elastomer thickness for the accurate recognition of high-frequency vibrations has been justified.
Keywords: bionic prosthesis; tactile module; piezoelectric effect; MEMS; mathematical modeling.

Одной из фундаментальных проблем бионического протезирования является отсутствие полноценной тактильной обратной связи. Управление протезом верхней конечности исключительно на основе визуального контроля повышает когнитивную нагрузку на пользователя. Для реализации замкнутого контура управления система должна в реальном времени регистрировать статическое усилие прижима, вибрации от трения о текстуру объекта и низкочастотные импульсы при начале проскальзывания [1].

Анализ существующих систем выявил ряд ограничений мономодальных подходов. В пальцах бионических протезов широко применяются стандартные МЭМС-компоненты. Барометры используются для оценки статического давления, а акселерометры надежно регистрируют единичные касания и удары [2]. Однако из-за ограничений полосы пропускания они не позволяют распознавать микротекстуру поверхностей. Модули на основе гибких пьезоэлектрических полимеров, таких как поливинилиденфторид (PVDF), обладают чувствительностью к высокочастотным колебаниям [3], но физически не способны регистрировать статику.

Для преодоления этих ограничений предложена архитектура гибридного модуля, реализующего биомиметический принцип пространственного разделения чувствительных элементов:

- Поверхностный канал: пьезоэлектрическая пленка (PVDF), размещенная в непосредственной близости к зоне контакта под слоем эластомера. Выполняет функцию быстро адаптирующихся механорецепторов для распознавания текстуры материала.
- Глубинный канал: цифровые МЭМС-акселерометр и МЭМС-барометр, интегрированные во внутренний жесткий каркас фаланги. Барометр контролирует силу захвата, а акселерометр распознает вибрации, возникающие при единичных ударах и начале выскальзывания объекта из пальцев протеза.

Для обоснования необходимости уменьшения толщины эластомера h во избежание демпфирования высокочастотных сигналов, проведено математическое моделирование в среде MATLAB. Вязкоупругие свойства эластомера описаны реологической макроскопической моделью Кельвина — Фойгта (модуль Юнга $E = 1$ МПа, эквивалентная вязкость $\mu = 2{,}5$ Па·с, эффективная масса датчика $m = 5$ г). Построены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) коэффициента передачи механических колебаний $|x_{вых}/x_{вх}|$ (рис. 1).

Эксперимент показывает, что увеличение толщины защитного слоя до 2,0 мм приводит к значительному демпфированию сиигнала: на частоте 5 кГц коэффициент передачи уменьшается практически вдвое, что делает затруднительным выделение полезного сигнала на фоне шумов. Уменьшение толщины эластомера над пьезоэлементом до 0,2 мм расширяет эффективную полосу пропускания системы до 10–20 кГц, давая возможность более достоверной регистрации микровибраций без существенных амплитудных искажений.

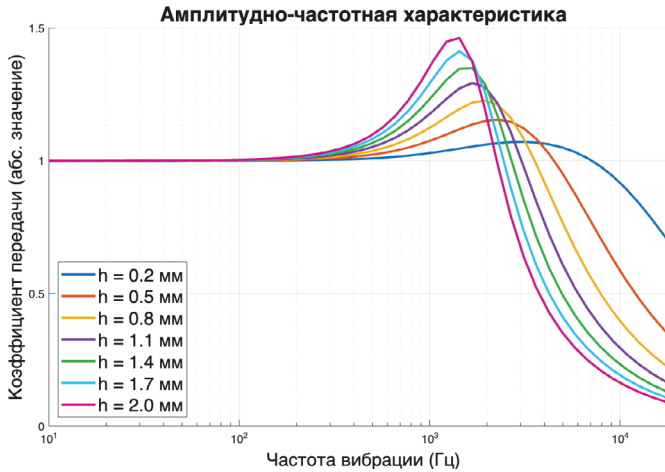


Рис. 1. Семейство АЧХ для различных значений толщины силиконового слоя

Выводы

Предложенная концепция гибридного тактильного модуля решает проблему комплексного очувствления бионических протезов, преодолевая физические ограничения мономодальных сенсоров. Проведенное математическое моделирование доказало, что для эффективной регистрации микротекстуры высокочастотным пьезоэлектрическим сенсором (в полосе до 10–20 кГц) толщина защитного эластомера должна составлять не более 0,2 мм, тогда как контроль статического давления и регистрацию единичных прикосновений и ударов целесообразно осуществлять интегрированными в каркас модуля МЭМС-компонентами. Совместное использование предложенной аппаратной архитектуры и алгоритмов машинного обучения повысит надежность удержания объектов, а также сформирует технологическую базу для передачи детализированной тактильной обратной связи в периферическую нервную систему пациента.

Литература

1. Sankar S., Cheng W. Y., Zhang J., Slepyan A., Iskarous M. M., Greene R. J., DeBrabander R., Chen J., Gupta A., Thakor N. V. A natural biomimetic prosthetic hand with neuromorphic tactile sensing for precise and compliant grasping // Science Advances, 2025. Vol. 11. № 10.
2. Weiner P., Neef C., Shibata Y., Nakamura Y., Asfour T. An Embedded, Multi-Modal Sensor System for Scalable Robotic and Prosthetic Hand Fingers // Sensors, 2020. Vol. 20. № 1. P. 101.
3. Qin L., Zhang Y. Roughness discrimination with bio-inspired tactile sensor manually sliding on polished surfaces // Sensors and Actuators A: Physical, 2018. Vol. 279. P. 433–441.

УДК 538.935

Неинвазивные сенсорные структуры на основе графеновых материалов для устройств «лаборатория на коже»

Иванов А. И.[1], Бузмакова А. А.[1], Пулик А. Д.[1,2], Антонова И. В.[1,2]
[1] Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр-т Лаврентьева, 13
aiivanov@isp.nsc.ru
[2] Новосибирский государственный технический университет
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20

Разработаны сенсоры, состоящие из тонких (~10 нм) слоев композита на основе графена и полимера PEDOT:PSS, и тестируются в качестве неинвазивных датчиков для мониторинга уровня влажности кожи, глюкозы в поте и реакции нервной системы человека в режиме непрерывного считывания и передачи на смартфон.
Ключевые слова: графен; PEDOT:PSS; 2D печать; неинвазивные сенсоры; влажность; глюкоза; стресс нервной системы.

Non-invasive graphene-based sensor structures for a «lab on skin» devices

Ivanov A. I.[1], Buzmakova A. A.[1], Pulik A. D.[1,2], Antonova I. V.[1,2]
[1] A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS
13 Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia
aiivanov@isp.nsc.ru
[2] Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia

Sensors based on thin (~10 nm) layers of a graphene-based composite and the PEDOT:PSS polymer were developed and tested as noninvasive sensors for monitoring skin humidity, sweat glucose levels and nervous system responses. Measurement data was continuously transmitted to a smartphone.
Keywords: graphene; PEDOT:PSS; 2D printing; non-invasive sensors; skin humidity; glucose in sweat; nervous system stress.

В последние десятилетия 2D-материалы привлекают научный и практический интерес благодаря их значительному потенциалу в создании новых устройств гибкой и носимой электроники. Современная тенденция заключается в разработке неинвазивных биосенсоров (сенсорные чипы «лаборатория на коже»), работа которых основана на использовании жидкости, отличной от крови. Особое внимание привлекают сенсоры, использующие пот в качестве анализируемой жидкости, которая является наиболее легкодоступной и позволяет своевременно определять признаки нарушения работы организма.

В работе представлены свойства сенсорных структур на основе графеновых частиц толщиной от одного до нескольких монослоев с латеральным размером до 150 нм и полимера PEDOT:PSS, чувствительных к влажности кожи, уровню глюкозы и реакциям нервной системы (гормонам в поте). Показано, что для

достижения максимального отклика сенсора необходимо формирование разветвленной поверхности за счет вертикально ориентированного расположения частиц графена, электрически связанных за счет добавления небольшого количества проводящего полимера PEDOT:PSS.

Структуры изготовлены с использованием 2D печатных технологий. Толщина напечатанного слоя сенсора должна быть минимальна, в нашем случае 2–3 печатных слоя (около 8–10 нм). Важным параметром сенсоров является их площадь: при увеличении демонстрируют смещение приоритета в сторону гормонов [1]. Отклик на гормоны составляет минуты, а изменение уровня глюкозы происходит за десятки минут.

Найдены необходимые структурные свойства композита, которые позволили разработать датчики, сочетающие в себе сверхвысокую чувствительность с простотой, возможностью многоразового использования и низкой стоимостью изготовления, что является их существенным преимуществом. Найдены условия (тип частиц графена и дизайн чипов) создания сенсоров для отдельного тестирования глюкозы и реакций нервной системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 25-19-20035, 30-2025-000863).

Литература

1. Wearable Resistive Graphene-Based Sensor for Human Behavioral and Mental Monitoring /Antonova I.V., Ivanov A.I., Buzmakova A.A., Cherkasova O.P., Shavelkina M.B., N.A. Nebogatikova // J. Mater. Chem. P. 2025. V.13, p. 14586.

УДК 004.048 + 616-073.96

Сравнение и улучшение нейросетевых моделей для анализа пульсовой волны человека на основе видеоплетизмографии и применение их в режиме реального времени

Алябушев П. А.[1,3], Гончарова А. В.[1,2,3]
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В работе проведено обучение и сравнение качества четырех нейросетевых моделей (TS-CAN, DeepPhys, PhysNet, PhysFormer) для регистрации пульсовой волны человека методом видеоплетизмографии. Основное внимание уделено устойчивости моделей к помехам, вызванным движениями головы, мимикой и изменениями освещения. Для повышения качества предложен двухступенчатый механизм пространственно-временного и временного внимания, а также доработанная функция потерь, штрафующая за ошибки в форме сигнала и при детекции R-пиков. Показано, что модифицированная модель TS-CAN наиболее пригодна для работы в реальном времени. На датасете UBFC-Phys средняя абсолютная ошибка (MAE) модели TS -CAN составила 4,9 уд/мин.
Ключевые слова: дистанционная видеоплетизмография; определение пульса; ВСР; механизм пространственно-временного внимания.

Comparison and improvement of neural network models for analyzing human pulse wave based on video plethysmography and their application in real time

Alyabushev P. A.[1,3], Goncharova A. V.[1,2,3]
[1] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] *National Research University of Electronic Technology (MIET)*
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[3] *Molecular Electronics Research Institute JSC*
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

The paper provides training and quality comparison of four neural network models (TS-CAN, DeepPhys, PhysNet, PhysFormer) for recording human pulse waves using videoplethysmography. The main focus is on the models' resistance to interference caused by head movements, facial expressions, and lighting changes. To improve the quality, a two-stage mechanism of spatiotemporal and temporal attention is proposed, as well as a modified loss function that penalizes errors in the waveform and in the detection of R-peaks. It is shown that the modified TS-CAN model is most suitable for

real-time operation. On the UBFC-Phys dataset, the mean absolute error (MAE) of the TS-SAN model was 4.9 beats/min.

Keywords: remote photoplethysmography (rPPG); pulse determination; HRV; mechanism of space-time attention (STA).

Видеоплетизмография — неинвазивный метод регистрации пульсовой волны, применяемый для мониторинга частоты сердечных сокращений, сатурации и расчета вариабельности сердечного ритма (ВСР). В основе данного подхода лежит наблюдение за периодическим изменением цвета и яркости лица, которое объясняется разным кровенаполнением сосудов. Широкому внедрению этой технологии в системы телемедицины и фитнес-трекинга препятствует неустойчивость существующих архитектур к разнообразным помехам и движениям человека. Ключевыми источниками искажений сигнала при видеоплетизмографии выступают движения головы, изменения мимики и колебания интенсивности внешнего освещения. Данная работа нацелена на подбор архитектуры, показывающей лучше качество чем существующие модели и разработку сквозного пайплайна для работы модели в режиме реального времени.

Для обучения и тестирования нейронных сетей (TS-CAN, DeepPhys, PhysNet, PhysFormer) в работе использованы общедоступные датасеты, видео в которых имеют значительные артефакты (UBFC — RPPG, UBFC-Phys).

Для выбора наиболее лучшей области лица (после детекции моделью YOLO5Face) для извлечения полезного сигнала использовать двухступенчатый механизм внимания, состоящий из пространственно-временного и временного внимания. Первая часть генерирует карту значимости, на которой отмечают области кадра с наибольшим значением отношения мощности полезного сигнала к мощности шума. Модуль временного внимания позволит игнорировать сильно зашумленные кадры в последовательности и снижать влияние видео отрезков с резкими движениями.

Также предлагается внедрить доработанную функцию потерь, которая штрафует модель за отличия формы предсказанного сигнала от истинного, а также неверную детекцию R-пиков. Такая функция потерь позволит уменьшить переобучение на типичных для набора данных значениях и снизит ошибки при расчете ВСР, поскольку обеспечит корректное извлечение длительности временных интервалов между соседними R-пиками.

Модель TS-CAN оказалась наилучшим образом подходящей для работы в режиме реального времени и после модернизации функции потерь на датасете UBFC-PHYS средняя абсолютная ошибка оказалась 4,9 уд/мин.

Литература

1. Федорович А.А., Королев, А. И. и др. Новые тренды развития направления по неинвазивному исследованию микроциркуляции в коже человека. Описательный обзор // Кардиоваскулярная терапия и профилактика, 2025. — Т. 24. — № 6. — С. 95–105.
2. Kurihara K., Sugimura D. et al. Non-contact heart rate estimation via adaptive rgb/nir signal fusion // IEEE Transactions on Image Processing, 2021. Vol. 30. P. 6528–6543.
3. Bobbia S., Macwan R. et al. Unsupervised skin tissue segmentation for remote photoplethysmography // Pattern Recognition Letters, 2019. Vol. 124. P. 82–90.

4. Rita Meziati, Yannick Benezeth et al. “UBFC-Phys”, IEEE Dataport, March 3, 2021, doi:10.21227/5da0-7344
5. Wang W., Den Brinker A. C. et al. Algorithmic principles of remote PPG // IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2016. Vol. 64. № 7. P. 1479–1491.
6. Gideon J., Stent S. The way to my heart is through contrastive learning: Remote photoplethysmography from unlabelled video // Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, 2021. P. 3995–4004.
7. Hu M., Guo D. et al. rPPG-based heart rate estimation using spatial-temporal attention network // IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2021. Vol. 14. № 4. P. 1630–1641.
8. Lu H., Han H. et al. Dual-gan: Joint bvp and noise modeling for remote physiological measurement // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 2021. P. 12404–12413.
9. Liu X., Fromm J. et al. Multi-task temporal shift attention networks for on-device contactless vitals measurement // Advances in Neural Information Processing Systems, 2020. Vol. 33. P. 19400–19411.

УДК 543.9:620.3

Сравнительный анализ функционализации углеродных нанотрубок n-бутил- и аминофенилбороновой кислотой в контексте создания рецепторного слоя для HbA1c-сенсора.

Едельбекова П. А.[1,2], к. т. н. Шаман Ю. П.[1,3], д. т. н. Герасименко А. Ю.[1,2], д. ф.-м. н. Павлов А. А.[1]

[1] Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук
119334, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А
edelbekova.p@inme-ras.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] НПК «Технологический центр»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7, комн. 7237

В работе проведена сравнительная оценка двух типов чувствительных слоев на основе одностенных углеродных нанотрубок, функционализированных производными бороновой кислоты (n-BBA и APBA), для создания электрохимического биосенсора гликированного гемоглобина. Продемонстрировано, что комплекс ОУНТ-APBA обладает преимуществом за счет сохранения реакционноспособности обеих гидроксильных групп, что критично для селективного связывания HbA1c.

Ключевые слова: Углеродные нанотрубки; бороновая кислота; функционализация; иммобилизация; биосенсорные материалы.

Functionalization of Carbon Nanotubes with n-Butyl- and (2-Aminophenyl)boronic Acids: A Comparative Assessment for HbA1c Biosensing Receptor Layer

Edelbekova P. A.[1,2], Ph.D Shaman Yu. P.[1,3], Ph.D Gerasimenko A. Yu.[1,2], Ph.D Pavlov A. A.[1]

[1] Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences
32A Leninsky Ave., Moscow, 119334, Russia
edelbekova.p@inme-ras.ru
[2] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[3] Scientific-Manufacturing Complex "Technological Center»
room 7237, 1 Shokin Sq., Bldg. 7, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

A comparative evaluation of two types of sensing layers based on single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) functionalized with boronic acid derivatives (n-BBA and APBA) was carried out for the development of an electrochemical biosensor for glycated hemoglobin (HbA1c). The SWCNT-APBA composite was demonstrated to be advantageous due to the retained reactivity of both hydroxyl groups, which is critical for the selective binding of HbA1c.

Keywords: Carbon nanotubes; boronic acid; functionalization; immobilization; biosensor materials.

Гликированный гемоглобин (HbA1c) является одним из ключевых маркеров долгосрочного контроля диабета, однако существующие методы его определения (ВЭЖХ, иммуноферментный анализ) требуют дорогостоящего оборудования и трудозатратны, что ограничивает их применение в экспресс-диагностике [1]. Перспективным направлением развития биомедицинской электроники является создание электрохимического сенсора, отличающегося высокой чувствительностью к HbA1c, скоростью анализа и низкой стоимостью. Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ), модифицированные функциональными группами бороновой кислоты, являются эффективным материалом для создания биорецепторного слоя сенсора благодаря высокой проводимости, механической стабильности и чувствительности соединения к цис-диольной группе гликированного гемоглобина.

В ходе серии экспериментов были изготовлены два варианта материала чувствительного слоя — ОУНТ, функционализированные n-бутилбороновой кислотой (ОУНТ-n-ВВА) и ОУНТ, функционализированные (2-аминофенил) бороновой кислотой (ОУНТ-АРВА). Активацию карбоксильных групп предварительно окисленных ОУНТ проводили с использованием EDC/NHS (1-Этил-3-(3-диметиламинопропил)карбодиимид/N-Гидроксисукцинимид) (объемное соотношение 1:2 растворов EDC/NHS концентрацией 50 мг/мл и 10 мг/мл соответственно) для последующей ковалентной иммобилизации производных бороновой кислоты. В качестве стабилизатора суспензии использовались поверхностно-активные вещества (ПАВ) — дезоксихолата натрия (DOC) и полисорбат-80 (TWEEN-80) (массовая доля ПАВ — 0,1%). Диспергирование и очистку полученных комплексов от непрореагировавших реагентов и агрегированных жгутов ОУНТ осуществляли методами ультразвуковой обработки, центрифугирования и многократной промывки.

Полученные материалы были исследованы методами спектроскопии УФ-видимого диапазона, ИК-Фурье спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Проведено сравнение структурных характеристик комплексов ОУНТ-n-ВВА и ОУНТ-АРВА в качестве чувствительного слоя биосенсора. Установлено, что комплекс ОУНТ-АРВА является более перспективным материалом с точки зрения биосенсорного приложения благодаря обеспечению интактности обеих гидроксильных групп бороновой кислоты в процессе функционализации — иммобилизация бороновой кислоты через аминогруппу обеспечивает максимальную доступность центров связывания HbA1c.

Литература

1. Sharma P. et al. Analytical techniques for the detection of glycated haemoglobin underlining the sensors // Int. J. Biol. Macromol. Elsevier B.V., 2020. Vol. 155. P. 685–696.

УДК 538.955

Подход к проектированию сверхчувствительных спинтронных биосенсоров для миомагнитографии, работающих в неэкранированной среде

Лобкова М. Д.[1], к. т. н., Скирдков П. Н.[1,2], к. ф.-м. н., Звездин К. А.[1], д. ф.-м. н.
[1] ООО «Новые спинтронные технологии»
2121205, г. Москва, Инновационный центр Сколково, Большой б-р, 30, стр. 1
m.shkanakina@rqc.ru
[2] Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

В работе проведено аналитическое исследование электрических характеристик магнитного туннельного перехода со свободным слоем, намагниченность которого слабо закреплена антиферромагнетиком. Представлен метод линеаризации его выходной электрической характеристики и выполнена разработка магнитного концентратора для повышения чувствительности миосенсора, в следствие проведена оценка его чувствительности и шумовых характеристик. Для работы миосенсора в неэкранированной среде разработана градиентометрическая архитектура и представлены алгоритмы фильтрации шума. С использованием разработанного подхода проведена численная оценка характеристик миосенсора, предназначенного для умного протезирования.
Ключевые слова: Спинтроника; магнитный туннельный переход; МТП; биосенсор; миомагнитография; ММГ; сверхчувствительный сенсор.

An approach to designing ultrasensitive spintronic biosensors for myomagnetography operating in an unshielded environment

Lobkova M. D.[1], Skirdkov P. N.[1,2], Zvezdin K. A.[1]
[1] "New Spintronic Technologies" LLC
30/1 Bolshoi Blvd., Innovation Centre Skolkovo, Moscow, 121205, Russia
m.shkanakina@rqc.ru
[2] Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilova St., Moscow, 119991, Russia

This work presents an analytical study of the electrical characteristics of a free-layer magnetic tunnel junction whose magnetization is weakly constrained by an antiferromagnet. A method for linearizing its output electrical characteristic is presented, and a magnetic concentrator is developed to increase the myosensor's sensitivity. Subsequently, its sensitivity and noise characteristics are assessed. A gradiometric architecture is developed for the myosensor's operation in an unshielded environment, and noise filtering algorithms are presented. Using the developed approach, a numerical evaluation of the myosensor's characteristics is performed for smart prosthetics.
Keywords: Spintronics; magnetic tunnel junction; MTJ; biosensor; magnetomyography; MMG; ultra-sensitive sensor.

В настоящее время актуальным является разработка сверхчувствительных спинтронных биосенсоров для регистрации слабых магнитных полей, индуцированных

мышечной активностью, с целью их интеграции в системы умного протезирования. Традиционные методы магнитометрии (СКВИДы, оптические магнитометры, NV-центры в алмазе) обладают высокой чувствительностью, однако требуют криогенного охлаждения, безмагнитных комнат и сложных условий эксплуатации, что исключает их использование в носимых бионических протезах [1]. Перспективной альтернативой выступают сенсоры на базе магнитных туннельных переходов, в основе которых лежит эффект туннельного магнитосопротивления (TMR), такие сенсоры работают при комнатной температуре, совместимы с КМОП-технологией и допускают миниатюризацию [2]. В данной работе представлен подход к проектированию компактного мио-сенсора, способного регистрировать миомагнитные сигналы в неэкранированной среде с использованием современных схемотехнических методик и алгоритмов обработки сигнала. Отдельно будет разработан метод по линеаризации электрической характеристики МТП, выполнена разработка магнитного концентратора для повышения чувствительности миосенсора, в следствие проведена оценка его чувствительности и шумовых характеристик. Для работы миосенсора в неэкранированной среде и подавления поля Земли разработана градиентометрическая архитектура на основе массивов МТП и представлен адаптивный алгоритм фильтрации шума TCLMS, снижающий относительную ошибку измерений до 0,027 % [3]. С использованием разработанного подхода проведена численная оценка характеристик миосенсора, предназначенного для умного протезирования.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Грант № 25-12-00302).

Литература

1. Thermal analysis of wearable OPM-MEG array system for auditory evoked experiments / Pang M. et al. // IEEE Sensors Journal, 2022. Vol. 22. № 5. P. 4514–4523.
2. Spintronic platforms for biomedical applications / Freitas P. P. et al. // Lab on a Chip, 2012. Vol. 12. № 3. P. 546–557.
3. Research on suppression of external magnetic field interference of tunnel magnetoresistive sensor based on versoria variable step improved adaptive filtering method / Yu J. et al. // Energy Reports, 2021. Vol. 7. P. 300–311.

УДК 602.6

Разработка чувствительных биосенсоров на основе плазмонных наноструктур для регистрации оптических сигналов биомолекул

Шайхтдинова А. Р., Лизунова А. А., Жуков С. С., Жукова Е. С., Горшунов Б. П., Охрименко И. С., Долгов В. А., Мусаев А. Г., Костина Д. Е., Санатулина А. Ф., Иванов В. В.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследованы процессы иммобилизации, а также поглощение и фотолюминесценция белков и аминокислот на плазмонных наноструктурах на основе наночастиц серебра в зависимости от концентрации, размера, а также от количества слоев полимера. Разработана воспроизводимая методика нанесения бычьего сывороточного альбумина (BSA) на плазмонные структуры. Показано, что для иммуноглобулина (IgG) с концентрацией 0,5 мг/мл в фосфатно-цитратном буфере pH 4,4, нанесение слоя полилизина (Pll) с наночастицами серебра увеличивает интенсивность флуоресценции в 2,2 раза и сопровождается смещением максимума излучения с 326 до 334 нм.
Ключевые слова: Плазмонные структуры; биосенсоры; флуоресценция; BSA; IgG.

Development of sensitive biosensors based on plasmonic nanostructures for the detection of optical signals of biomolecules

Shaikhtdinova A. R., Lizunova A. A., Zhukov S. S., Zhokova E. S., Gorshunov B. P., Ochrimenko I. S., Dolgov V. A., Musaev A. G., Kostina D. E., Sanatulina A. F., Ivanov V. V.
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

Have been investigated immobilization processes as well as absorption and photoluminescence of proteins and amino acids on plasmonic nanostructures based on silver nanoparticles depending on concentration, size, and number of polymer layers. A reproducible protocol for the deposition of bovine serum albumin (BSA) onto plasmonic structures has been developed. It has been shown that for immunoglobulin G (IgG) at a concentration of 0.5 mg/mL in phosphate-citrate buffer pH 4.4, the deposition of a polylysine (Pll) layer with silver nanoparticles increases the fluorescence intensity by a factor of 2.2 and is accompanied by a shift of the emission maximum from 326 to 334 nm.
Keywords: plasmonic structures; biosensors; fluorescence; BSA; IgG.

Одним из перспективных направлений биомедицинской электроники является использование плазмонных наноструктур в качестве одного из слоев биосенсорных систем [1]. Собственная флуоресценция белков и аминокислот — чувствительный индикатор конформационного состояния и взаимодействия с поверхностью [2].

В работе изучено влияние концентрации, денатурации, способа нанесения белка, pH раствора, состава буфера, стадии промывки водой в пробоподготовке на изменение фотолюминесценции, исследованы процессы формирования биосенсорных поверхностей путем нанесения белков на подложки с плазмонными структурами из наночастиц серебра с дополнительными слоями полимера для регулирования расстояния между биообъектом и металлической частицей. Наночастицы серебра со средним размером 25 ± 9 нм и нанопроволоки серебра диаметром 84 нм наносились на подложку методом спин-коатинга на установке EZ4 Spin Coater, Swan technology. Спектры флуоресценции получены на флуориметре Cary Eclipse 600. Разработаны и оптимизированы методики иммобилизации BSA и IgG (рис. 1).

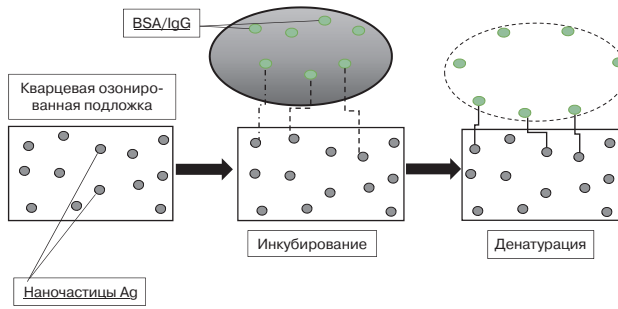


Рис. 1. Схематическое изображение метода иммобилизации белка на поверхности плазмонной структуры

Экспериментально показано, что параметры пробоподготовки определяют интенсивность и спектральные характеристики флуоресценции белков. При концентрациях IgG и BSA 0,75; 1; 2,5; 5 и 10 мг/мл белки агрегируют на кварцевой подложке, при концентрации 0,5 мг/мл белок распределяется равномерно по поверхности. Определено, что в ацетатно-ускусном буфере интенсивность фотолюминицсенции в 1,3 раза ниже, чем в фосфатно-цитратном буфере, при pH от 4,4 до 5,6. Разработан наиболее оптимальный способ подготовки и нанесения — озонирование подложки (15 минут), инкубирование в растворе белка с концентрацией 0,5 мг/мл в течении 2 часов, денатурация (15 минут, 80 °C).

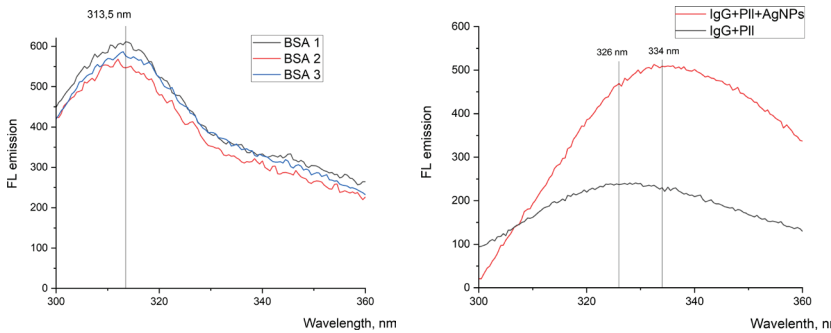
Для BSA 0,5 мг/мл в фосфатно-цитратном буфере pH 5,1 максимум флуоресценции в трех повторных измерениях находится в области 313,5 нм (рис. 2*а*), а разброс максимальной интенсивности составляет около 8–10 %, что подтверждает воспроизводимость выбранной схемы иммобилизации.

Обнаружено влияние формы и структуры наночастиц, а также количества слоев полимера между белком и наночастицами серебра на интенсивность фотолюминисценции. Сравнивались наночастицы серебра (AgNPs) и серебряные нанопроволоки (AgNWs), нанесенные на слой белка (IgG с концентрацией 0,5 мг/мл при pH 4,4) на кварцевой поверхности, покрытый полимером (Pll был нанесен методом спин-коатинга). Выявлено, что структура с наночастицами серебра способствует повышению интенсивности сигнала фотолюминесценции в 2,2 раза и сдвигу максимума излучения с 326 до 334 нм (рис. 2*б*), структура с нанопроволоками серебра

вызывает тушение сигнала в 1,3 раза. Также, при увеличении слоев PII между наночастицами серебра и слоем белка до 15, 10 и 5 слоев, наблюдалось значительное тушение сигнала в 2,1; 1,4 и 1,2 раз соответственно.

Таким образом, предложен мультимодальный подход к регистрации биомолекулярных сигналов, объединяющий флуоресцентные и рамановские спектроскопии на плазмонной структуре, открывающий перспективы создания высокочувствительных, селективных и миниатюрных биомедицинских устройств.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00311-П, https://rscf.ru/project/22-19-00311.



а *б*

Рис. 2. Спектры флуоресценции исследуемых биологических объектов: повторяемость метода для иммобилизации бычьего сывороточного альбумина на поверхности кварцевой подложки (*а*); усиление интенсивности флуоресценции иммуноглобулина человека посредством нанесения на плазмонную структуру (покрытие — полимер и наночастицы серебра) (*б*)

Литература

1. Епанчинцева А. В. Взаимодействие олигонуклеотидов и сферических наночастиц золота в составе нековалентных ассоциатов // Дис. канд. хим. наук: 02.00.10.
2. Xu Q. et al. Fluorescent detection of emerging virus based on nanoparticles: From synthesis to application // TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2023. Vol. 161. P. 116999.

УДК 620.3

Формирование функциональных слоев нейроинтерфейсов на основе углеродных наноматериалов для создания имплантируемых электродов, стимулирующих нервные ткани

Мурашко Д. Т.[1], Ефремова К. Д.[1,2], Путря Б. М.[1], Еганова Е. М.[3], Герасименко А. Ю.[1,2]

[1] Институт биомедицинских систем,
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
skorden01@yandex.ru
[2] Институт бионических технологий и инжиниринга,
Первый МГМУ имени И. М. Сеченова
119991, г. Москва, Россия
[3] Институт наноматериалов микроэлектроники РАН
119334, г. Москва, Россия

Представлена методика формирования функциональных слоев нейроинтерфейсов на основе углеродных наноматериалов для создания имплантируемых электродов, стимулирующих нервные ткани. Формирование вертикальных массивов и внедрение углеродных наноматериалов привели увеличению удельной емкости.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; лазерное структурирования; медицинская сталь; емкость заряда.

Development of functional layers for neural interfaces based on carbon nanomaterials for the creation of implantable electrodes that stimulate nerve tissue

Murashko D. T.[1], Efremova K. D.1[2], Putrya B. M.[3], Eganova E. M.[3], Gerasimenko A. Yu.[1,2]

[1] Institute of Biomedical Systems,
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
skorden01@yandex.ru
[2]Institute of Bionic Technologies and Engineering,
I.M. Sechenov First Moscow State Medical University
Moscow, 119991, Russia
[3]Institute of Nanomaterials and Microelectronics RAS
Moscow, 119334, Russia

This paper presents a method for forming functional layers of neural interfaces based on carbon nanomaterials for the creation of implantable electrodes that stimulate nerve tissue. The formation of vertical arrays and the incorporation of carbon nanomaterials have led to an increase in specific capacitance.

Keywords: carbon nanotubes; laser structuring; medical-grade steel; charge capacity.

Одним из передовых направлений развития медицинских устройств является разработка имплантируемых нейростимуляторов, которые направлены на терапию моторных, неврологических и сенсорных патологий. Важную роль в разработке данных устройств играет интерфейс «электрод-ткань», задачей которого является беспрепятственная передача заряда в нервные клетки и ткани. Однако разработка нейроинтерфейсов затрудняется поиском баланса между высокой способностью передачи заряда в нервные ткани и механической и коррозионной стойкостью [1–3]. С целью качественного улучшения способности нейроинтерфейсов передавать заряд перспективным решением может являться сочетание метода лазерного структурирования и внедрения углеродных наноматериалов. Лазерное структурирование позволяет добиться развитой поверхности, которая в свою очередь увеличивает рабочую площадь поверхности нейроинтерфейса и увеличению емкости заряда [4–6]. Использование углеродных наноматериалов также позволяет добиться снижения импеданса поверхности, увеличению емкости заряда и улучшения качества регистрации нейронной активности [7, 8].

Для формирования функциональных слоев нейроинтерфейсов на основе углеродных наноматериалов для создания имплантируемых электродов, стимулирующих нервные ткани, были использованы стальные пластины марки 03Х17Н14М3 и одностенные углеродные нанотрубки. Формирование микроструктуры на поверхности пластины осуществлялось путем воздействия лазерного излучения при варьировании значений используемой мощности. Лазерное формирование осуществлялось при помощи импульсного иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 100 нс, скоростью движения лазерного луча 100 мм/с, частотой 25 кГц и мощностью энергии лазерного излучения в диапазоне 3,5–7,3 Вт. После формирования микроструктурной поверхности пластинка подвергалась очистке с целью удаления продуктов абляции. Процесс очистки включал ультразвуковую обработку пластин последовательно в ацетоне, этиловом спирте и дистиллированной воде, по 10 минут в каждом растворителе. Далее на сформированную микроструктурную поверхность послойно наносилась дисперсная среда с ОУНТ и ПАВ, соотношение 0,1/0,9 мг/мл. Для равномерного послойного формирования слоев из ОУНТ использовалась трехкоординатная система напыления с температурой подогрева поверхности пластин 70 °C. Количество напыляемых слоев составляло 200, что соответствует толщине ~500 ± 100 нм.

Результаты исследования морфологии поверхности показали формирование выраженной упорядоченной поверхности с выступающими вертикальными массивами и впадинами, в сравнении с плоски контрольным образцов. Высота и диаметр массивов варьировались в диапазоне 35–75 мкм и 42–66 мкм, соответственно, в зависимости от используемой мощности лазерного излучения. Наибольшая высота массивов в диапазоне 55–72 мкм была достигнута у образца, облученного с мощностью лазерного излучения 5,7 Вт. При помощи РЭМ было также подтверждено формирование равномерного распределения покрытия из ОУНТ по поверхности подложек. В то же время нанесение покрытия из ОУНТ привело к ожидаемому увеличению содержанию углерода на поверхности образцов с 14,46 ат.% до 50,23 ат.%. Исследование электропроводности показало, что воздействие лазерного излучения не оказывало влияния на удельную электропроводность, которая составляла 15,9 ± 0,4 См/см, что в свою очередь были сопоставимо по значениям с контрольного образца равным 16,0 ± 0,1 См/см. В ходе циклической

вольт-амперометрии было получено, что контрольный образец обладал площадной емкостью 0,79 ± 0,01 мкФ/см^2, в то время как наибольшая площадная емкость образцов, обработанных лазерным излучением и нанесенным слоем ОУНТ составляла 33,5 ± 1,6 мкФ/см^2 и 122,7 ± 5,9 мкФ/см^2, соответственно, при воздействии лазерного излучения с мощностями 4,6 Вт и 4 Вт. Полученные результаты формирования функциональных слоев на основе углеродных наноматериалов указывают на возросшую рабочую площадь поверхности и способность образцов накапливать и удерживать заряд, что позволяет достигать более активного взаимодействия «электрод-ткань» и возможности для большей передачи заряда в клетки и окружающие ткани при нейростимуляции.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Центр лазерных технологий в медицине» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-555 от 25 апреля 2024 года.

Литература

1. McGlynn E. et al. The future of neuroscience: flexible and wireless implantable neural electronics // Advanced Science, 2021. Vol. 8. № 10. P. 2002693.
2. Starr P.A. Totally implantable bidirectional neural prostheses: a flexible platform for innovation in neuromodulation // Frontiers in Neuroscience, 2018. Vol. 12. № 619.
3. Burton A. et al. Wireless, battery-free, and fully implantable electrical neurostimulation in freely moving rodents // Microsystems & nanoengineering, 2021. Vol. 7. № 1. P. 62.
4. Li L. et al. Electrochemical and biological performance of hierarchical platinum-iridium electrodes structured by a femtosecond laser // Microsystems & Nanoengineering, 2022. Vol. 8. № 1. P. 96.
5. Shuleiko D. et al. Hierarchical surface structures and Large-Area nanoscale gratings in As2S3 and As2Se3 films irradiated with femtosecond laser pulses // Materials, 2023. Vol. 16. № 13. P. 4524.
6. Amini S. et al. Femtosecond laser hierarchical surface restructuring for next generation neural interfacing electrodes and microelectrode arrays // Scientific Reports, 2022. Vol. 12. № 1. P. 13966.
7. Burblies N. et al. Coatings of different carbon nanotubes on platinum electrodes for neuronal devices: Preparation, cytocompatibility and interaction with spiral ganglion cells // PLoS One, 2016. Vol. 11. № 7. –P. e0158571.
8. Foremny K. et al. Carbon-nanotube-coated surface electrodes for cortical recordings in vivo // Nanomaterials, 2021. Vol. 11. № 4. P. 1029.

УДК 616-71/-78

Лазерная абляция и биополимерные покрытия как способы улучшения электрических свойств и биосовместимости имплантируемых металлических электродов

Круковский Н. С.[1], Савельев М. С.[1], Мурашко Д. Т.[1], к. т. н., Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1,
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
krukovskijn@inbox.ru

Предложен способ модификации имплантируемых металлических электродов для стимуляции спинного мозга при помощи создания реструктуризированной поверхности с использованием наносекундного лазерного излучения и дальнейшим нанесением биополимерного покрытия методом двухфотонной полимеризации.
Ключевые слова: лазерная абляция; стимуляция спинного мозга; биополимерные покрытия; двухфотонная полимеризация.

Laser ablation and biopolymer coatings as ways to improve the electrical properties and biocompatibility of implantable metallic electrodes

Krukovsky N. S.[1], Savelyev M. S.[1], Murashko D. T.[1], Gerasimenko A. Yu.[1,2]
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[2] I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University)
8/2 Trubetskaya St., Moscow, 119048, Russia
krukovskijn@inbox.ru

A method for modifying implantable metal electrodes for spinal cord stimulation by creating a restructured surface using nanosecond laser radiation and further applying a biopolymer coating by two-photon polymerization is proposed.
Keywords: laser ablation; spinal cord stimulation; biopolymer coatings; two-photon polymerization.

Современная медицина сейчас сталкивается с такой проблемой, как несоответствие биомеханических характеристик инвазивных стимулирующих электродов и мягких тканей тела человека, которые находятся в местах имплантации. Все это может приводить к воспалительным процессам и повреждениям электрода, что негативно скажется на качестве лечения [1].

Одним из возможных способов решения данной проблемы в контексте следования тренду на миниатюризацию имплантируемых изделий может являться модификация поверхности электрода импульсным лазерным излучением

с последующем нанесением биополимерного покрытия, состоящего из углеродных нанотрубок (УНТ) и белковых соединений.

Полученные в итоге микроструктуры были визуально исследованы при помощи оптической микроскопии. Механические же свойства полученного образца, а именно модуль юнга и глубина проникновения в материал измерительной головки, были изучены посредствам нанотвердомера.

В свою очередь влияние описанных выше способов модификации поверхности на электрические свойства было оценено несколькими способами. Поверхностное и удельное сопротивления материала были измерены четырехзондовой станцией. После этого были проведены исследование с использованием циклической вольт-амперометрии.

Результаты работы продемонстрировали, что абляция положительно сказывается на адгезии покрытия к подложке: в отличие от базового варианта, покрытие на образцах с модифицированной поверхностью не отслаивается после полимеризации.

Кроме того, данные циклической вольт-амперометрии подтвердили эффективность предложенных методов модификации: значения тока на обработанных образцах оказались существенно выше, чем на подложке без абляции, — от 1,2 до 20 мкА против 0,75 мкА.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-555 от 25 апреля 2024 года.

Литература

1. Дмитриев А. Б., Рзаев Д. А., Денисова Н. П. Постоянная эпидуральная стимуляция спинного мозга в лечении фармакорезистентной боли у пациентов с синдромом неудачной операции на позвоночнике // Нейрохирургия, 2018. — Т. 20. — № 2. — С. 43–49.

УДК 615.477.21-77-047.74:681.5:57

Разработка многоканальной системы регистрации электромиограммы для адаптивного протезирования верхних конечностей

Брилева С. С.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30
s.brilyova@yandex.ru

Представлены результаты разработки бионического протеза руки, управляемого сигналами поверхностной электромиографии. Спроектирован миограф с регулируемым коэффициентом усиления, приведены данные регистрации активности мышц. Описано проектирование и реализация печатного узла устройства.
Ключевые слова: электромиограф; поверхностная электромиография; электромиограмма; биологический сигнал; бионический протез верхней конечности.

Development of a Multichannel Electromyogram Recording System for Adaptive Upper-Limb Prosthetics

Brileva S. S.
National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia
s.brilyova@yandex.ru

This paper presents the results of the development of a bionic hand prosthesis controlled by surface electromyographic signals. A myograph with an adjustable gain coefficient has been designed, and muscle activity registration data are provided. The design and implementation of the device's printed circuit board assembly are described.
Keywords: electromyograph; surface electromyography; electromyogram; biological signal; bionic upper-limb prosthesis.

Введение

Электромиограф на основе системы фильтров и усилителей используется для снятия электромиограммы и подготовки ее к дальнейшей обработке. Преобразованный сигнал оцифровывается с помощью встроенного аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера для последующего управления механическими составляющими протеза. Была спроектирована структурная схема электромиографа, представленная на рис. 1, которая включает: инструментальный усилитель, схему компенсации синфазной помехи, полосовой фильтр с полосой пропускания от 20 до 500 Гц, режекторный фильтр с частотой подавления 50 Гц, неинвертирующий усилитель с подстроечным коэффициентом усиления, двухполупериодный выпрямитель и схему построения огибающей.

Следующим шагом спроектирована принципиальная схема устройства и проведен монтаж печатного узла. После чего с готовым электромиографом проведен следующий эксперимент: пара электродов была закреплена на мышце разгибателе

пальцев, пациент поочередно сжимал и разжимал кисть, при этом фиксировались осциллограммы в основных узлах электромиографа.

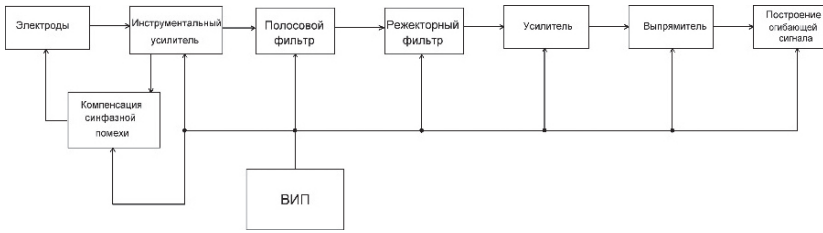


Рис. 1. Структурная схема электромиографа

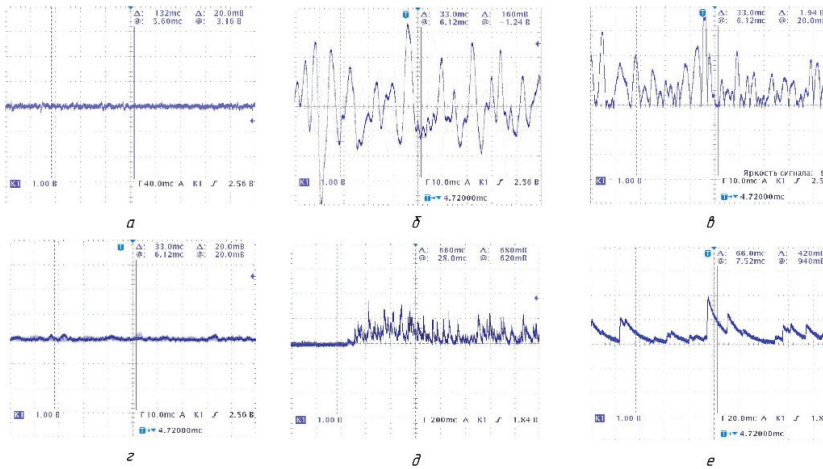


Рис. 2. Осциллограмма с выхода: инструментального усилителя (*а*), неинвертирующего усилителя (*б*), двухполупериодного выпрямителя при наличии активности мышц (*в*), двухполупериодного выпрямителя в состоянии покоя (*г*), схемы построения огибающей сигнала в момент начала активности (*д*), схемы построения огибающей сигнала с уменьшенной разверткой по времени (*е*)

Отметим, что благодаря схеме компенсации синфазной помехи сетевая наводка практически отсутствует, хотя сам сигнал остается слабовыраженным. После фильтрации амплитуда сигнала возрастает, а гармоники вне полосы пропускания подавляются. Выпрямленный сигнал становится однополярным. Огибающая сигнала позволяет четко распознавать начало и завершение мышечной активности. Полученный сигнал стабилен и пригоден для подачи на аналого-цифровой преобразователь микроконтроллера для последующего формирования управляющих команд для протеза.

Основным отличием разрабатываемого устройства от имеющихся на рынке протезных решений является программная калибровка коэффициента усиления

ЭМГ-сигнала, позволяющая подстраивать чувствительность под конкретного пользователя.

Для реализации данной идеи был использован цифровой потенциометр AD8400, работающий по интерфейсу SPI, установленный в схеме неинвертирующего усилителя.

Данный компонент интегрирован в схему каждого канала пятиканальной системы миографов для независимой настройки коэффициента усиления.

Заключение

В результате проделанной работы бы реализован электромиограф, работоспособность которого подтверждают проведенные эксперименты. Результаты легли в основу проектирования общая принципиальная схема устройства, на основании которой выполнена трассировка печатного узла устройств и проведены эксперименты.

Литература

1. Wang J., Tang L., Bronlund J. Surface EMG Signal Amplification and Filtering // International Journal of Computer Applications, 2013. Vol. 82. iss. 1. P. 15–22. https://doi.org/10.5120/14079-2073.
2. Искусство схемотехники В 3 т. / Хоровиц П., Хилл У. –4-е изд., перераб. и доп. –Мир –1993. — 413 с.
3. Фолкенберри Л. Применения операционных усилителей и линейных ИС: пер. с англ. / Л. Фолкенберри. // Мир, 1985. –572 с.

УДК 616.12-008.318-07 ББК 53.4.

Разработка сфигморитмографа для количественного определения аритмии

Кузнецова А. В., Проскурин С. Г., д. т. н.
Тамбовский государственный технический университет
392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106
irinka.dro@yandex.ru

Представлена разработка метода и аппаратно-программного прототипа сфигморитмографа для количественной оценки аритмии синусового узла. Реализован алгоритм расчета ЧСС, процента аритмии и pNN50/pNN40/pNN30 по пульсовому сигналу. Проведена валидация результатов в сравнении с ЭКГ.
Ключевые слова: сфигморитмография; вариабельность сердечного ритма; количественная оценка аритмии; pNN50.

Development of a sphygmorhythmograph for Quantitative Assessment of Arrhythmia

Kuznetsova A. V., Proskurin S. G., Sc.D
Tambov state technical university
106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russia
irinka.dro@yandex.ru

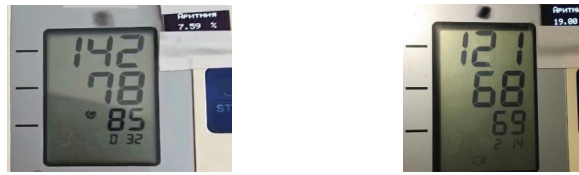
A method and hardware-software prototype of a sphygmorhythmograph for quantitative assessment of sinus node arrhythmia are presented. An algorithm for calculating HR, arrhythmia percentage, and pNN50/pNN40/pNN30 from the pulse signal is implemented. Results are validated against ECG.
Keywords: sphygmorhythmography; heart rate variability; quantitative arrhythmia assessment; pNN50.

Современные автоматические тонометры и носимые устройства регистрируют пульсовой сигнал, но ограничиваются бинарной индикацией аритмии («есть/нет»). Отсутствие количественной оценки выраженности аритмии синусового узла снижает диагностическую ценность таких приборов для скрининга и мониторинга терапии.

Целью настоящей работы является разработка метода и прототипа сфигморитмографа для количественного определения характеристик аритмии синусового узла на основе анализа последовательности пульсовых интервалов.

Текущее исследование основывается на анализе вариабельности сердечного ритма (ВСР) по стандартам Task Force [1]. Регистрация пульсового сигнала выполнена с помощью фотоплетизмографического датчика и осциллометрического сигнала автоматического тонометра. Разработано программное обеспечение на C++ (Arduino IDE) с алгоритмами: автоматическая калибровка порога (5 с), детекция пульсовых волн с временным ограничением 250 мс, расчет ЧСС, процента аритмии ($ПА = SDNN/RR_{ср} \times 100\,\%$), показателей pNN30/pNN40/pNN50 [2, 3]. Проведены сравнительные измерения с ЭКГ (диагностическая система «Валента») на 35 добровольцах.

Коэффициент корреляции с ЭКГ составил: для ЧСС до 0,96, для процента аритмии до 0,88, для pNN50 до 0,85. Погрешность определения ЧСС не превысила 3 уд/мин. Разработанный прототип (Рисунок 1) обеспечивает расчет количественных параметров за 15–30 с измерения.



а *б*

Рис. 1. Программно-аппаратный модуль для количественного определения основных параметров вариабельности сердечного ритма, измерения частоты сердечных сокращений и процента аритмии: без индикатора аритмии, процент = 3–8 % (*а*); с индикатором, аритмия = 12–19 % (*б*)

Предложенный прототип сфигморитмографа позволяет впервые реализовать в доступном устройстве количественную оценку аритмии синусового узла без использования электродов. Метод пригоден для домашнего мониторинга, оценки эффективности антиаритмической терапии и скрининговых исследований.

Разработанное устройство прошло апробацию на всероссийской конференции «Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития» (2025), получило призовое место, а также получило положительный отклик от экспертов на международных конференциях «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (Гомель, 2025), «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн» (Тамбов, 2024) и др. Были разработаны и зарегистрированы ФИПС 2 программы для ЭВМ (свидетельства № 2025687482. — № 2026614209).

Литература

1. Baevsky R. M., Chernikova A. G. Heart rate variability analysis: physiological foundations and main methods. Cardiometry, 2017. № 10. P. 66–76. DOI: https://doi.org/10.12710/cardiometry.2017.6676.
2. Аветисян А. Р., Кузнецова А. В., Проскурин С. Г. Количественное определение характеристик вариабельности сердечного ритма человека. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ, 2025687482, 10.10.2025.
3. Филиппов А. Д., Кузнецова А. В., Проскурин С. Г. Количественное определение синусовой аритмии человека методом сфигморитмографии. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ, 2026614209, 13.02.2026.

УДК 617.57-77

Повышение эффективности человеко-машинного интерфейса для управления высокофункциональным протезом верхней конечности для сокращения времени на обучение пользованию

Елисеичев Е. А.[1], к. т. н., Юдин А. В.[2], д. т. н., Воробьев П. С.[1], Панкратов М. В.[1]
[1] ООО Научно-производственное предприятие «БиоТех»
152925, г. Рыбинск, ул. 9 Мая, 20, корп. 1, кв. 30
EvgenijEliseichev@yandex.ru
[2] Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева
152959, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53
judinav@mail.ru

Предложен способ повышения эффективности взаимодействия человека с ампутированным предплечьем и бионического протеза верхней конечности с системой управления на основе искусственной нейронной сети, способствующий сокращению времени на обучение пользованию протезом такого типа.
Ключевые слова: антропоморфная бионическая кисть; кинематическая схема движения пальцев; поверхностная электромиография; ЭМГ-датчик сухого типа; классификация движений; автоматическое формирование хватов; искусственная нейронная сеть; обучение пользованию биопротезом; реабилитация.

Improving the efficiency of the human-machine interface for controlling a high-functionality prosthesis of the upper limb to reduce the time required for user training

Eliseichev E. A.[1], Candidate of Engineering Sciences, Yudin A. V.[2], Doctor of Engineering Sciences, Vorobyev P. S.[1], Pankratov M. V.[1]
[1] Research and Production Enterprise «BioTech» LLC
ap. 30, 20/1 9th May St., Rybinsk, 152925, Russia
EvgenijEliseichev@yandex.ru
[2] Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Solovyov
53 Pushkina St., Rybinsk, 152959, Russia
judinav@mail.ru

A method is proposed to improve the efficiency of interaction between a person with an amputated forearm and a bionic prosthesis of the upper limb with a control system based on an artificial neural network, which helps reduce the time required to learn how to use this type of prosthesis.
Keywords: anthropomorphic bionic hand; kinematic diagram of finger movement; surface electromyography; dry-type EMG sensor; motion classification; automatic grip generation; artificial neural network; user training for a bioprosthesis; rehabilitation.

Современные разработки в области протезирования верхних конечностей представляют собой антропоморфные бионические кисти, функционирующие на основе системы управления электромиографического (ЭМГ) типа, которая производит считывание и обработку данных с ЭМГ-датчиков в фазе мышечной

активности. Такие протезы взаимодействуют с объектами окружающего мира посредством определенного набора движений, с помощью которых осуществляется захват и удержание предметов. Вследствие ограниченного количества движений и необходимости их переключения с внешнего периферийного устройства (смартфон, планшет, пульт и т. п.) современные биопротезы не могут быть полноценной заменой здоровой руки. Кроме этого, обучение управлению таким протезом может занимать от 2 до 3 лет. Вопросы создания новых интеллектуальных систем управления биопротезами рассматриваются во многих научных трудах. В качестве основной проблемы указывается длительное время обучения управлению биопротезом, что связано с низкой эффективностью человеко-машинного интерфейса управления биомеханической системой. Таким образом, задача по повышению эффективности человеко-машинного интерфейса для управления биопротезом с целью сокращения времени на обучение является актуальной.

Авторская методика обучения ориентирована на применение высокотехнологичного биопротеза верхней конечности с системой управления на основе искусственной нейронной сети (ИНС) [1, 2]. В системе управления данного биопротеза применены две независимые ИНС, разработанные с помощью средств пакета ClassificationNeuralNetwork среды Matlab. Первая выполняет распознавание движений, вторая — автоматическое формирование хватов. Такой подход позволяет получить индивидуально для ампутанта широкую номенклатуру хватов и высокое качество выполнения этих хватов.

Для оценки эффективности методики обучения пользованию биопротезом сформированы критерии эффективности, наглядно отражающие качество обучения [3]. Сравнение значений критериев для различных методик обучения подтвердило высокую эффективность авторской методики. Очевидно, что, ориентируясь на полученные критерии, можно повысить эффективность обучения пользованию биопротезом, в первую очередь, повышая эффективность работы ИНС, отвечающую за классификацию движений. Ключевой особенностью предлагаемого подхода является развитие инвариантности классифицирующей движения ИНС к дестабилизирующим факторам, а именно: невозможности регулярной установки ЭМГ-датчиков в одних и тех же точках предплечья, равно как и смещению датчиков в процессе использования протеза, а также непостоянству двигательных паттернов, вызванному перемещением предплечья в пространстве и другими факторами.

На первом этапе обучения происходит сбор данных для обучения ИНС. На втором этапе испытуемый проходит обучение взаимодействию с ИНС в формате тренировок, реализуемых посредством ПО в среде Matlab, формируя двигательные паттерны. Впоследствии параметры ИНС корректируются под сформировавшиеся двигательные паттерны. Обучение продолжается до достижения необходимого качества распознавания движений.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты. Методика обучения была апробирована на испытуемых со здоровым и ампутированным предплечьем и показала высокую результативность. В результате обучения испытуемыми были освоены 12 движений, а эффективность распознавания движений для испытуемого со здоровым предплечьем возросла с 57 % до 83 %, а для испытуемого с ампутированным предплечьем — с 62 % до 76 %. Таким образом, повышение эффективности человеко-машинного интерфейса, в особенности, ИНС классификации движений, способствует сокращению времени

на обучение пользованию биопротезом верхней конечности. В то же время процесс обучения требует дальнейшего изучения, поскольку его эффективность обусловлена потребностью учета различных факторов, определяющих технический, функциональный, социальный и другие аспекты процесса протезирования.

Литература

1. Юдин А. В., Елисеичев Е. А., Воробьев П. С., Панкратов М. В., Блинов И. С. Оценка эффективности методики обучения пользованию биопротезом верхней конечности с системой управления на основе искусственной нейронной сети // Биомедицинская радиоэлектроника, 2025. Т. 28. № 6. — С. 5–15. DOI: https://doi.org/10.18127/j15604136-202506-01.
2. Безъязычный В. Ф., Юдин А. В., Панкратов М. В., Елисеичев Е. А., Воробьев П. С., Блинов И. С. Классификация движений искусственной нейронной сетью для управления бионической кистью // Искусственный интеллект и принятие решений, 2025. — № 1. — С. 33–45. DOI: https://doi.org/10.14357/20718594250103.
3. Безъязычный В. Ф., Юдин А. В., Михайлов В. В., Елисеичев Е. А., Панкратов М. В., Воробьев П. С., Блинов И. С. Оценка точности выполнения хватов антропоморфной бионической кисти // Вестник машиностроения, 2026. — Т. 105. — № 1. — С. 33–39. DOI: https://doi.org/10.36652/0042-4633-2026-105-1-33-39.

УДК 621.375.4:615.471

Модульный прототип усилителя напряжения для экспериментального анализа качества и стабильности регистрации биопотенциалов

Козырев Г. В., Ефремова К. Д.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
physmxte@gmail.com

Целью работы является поиск решения, позволяющего обеспечить качественное и стабильное усиление биопотенциалов в условиях двигательной активности спящего человека. Данные экспериментов, планируемых на разработанном стенде, послужат основой для создания носимого устройства мониторинга структуры сна.
Ключевые слова: усилитель биопотенциалов; полный факторный эксперимент; мониторинг сна; носимые устройства; кардиореспираторный мониторинг; электроэнцефалограмма.

A modular prototype voltage amplifier for the experimental analysis of the quality and stability of biopotential acquisition

Kozyrev G. V., Efremova K. D.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
physmxte@gmail.com

The goal of this work is to find a solution that ensures high-quality and stable amplification of biopotentials during physical activity in a sleeping person. The data from the experiments planned for the test bench we have developed will serve as the basis for creating a wearable device for monitoring sleep patterns.
Keywords: biopotential amplifier; full factorial experiment; sleep monitoring; wearable devices; cardiorespiratory monitoring; electroencephalogram.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

1. Применение носимых устройств, определяющих структуру сна, при кардиореспираторном мониторинге для улучшения диагностических характеристик метода.
2. Проектируемое устройство для определения фаз и стадий сна, предполагающее регистрацию биопотенциалов, в отличие от решений, использующих актиграфию или фотоплетизмографию.
3. Исследование направлено на решение общей проблемы устройств, заключающейся в обеспечении стабильной регистрации слабых сигналов в условиях двигательной активности. При этом в качестве основного метода планируется использование полного факторного эксперимента.

Рост распространенности расстройств сна диктует необходимость своевременной диагностики, основными инструментальными методами которой

выступают полисомнография (ПСГ) и кардиореспираторный мониторинг (КРМ). Несмотря на меньшую информативность по сравнению с ПСГ, КРМ широко востребован благодаря возможности самостоятельного применения в домашних условиях. Ключевым ограничением этого метода является отсутствие данных о структуре сна, что снижает чувствительность и специфичность при диагностике легких форм нарушений дыхания [1]. При этом непосредственно регистрируемые сигналы являются косвенными по отношению к активности центральной нервной системы, управляющей сном, и не подходят для определения его структуры [2]. Для объективной оценки текущих фаз и стадий сна в рамках улучшения диагностических возможностей КРМ перспективным решением может служить дополнение с помощью носимых устройств, способных регистрировать сигналы электроэнцефалографии, электроокулографии и электромиографии.

Важнейшим компонентом подобных устройств являются усилители напряжения, а задача регистрации в условиях возможной двигательной активности и форм-фактор носимого решения задают жесткие требования к организации питания, стабильности усиления и помехоустойчивости. Для подбора оптимальной конфигурации усилителя планируется проведение полного факторного эксперимента по схеме 2^3, который выполняется на базе модульного прототипа. Для создания стенда проведен анализ возможных блоков [3], разработаны принципиальная электрическая схема и топология печатной платы. В работе также описываются методы борьбы с сетевыми помехами и артефактами движения посредством целевых схемотехнических решений и проводится проверка итоговой схемы на соответствие техническим требованиям путем компьютерного моделирования.

Литература

1. Агальцов М. В. Полисомнография или кардиореспираторное мониторирование — что выбрать для оптимальной диагностики нарушений дыхания во сне? // Артериальная гипертензия, 2019. — Том 25. — № 6. — С. 604–612.
2. Ковальзон В. М. Основы сомнологии: физиология и нейрохимия цикла «бодрствование-сон». — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. — 239 с.
3. Spinelli E. M., Guerrero F. N. The biological amplifier // Further understanding of the human machine: The road to bioengineering. Vol. 7 / ed. by M.E. Valentinuzzi. Singapore/New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2017. P. 463–500.

УДК 620.3

Лазерно-индуцированная модификация функциональных характеристик композитных материалов для электродных интерфейсов

Морозова А. С.[1], Куксин А. В.[1], Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
anastasiyamors@gmail.com
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Сформированы композиты на основе многостенных углеродных нанотрубок и графита в различных полимерных матрицах. Определено влияние концентрации графита на электрическое сопротивление композитов. Исследована зависимость изменения сопротивления композитов от мощности лазерного излучения с длиной волны 1064 нм. Проведено измерение накожного импеданса электродных интерфейсов на основе композитов. С помощью формирования определенных композитных топологий в электродные интерфейсы интегрирована функция регистрации деформации. Проведено математическое моделирование топологий.
Ключевые слова: многостенные углеродные нанотрубки; графит; композиты; полимерная матрица; лазерное излучение; импеданс.

Laser-induced modification of the functional properties of composite materials for electrode interfaces

Morozova A. S.[1], Kuksin A. V.[1], Gerasimenko A. Yu.[1,2]
[1] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
anastasiyamors@gmail.com
[2] I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University)
8/2 Trubetskaya St., Moscow, 119048, Russia

Composites based on multi-walled carbon nanotubes and graphite in various polymer matrices have been formed. The effect of graphite concentration on the electrical resistance of the composites has been determined. The dependence of the change in resistance of the composites on the power of laser radiation with a wavelength of 1064 nm has been studied. The skin impedance of electrode interfaces based on composites has been measured. The function of deformation registration has been integrated into electrode interfaces by forming specific composite topologies. Mathematical modeling of the topologies has been performed.
Keywords: multi-walled carbon nanotubes; graphite; composites; polymer matrix; laser radiation; impedance.

В области современной нейроинженерии и клинической диагностики все более востребованными становятся методы длительного неинвазивного мониторинга

биоэлектрических сигналов человека. Традиционные «мокрые» Ag/AgCl электроды требуют использования гелей, вызывают дискомфорт у пациента, склонны к высыханию при длительном ношении, что значительно ограничивает потенциал существующих методов. В качестве альтернативы служат сухие электродные интерфейсы. Существующие устройства изготавливаются в основном из твердых металлов таких как, нержавеющая сталь, сплавы золота. Такие электроды обеспечивают сопоставимое с гелевыми электродами отношение сигнал/шум, однако, из-за большой твердости и жесткости вызывают раздражение и поверхностную эрозию кожного покрова вплоть до микротравм. Таким образом, одной из ключевых проблем разработки сухих электродных интерфейсов является поиск материала, сочетающего гибкость для конформного контакта с кожей, высокую проводимость для снижения импеданса и биосовместимость [1, 2]. Углеродные наноматериалы, обладающие электропроводностью порядка 10^5–10^6 См/м и биосовместимостью при использовании в малых концентрациях, в сочетании с полимерными материалами, обладают большим потенциалом создания сухих электродных интерфейсов. Например, при использовании многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в сочетании с графитовыми наночастицами в эластомерной матрице можно добиться высокой электропроводности композита. МУНТ, в таком случае, формируют перколяционную сеть, обеспечивая гибкость, а графит, благодаря своей ламеллярной структуре, создает дополнительные пути для прохождения электрического тока, что снижает контактное сопротивление на границе интерфейс-кожа [3].

В данной работе представлен метод формирования электродных интерфейсов на основе композитов МУНТ и графита в полимерных матрицах с лазерной модификацией электрических характеристик материала, предназначенных для создания гибких электродных интерфейсов. Композиты сформированы в матрицах из полидиметилсилоксана (ПДМС) и двухкомпонентного силикона на основе платины при содержании 3% масс. МУНТ и 5%-10% масс. графита. Обнаружено, что повышение концентрации графита препятствовало полимеризации силиконовой матрици, при этом образцы, содержащие только графит, не обладали проводимостью. Выявлено, что добавление 5% масс. графита приводило к уменьшению сопротивления композитов на основе силиконовой матрицы в шесть раз и более чем в 80 раз для композитов на основе ПДМС. Наносекундное лазерное воздействие (1064 нм) при мощности 0,14–0,27 Вт оказывало наибольшее влияние на свойства композитов на основе МУНТ/ПДМС: сопротивление таких композитов уменьшалось в 40–120 раз. Сопротивление композитов на основе силикона и образцов с добавлением графита снижалось в среднем в 10–14 раз. Увеличение мощности до 0,54 Вт приводило к чрезмерному нагреву материала и абляции углеродных наночастиц, что значительно ухудшало электропроводность композитов. Важно отметить, что лазерное воздействие на композиты МУНТ+графит практически не оказывало влияния на их сопротивление. На основе разработанных композитов были сформированы электродные интерфейсы. Исследования спектров комбинационного рассеяния образцов при сравнении отношений ID/IG и IG'/ID выявили образование небольшого числа дефектов. На это указывали увеличение ID/IG на 50% и незначительное снижение IG'/ID на 4,5%. Образование искажений в структуре композитов наиболее вероятно связано с локальным нагревом и абляцией полимерной матрицы, связывающей углеродные наноматериалы [4], что приводило к увеличению электропроводности образцов после лазерного облучения.

Высокая электропроводность является важным фактором при разработке электродных интерфейсов, так как это обеспечивает снижение контактного сопротивления кожа-электрод и увеличение отношения сигнал/шум (SNR) [5].

Возможность измерения биоэлектрических сигналов была исследована при измерении импеданса кожа-электрод в диапазоне частот 1–1000 Гц. Амплитуда импеданса уменьшалась при увеличении частоты, что соответствует характеристике стандартных Ag/AgCl гелевых электродов. Исследование биосовместимости композитов исследовалось методом флюоресцентного окрашивания клеток фибробластов эмбриона человека. Также с помощью лазерного излучения были сформированы топологии, предназначенные для улучшения сенсорной функции интерфейсов. Проведено математическое моделирование топологий и экспериментальные исследования чувствительности интерфейсов к деформации для различных топологий. В результате было достигнуто увеличение чувствительности к деформации в 4,5 раза по сравнению с образцами без топологии.

Таким образом, разработанные интерфейсы совмещают в себе как функции регистрации биоэлектрических сигналов человека, так и мониторинга движений, что позволит определять моменты физической активности пациента и исключать артефакты сигнала, вызванные движением. Кроме того, предлагаемое решение позволит реализовать метод контекстной диагностики, связывающий анализ биоэлектрических сигналов с регистрацией движений тела. Это позволит врачу оценить функциональные резервы пациента, например, зафиксировать аритмии, возникающие при конкретной нагрузке.

Исследование выполнено при поддержке Российского Научного Фонда (РНФ № 25-29-00938 от 26.12.2024).

Литература

1. Singh K. et al. Ultrabioconformal, Self-Healable, and Antioxidized Polydopamine-Inspired Nanowire Hydrogels Enable Resolving Power in Forehead and Ear Electroencephalograms for Brain Function Assessment // ACS Applied Materials & Interfaces, 2025. Vol. 17. № 17. P. 24887–24900.
2. Han C. H. et al. Evaluation of a silicone-based flexible dry electrode for measuring human bioelectrical signals // Biomedical Engineering Letters, 2025. Vol. 15. № 3. P. 563–574.
3. Manoj M. D. et al. Characterization of dry Graphite MWCNT hybrid ECG electrodes and the role of biocompatible surfactants fabrication additive on the bio-signal responses // Indian Journal of Biochemistry and Biophysics, 2025. Vol. 62. № 6. P. 645–653.
4. Yin S. et al. Synergistic Effect of MWCNT and CB on the Piezoresistive Properties of Laser Ablation Composites Strain Sensors // Nanomaterials, 2025. Vol. 15. № 13. Art. 997.
5. Баширов А. С. и др. Оценка возможностей микросхемы AD5933 для измерения импеданса электродов в устройствах «интерфейс мозг — компьютер» // Вопросы радиоэлектроники, 2016. — № 3. — С. 104–112.

УДК 004.312

Исследование влияния аппаратной временной рандомизации на информативность канала энергопотребления различных микроархитектур криптографического алгоритма AES

Алексеев В. Д.[1,2], Тишин А. С.[1], к. т. н., Михайлов В. Ю.[1,3]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
valekseev@niime.ru, atishin@niime.ru, vmikhaylov@niime.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Проведен анализ информативности канала энергопотребления аппаратных микроархитектур алгоритма AES. Предложен механизм временной рандомизации путем инжекции фиктивных тактов. Эффективность решения оценена при помощи методик CPA и TVLA для профилей энергопотребления SPICE-нетлиста и ПЛИС-прототипа.
Ключевые слова: анализ энергопотребления; AES; инжекция фиктивных тактов; CPA; TVLA.

Investigation of the impact of hardware temporal randomization on the power consumption side-channel informativeness of various AES microarchitectures

Alexeev V. D.[1,2], Tishin A. S.1, Ph.D., Mikhailov V. Y.[1,3]
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
valekseev@niime.ru, atishin@niime.ru, vmikhaylov@niime.ru
[2] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
[3] Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

An analysis of the power consumption side-channel informativeness of AES hardware microarchitectures was conducted. A temporal randomization mechanism based on dummy clock cycle injection is proposed. The effectiveness of the solution was evaluated using CPA and TVLA methodologies for power profiles of a SPICE netlist and an FPGA prototype.
Keywords: power consumption analysis; AES; dummy clock cycle injection; CPA; TVLA.

В процессе разработки аппаратных вычислительных блоков необходимо обеспечивать баланс между характеристиками производительности, энергопотребления и занимаемой на кристалле площади. В зависимости от требований к конечному

изделию соотношение данных характеристик может меняться, позволяя реализовывать необходимый функционал наиболее эффективным способом [1]. В свою очередь, при проектировании аппаратных криптографических сопроцессоров необходимо дополнительно учитывать потенциальную возможность раскрытия содержимого вычислительного блока, например ключа шифрования, посредством анализа побочных каналов, в частности энергопотребления устройства. Для противодействия такому анализу необходимо на этапе проектирования архитектуры и RTL-описания разрабатываемого блока применять различные схемотехнические решения, направленные на маскирование и сокрытие переключательной активности устройства. К числу эффективных подходов, реализующих сокрытие, относится метод инжекции фиктивных (пустых) тактов в вычислительный тракт [2]. Данный механизм позволяет обеспечить временную рандомизацию выполнения операций и приводит к смещению целевых исследуемых тактов алгоритма между итерациями измерений, затрудняя применение статистических методик, используемых как для обнаружения информационных утечек, так и для извлечения данных из аппаратного блока по его профилю энергопотребления.

Информационные утечки по каналу энергопотребления в ИС возникают вследствие ключевого свойства КМОП-схем — преобладания динамической компоненты мощности над статической. Динамическое энергопотребление возникает непосредственно в моменты переключения транзисторов логических элементов [3]. При этом амплитуда таких динамических всплесков энергопотребления коррелирует с количеством переключившихся элементов. Таким образом, используя математическую модель веса или расстояния Хэмминга, описывающую переключательную активность битового вектора, и анализируя последовательность выполнения операций в исследуемом криптографическом алгоритме, становится возможным установить соответствие между амплитудой кратковременного всплеска энергопотребления и изменением содержимого внутренних регистров анализируемого блока [4]. Посредством дальнейшего накопления статистики измерений в некотором исследуемом временном интервале при различных входных данных вычислительного алгоритма становится возможным выявить наличие зависимости профиля энергопотребления от обрабатываемых модулем значений при помощи t-критерия Уэлча (методика TVLA), а также извлечь недоступное пользователю содержимое внутренних регистров блока методами дифференциального (DPA) или корреляционного (CPA) анализа.

В рамках данной работы предложено схемотехническое решение для временной рандомизации переключательной активности аппаратных реализаций криптографического алгоритма AES путем инжекции фиктивных тактов в вычислительный тракт устройства. Эффективность разработанного аппаратного блока исследована для различных типов микроархитектур (последовательной, конвейерной и комбинированной), а также для разрядностей шины данных от 8 до 128 бит включительно. Для каждой конфигурации продемонстрировано влияние доли фиктивных тактов на изменение уровня устойчивости модуля к анализу энергопотребления. Оценка производилась с использованием профилей расстояния Хэмминга, полученных на этапе моделирования RTL-описания, а также кривых энергопотребления, снятых посредством измерения на ПЛИС-прототипах и моделирования SPICE-нетлиста. Определены оптимальные вероятности генерации фиктивных тактов, необходимые для достижения не распознаваемости зависимости профилей

расстояния Хэмминга и энергопотребления от входных данных (с использованием методики TVLA), а также для значительного снижения корреляции между выполняемыми операциями и током потребления микросхемы (с применением методики CPA). Дополнительно оценены аппаратные затраты разработанного модуля: его вклад в общее энергопотребление и занимаемую на кристалле площадь для каждой микроархитектуры и разрядности.

Литература

1. Нуйкин А. В., Кравцов А. С., Мытник К. Я. Перспективы развития универсальной защищенной программно-аппаратной платформы со сверхнизким потреблением для устройств Интернета вещей // Наноиндустрия, 2019. — № S (89). — С. 328–329.
2. Liptak C., Mal-Sarkar S., Kumar S. A. P. Power analysis side channel attacks and countermeasures for the internet of things // 2022 IEEE Physical Assurance and Inspection of Electronics (PAINE). –IEEE, 2022. P. 1–7.
3. Yu B. et al. An AES chip with DPA resistance using hardware-based random order execution // Journal of Semiconductors, 2012. Vol. 33. № 6.
4. Crocetti L. et al. A simulated approach to evaluate side-channel attack countermeasures for the Advanced Encryption Standard // Integration, 2019. Vol. 68. P. 80–86.

УДК 621.317

Разработка микросхемы датчика углового положения рулевого вала автомобиля

Лоос В. В.
АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
loos.vladislav@yandex.ru

Разработана и запущена в производство интегральная микросхема датчика углового положения рулевого вала автомобиля для работы с мостовыми сенсорами. В статье описана архитектура, приведены технические характеристики и результаты моделирования микросхемы. Приведен анализ решений и обоснован выбор архитектуры разработанной микросхемы.
Ключевые слова: датчик углового положения; AMP сенсор; сенсор Холла; преобразователь угол-код; топология интегральной микросхемы.

Development of a steering wheel angle sensor

Loos V. V.
Zelenograd Nanotechnology Center JSC
6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia
loos.vladislav@yandex.ru

An integrated circuit for a steering wheel angle sensor, designed to work with bridge sensors, has been developed and put into production. The article describes the architecture, provides technical specifications, and presents the simulation results for the circuit. An analysis of the solutions is presented, and the choice of the developed circuit architecture is justified.
Keywords: angle position sensor; AMR sensor; Hall sensor; angle-to-code converter; integrated circuit layout.

В современном мире множество устройств оснащено тем или иным датчиком положения или датчиком угла поворота, преобразующим угол поворота детали в электрический сигнал. Подобные датчики применяются в системах точного перемещения и позиционирования, в измерительном оборудовании, в робототехнике и автомобилестроении и иных областях. С начала прошлого века известно достаточное число машин и трансформаторов для преобразования физического угла поворота в электрическую энергию, которые уверенно справляются с этой задачей. Среди них — вращающиеся трансформаторы, AMP сенсоры и сенсоры, работающие на эффекте Холла.

В этой работе представлен обзор разработанной микросхемы, предназначенной для обработки сигналов с датчика угла поворота рулевого вала автомобиля. Она использует результаты патента [1] для обработки сигналов с AMP сенсоров или сенсоров Холла. В них для нахождения угла поворота вала использован алгоритм расчета по формуле разностного угла двух вспомогательных шестерней, избавляющий от необходимости подсчета числа оборотов вала. Выбор в пользу магниторезистивных сенсоров обусловлен низким энергопотреблением резистивного моста и малой площадью этого моста, занимаемой на кристалле. Это выгодно

отличает магниторезистивные сенсоры от аналогичных оптических, проигрывающих и в энергопотреблении, и в площади. Использование двух зубчатых шестерней с различным числом зубьев позволяет верно определять угол поворота рулевого вала сразу после включения питания. При этом микросхема совместима с иными системами, имеющими возможность интеграции зубчатой передачи и шестерней, для расположения на них мостовых сенсоров.

Разработана математическая модель AMR сенсора на основе моста Уитстона и проведен анализ сигнала, формируемого на выходе. Известно, что AMR сенсор формирует сигнал с определенной погрешностью, так что были исследованы варианты аналоговой и цифровой коррекции. Предложен собственный полностью цифровой алгоритм коррекции данных на выходе сенсора с переходом от алгебраического представления сигнала к тригонометрическому. Преимуществами данного алгоритма будут быстродействие, высокая точность и возможность учитывать и автоматически подстраиваться под температурные измерения резистивного сенсора. Предложенный алгоритм апробирован в математической модели, реализован и верифицирован на уровне RTL.

В статье описана архитектура микросхемы, приведены результаты математического моделирования и обоснования выбранных инженерных решений. Приведен анализ существующих алгоритмов преобразования угол-код и обоснован выбор архитектуры разработанной микросхемы на основе цифрового следящего преобразователя. На основе представленных алгоритмов разработана и запущена в производство топология интегральной микросхемы по технологии КМОП с технологической нормой 110 нм. Разработанная микросхема функционирует на частоте 32 МГц, площадь кристалла составляет 4×4 мм^2. Преобразование угол-код выполняется с разрешением 16 бит с погрешностью 0,2 градуса в диапазоне от −1540 до +1540 градусов. При изменении конфигурации микросхемы и увеличении задержки распространения сигнала от входа микросхемы до выхода погрешность выходного угла не превышает 1,4 градуса, что остается применимо во множестве приложений с заданным диапазоном измерений. Время преобразования варьируется от 300 нс до 1,5 мкс в зависимости от настроек тактовой частоты сигма-дельта модулятора и коэффициента децимации сглаживающего фильтра-дециматора.

Работа выполнена в Дизайн-Центре разработки СБИС и электронных модулей АО «ЗНТЦ» по заказу АО «Автоэлектроника».

Литература

1. Patent: Angle Measurement Device for Rotating Axis, DE 100 36 281 A1, Robert Bosch GmbH.
2. Granig W., Hartmann S., Köppl B. Performance and technology comparison of GMR versus commonly used angle sensor principles for automotive applications. –SAE Technical Paper, 2007. № 2007-01-0397.
3. Сысоева С. Сравнительный анализ возможностей применения датчиков холла в автомобильных системах электрического рулевого управления // Компоненты и технологии, 2007. — № 5 (70). — С. 36–43.
4. ANGLE ERROR CORRECTION WITH THE A33230 / Allegro MicroSystems. https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an296280-a33230-angle-error-correction.pdf?sc_lang=en (дата обращения 11.04.2026).
5. Calibration of AMR Angle Sensors / Texas Instruments. https://www.ti.com/lit/slya085 (дата обращения 11.04.2026).

УДК 621.3

Схемотехнические и алгоритмические методы снижения энергопотребления и площади 12-битного АЦП последовательного приближения

Цепилова А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
tsna2001@gmail.com

Проведена разработка 12-битного АЦП последовательного приближения с сегментированным ЦАП на переключаемых конденсаторах. Предложен энергосберегающий алгоритм переключения, фиксирующий состояние старших бит. Достигнуто снижение тока потребления на 85% и уменьшение площади ядра на 25% по сравнению с классической архитектурой.
Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь; цифроаналоговый преобразователь; минимизация площади.

Circuit and Algorithmic Techniques for Power and Area Reduction in a 12-bit SAR ADC

Tsepilova A.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
tsna2001@gmail.com

A 12-bit SAR ADC with a segmented switched-capacitor DAC has been developed. An energy-saving switching algorithm that fixes the state of the most significant bits is proposed. A reduction in supply current consumption by 85% and a 25% decrease in core area have been achieved compared to the conventional architecture.
Keywords: analog-to-digital converter; digital-to-analog converter; layout area minimization.

В современных портативных, имплантируемых устройствах и системах интернета вещей предъявляются повышенные требования к аналого-цифровым преобразователям с ультранизким энергопотреблением и малой площадью кристалла. Среди различных архитектур АЦП последовательного приближения являются доминирующим выбором для среднескоростных приложений благодаря поразрядному принципу преобразования, позволяющему основным аналоговым блокам находиться в режиме ожидания между тактами. Основным ограничением по мощности в классическом АЦП последовательного приближения является емкостной ЦАП, отвечающий за перераспределение заряда. В двоично-взвешенной матрице каждое решение бита требует переключения больших конденсаторов старших разрядов, что влечет затраты энергии, пропорциональные квадрату напряжения и общей емкости. Эта проблема становится критической для высокоразрядных устройств (12 бит и выше), где разброс конденсаторов, необходимый для линейности, приводит к увеличению площади, паразитной емкости и, следовательно, рассеиваемой мощности.

В данной работе предложен подход к проектированию 12-битного АЦП последовательного приближения, заключающийся в использовании сегментированного ЦАП на переключаемых конденсаторах и специализированного энергосберегающего алгоритма переключения. Сегментированный ЦАП состоит из сегмента старших бит, сегмента младших бит и разделительного конденсатора. Выбранное соотношение емкостей ($CMSB:Cs:CLSB = 1:1:1/32$) обеспечивает необходимое ослабление при минимизации общей площади. Данное решение позволяет уменьшить общую емкость матрицы более чем в восемь раз по сравнению с классической структурой, где общая емкость составляет 4095·Cunit. Разделение монолитной структуры на два сегмента через разделительный конденсатор приводит к фундаментальному сокращению общей емкости, поскольку эффективный вклад сегмента младшего разряда ослаблен.

Разработанный алгоритм переключения фиксирует состояние сегмента шести старших бит после определения их значений. Процесс преобразования разделен на две фазы: фаза выборки и фаза поразрядного цикла. В фазе выборки входной сигнал сохраняется на конденсаторной матрице. Фаза преобразования начинается с одновременного переключения сегментов ЦАП для установления начального условия. Затем специализированный алгоритм последовательно переключает сегменты конденсаторов на основе решений компаратора. Ключевое преимущество алгоритма заключается в том, что после первых тактов, определяющих старший разряд, энергоемкое переключение больших конденсаторов полностью прекращается. Весь процесс точной настройки выполняется в пределах сегмента младших разрядов, имеющего на порядки меньшую паразитную емкость. Это напрямую снижает среднюю энергию переключения.

Проведенное математическое моделирование с использованием специализированных САПР, показало, что предложенный подход позволяет разработать АЦП со значительным улучшением характеристик по сравнению с классической архитектурой. Достигнуто снижение тока потребления с 769 до 109 мкА (снижение на 85%) и уменьшение площади ядра АЦП на 25% (с 0,84 до 0,63 мм^2). Улучшение отношения сигнал/шум и искажения составило 3 дБ (с 72 до 75 дБ), а эффективное количество бит увеличилось на 0,5 бита (до 12,2 бит).

Полученные результаты могут быть использованы при разработке сложнофункциональных блоков для создания компактных и энергоэффективных АЦП, что позволит снизить затраты на разработку топологии и последующее производство, а также улучшить конкурентоспособность продукции. В рамках дальнейших НИР планируется исследование влияния технологических разбросов параметров на точность преобразования и разработка методов цифровой коррекции. Опытное производство и характеризация возможны в рамках проекта коллективного доступа MPW, что обеспечит отработку технологии и ускоренное внедрение разработанных решений. Рассмотренный подход может быть использован для создания экспертных систем САПР в помощь разработчикам схемотехники интегральных микросхем.

Литература

1. H. Yang, H. Lee, H. Kim, S. Park and J. Burm, “A 12-b 2 MS/s R-C Two-Step SAR ADC with Bit-Cycling Time Control and LSB Correction Logic,” 2020 International SoC Design Conference (ISOCC), Yeosu, Korea (South), 2020. P. 238–239.

2. W. Tung and S. -C. Huang, “An Energy-Efficient 11-bit 10-MS/s SAR ADC with Monotonie Switching Split Capacitor Array,” 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Florence, Italy, 2018. P. 1–5

УДК 621.3.049.771.16

Исследование и разработка автоматизированного маршрута проектирования IBIS-моделей интерфейсных модулей СБИС для отечественных полупроводниковых технологий с проектными нормами 250–180 нм

Ильин С. А., к. т. н., Кобышев А. Е., Ласточкин О. В. к. т. н.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
silin@niime.ru, akobyshev@niime.ru, lastochkin@niime.ru

В работе представлен маршрут проектирования IBIS-моделей для библиотек элементов ввода-вывода. Описано специализированное ПО, обеспечивающее автоматизированную генерацию исходных данных для разработки IBIS-моделей и сравнение работы моделей со SPICE-моделированием.
Ключевые слова: IBIS; автоматизация; библиотека элементов ввода-вывода; тестовый кристалл.

Research and development of an automated design flow for IBIS models of VLSI interface modules based on semiconductor technologies with 250–180 nm design rules

Ilin S. A., Ph.D, Kobyshev A. E., Lastochkin O. V., Ph.D
Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
silin@niime.ru, akobyshev@niime.ru, lastochkin@niime.ru

This paper presents a design workflow for IBIS models intended for I/O cell libraries. It describes specialized software that enables the automated generation of source data for IBIS model development and the comparison of model performance against SPICE-simulations.
Keywords: IBIS; automation; I/O cell libraries; test chip.

В состав современных комплектов средств проектирования (КСП) СБИС помимо библиотек стандартных цифровых элементов входят библиотеки элементов ввода-вывода. Подобных библиотек может быть несколько, каждая из которых насчитывает от нескольких десятков до нескольких сотен функциональных элементов: буферы ввода/вывода, двунаправленные и специализированные элементы.

Уменьшение технологических норм постоянно расширяет требования к анализу целостности сигналов, в том числе с учетом паразитных параметров корпуса СБИС [1]. Для ускорения анализа целостности сигналов с учетом влияния технологических, температурных и электрических факторов был разработан стандарт IBIS [2, 3]. Структурно IBIS-модель представляет собой «черный ящик», содержащий таблицы вольт-амперных и вольт-временных характеристик моделируемой схемы. Использование IBIS уменьшает временные затраты на моделирование практически без потери точности, что позволяет ускорить анализ и проектирование изделия.

Вследствие сложности и огромного количества входных и выходных данных, требующих конвертации в формат строго определенного типа, разработка IBIS-моделей является сложной и объемной технической задачей [4]. Для ее решения было разработано технологически независимое специализированное программное обеспечение (ПО) для автоматизированной генерации исходных данных и последующей разработки IBIS-моделей интерфейсных элементов ввода-вывода на основе результатов схемотехнического SPICE-моделирования. Применение разработанного ПО обеспечило:

- генерацию исходных данных для разработки IBIS-моделей по технологиям 250–180 нм;
- соответствие разработанных моделей спецификации IBIS 5.2;
- сравнение результатов симуляции IBIS-моделей с результатами схемотехнического моделирования элементов ввода-вывода с учетом паразитных параметров.

Генерация синтаксически корректных и соответствующих SPICE-моделированию IBIS-моделей является вторым из четырех уровней качества [5]. Для подтверждения работоспособности и соответствия результатам работы изделия в корпусе необходимо спроектировать, изготовить и провести измерения тестового кристалла (ТК), включающего репрезентативный набор элементов ввода-вывода. В дальнейшем планируется разработка методики проектирования и измерения ТК для IBIS-моделей с учетом паразитных параметров корпуса для библиотек элементов ввода-вывода по отечественным полупроводниковым технологиям 250–90 нм.

Помимо элементов ввода-вывода, в состав периферии могут входить специализированные интерфейсные блоки, например: LVDS, SPI, I^2C, USB и др. Подобные блоки также требуют учета режимов снижения скорости нарастания сигнала, программируемый выходной импеданс и т. п. Представленный в данной работе инструментарий является основой, которая, после адаптации и доработки будет распространена на интерфейсные блоки ввода-вывода.

Разработанное ПО успешно применено при разработке IBIS-моделей библиотек элементов ввода-вывода с проектными нормами 250–180 нм. Дальнейшие работы направлены на разработку IBIS-моделей интерфейсных элементов ввода-вывода под проектные нормы 90 нм, расширение методики для специализированных интерфейсных блоков (LVDS, SPI, I^2C, USB) и создание общей методики валидации с использованием ТК.

Литература

1. Красников Г. Я. Общая теория технологий и микроэлектроника / Г. Я. Красников, Е. С. Горнев, И. В. Матюшкин. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. –434 с. –ISBN 978-5-94836-611-1.
2. IBIS Version 8.0 [Электронный ресурс], 2025. — URL: https://ibis.org/ver8.0 (дата обращения: 07.04.2026).
3. Лемешко, Н. В. IBIS-модели и их применение в задачах ЭМС / Н. В. Лемешко, Л. Н. Кечиев, С. С. Захарова. — М.: Грифон, 2016. –192 с. — (Библиотека ЭМС). –ISBN 978-5-98862-278-9.

4. Исследование и разработка IBIS-моделей для библиотек ячеек ввода-вывода / С.А. Ильин, О.В. Ласточкин, А.А. Новиков, Д.С. Шипицин // Международный форум «Микроэлектроника-2019» 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули»: Сборник тезисов, Алушта, 30 сентября –05 2019 года. –Алушта: Рекламно-издательский центр «ТЕХНОСФЕРА», 2019. — С. 312–314.
5. IBIS Quality Specification 3.0 [Электронный ресурс], 2023. — URL: https://ibis.org/quality_ver3.0 (дата обращения: 07.04.2026).

УДК 621.3.049.771.14

Разработка программы для характеризации интегральных цифровых ячеек для кремниевой компиляции

Румянцев М. С.[1], Зверев А. В.[2]
[1] НГТУ
630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20
maksoomaksoo@gmail.com
[2]ООО «Мотив НТ»
121205, г. Москва, тер. Инновационного центра Сколково, Большой б-р, 42, стр. 1

Предложена оригинальная программа, выполняющая характеризацию блоков произвольной сложности со статическими и динамическими элементами. Программа учитывает дополнительные критерии, необходимые для характеризации динамических ячеек.
Ключевые слова: СБИС; характеризация; D-триггер; динамическая логика; Liberty; Verilog-AMS.

Development of a characterization program for integrated standart cells for silicon compilation

Rumyantsev M. S.[1], Zverev A. V.[2], Ph.D
[1]Novosibirsk State Technical University (NSTU)
20 Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia
maksoomaksoo@gmail.com
[2] "Motiv Neuromorphic Technologies" LLC
bldg. 1, floor/room/office 1/306/61, 42 Bolshoy Blvd., Skolkovo Innovation Center Territory, Moscow, 121205, Russia
zverev@motivnt.ru

An original program is proposed for characterizing blocks of arbitrary complexity with static and dynamic elements. The program takes into account additional criteria necessary for characterizing dynamic cells.
Keywords: VLSI; characterization; D-trigger; dynamic logic; Liberty; Verilog-AMS.

Введение

Современные СБИС содержат от десятков миллионов до сотен миллиардов транзисторов. Разрабатывать принципиальные электрические схемы и топологические чертежи таких ИС на уровне транзисторов вручную практически невозможно. Поэтому проектирование СБИС разделено на два этапа: создание библиотеки — разработка базовых цифровых блоков и ячеек на транзисторном уровне с учетом паразитных параметров топологии; проектирование устройства — синтез целевой логики из этих ячеек, рассматриваемых как «черные ящики». Программам автоматического проектирования достаточно знать внешние интерфейсные временные и энергетические характеристики цифровой ячейки.

Транзисторный уровень оперирует непрерывными токами и напряжениями, а синтез — дискретными логическими уровнями и временными ограничениями.

Для преодоления этого разрыва был предложен стандарт Liberty [1], который в настоящее время является абсолютным стандартом. Он описывает цифровую ячейку в виде таблиц, где для каждого сочетания входных фронтов и выходных нагрузок приведены временные и энергетические характеристики цифровых ячеек библиотеки.

Получение этих табличных значений называется характеризацией. Для каждого технологического процесса выполняется аналоговое моделирование ячейки во времени с ее SPICE-моделью [2], включая паразитные элементы. На вход ячейки подаются специальные последовательности сигналов, а выходные реакции измеряются.

Современные ИС часто содержат статические элементы памяти, однако использование динамических может значительно улучшить характеристики целевого устройства. Статические элементы поддерживают свое состояние за счет цепей положительной обратной связи и могут хранить записанное значение до выключения питающего напряжения. Динамические элементы используют хранение состояния в виде заряда, накопленного, как правило, на входной емкости последующего цифрового вентиля.

Из-за утечек величина накопленного заряда соответствует записанному логическому состоянию только в течение некоторого времени. Однако динамические элементы имеют более высокое быстродействие, занимают меньшую площадь и, при достаточно высокой частоте переключений, меньшее энергопотребление [3].

Известные инструменты характеризации, такие как, например, Cadence Liberate, Synopsys SiliconSmart, ориентированы преимущественно на статические ячейки. Настройка характеризации блоков, содержащих динамические элементы, в них затруднена из-за отсутствия нескольких важных критериев оценки корректности работы характеризуемой ячейки. Сложность использования инструмента особенно высока, если ячейка представляет собой многостадийный блок.

По этой причине был разработан инструмент для характеризации цифровых ячеек и многостадийных блоков, способный работать со статическими, динамическими и смешанными архитектурами.

Описание разработанного инструмента

В основу работы программы была положена идея создания исходного кода на языке Verilog-AMS [4] на основе описанного пользователем сценария характеризации. Все необходимые воздействия и вычисления параметров выполняются в процессе проведения аналогового моделирования в одном запуске.

Сгенерированный Verilog-AMS файл и SPICE-файл ячейки с паразитными элементами передаются на вход любому внешнему инструменту аналогового моделирования, работающему с исходными данными на этих языках. Согласно коду, написанному в этом Verilog-AMS файле, происходит вычисление заданных параметров на основе наблюдения за изменениями сигналов непосредственно в процессе моделирования.

Программа для характеризации написана на языках программирования TCL [5] и Python [6]. На рис. 1 представлена диаграмма компонентов, которые составляют программный инструмент.

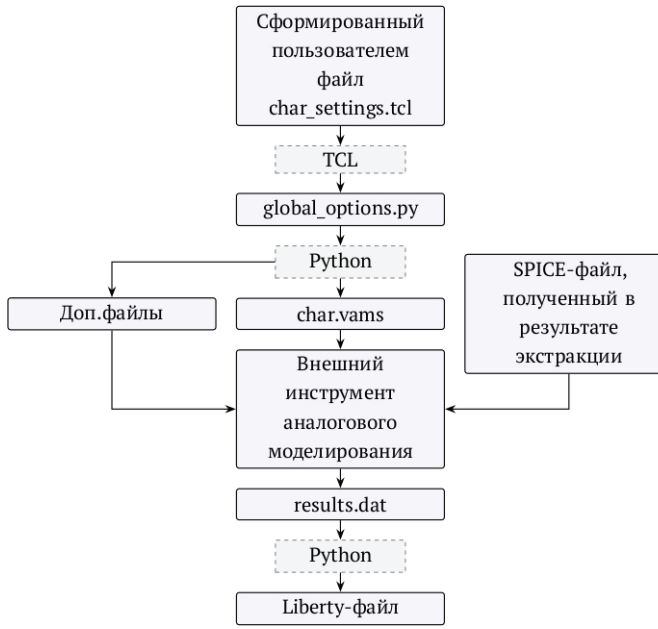


Рис. 1. Диаграмма компонентов инструмента для характеризации

Пользователь формирует файл **char_settings.tcl**, состоящий из настроек параметров и сценариев характеризации.

Настройка параметров представляет собой определение необходимых опций, которые будут использованы при проведении характеризации. В их число входят: определение файлов с моделями транзисторов и других приборов; определение цепи питания и земли, точность измерений, длительность одного шага сценария и другие параметры.

Сценарий характеризации представляет собой набор отдельных блоков, состоящих из команд. Каждый блок начинается с команды «measure название_блока». В названии блока необходимо также указать вид проводимого измерения для правильной обработки Python-модулем данного блока.

После команды «measure» описываются шаги текущего сценария. Шаг представляет собой промежуток времени, в течение которого выполняются операции над сигналами схемы. Длительность шага задается в настройках. Каждый шаг обозначается командой «step», параметры которой указывают состояния входных, выходных и внутренних сигналов тестируемого блока или ячейки.

Для входных сигналов доступно четыре состояния: «h», «l», «r», «f»:

- «h» — формирование «логической 1» на протяжении всего шага;
- «l» — формирование «логического 0» на протяжении всего шага;
- «r» — изменение с «логического 0» на «логическую 1» в середине шага;
- «f» — изменение с «логической 1» на «логический 0» в середине шага.

Программа для характеризации способна работать как с одноразрядными портами, так и с многоразрядными шинами. Разница между ними заключается в способе записи входного воздействия и ожидаемого на выходе значения. Для шин записывается число в двоичной или шестнадцатеричной системе счисления. Также добавлены быстрые комбинации «0» и «-1». При записи первой комбинации на все биты шины подается «логический 0», а в случае «-1» — «логическая 1».

На данный момент доступны следующие измерения: измерение емкости на входных контактах, статической и динамической мощности, задержки распространения, а также времен предустановки и удержания.

В программе реализована возможность выполнять измерения зависимых характеристик предустановки и удержания [7]. Для этого используются команды «dep_setup» и «dep_hold». Перед проведением таких измерений необходимо найти независимые времена предустановки и удержания.

Критерии оценки результата измерения времен предустановки и удержания

Для того, чтобы оценить результат измеряемого выходного или внутреннего сигнала при определении времен предустановки и удержания, используются следующие критерии:

- ожидаемое на выходе значение;
- референтное значение задержки распространения выходного сигнала;
- для времени удержания: ограниченное во времени отклонение напряжения на выходном или внутреннем сигнале

Данные критерии позволяют правильно оценить параметры характеризации для статического цифрового блока или ячейки. Однако для динамических элементов этого недостаточно. Ввиду того, что динамические элементы хранят свое состояние в виде накопленного заряда, который со временем утекает, результаты их характеризации могут отличаться или характеризация вовсе может быть остановлена из-за неожиданного состояния на выходе, так как некоторые критерии ложно определят измерение как «неуспешное».

По этой причине добавлен ряд новых критериев, способных оценить результат характеризации для цифровых блоков и ячеек с динамическими элементами: мониторинг тока утечки блока и мониторинг отклонения напряжений узлов от номинального.

В зависимости от сложности того или иного характеризуемого блока, в программе имеется возможность выбрать один из вышеперечисленных критериев или оба сразу.

Благодаря введению дополнительных критериев оценки результата, появилась возможность выполнять характеризацию цифровых блоков и ячеек, содержащий динамическую архитектуру.

Результат работы программы

Были охарактеризованы статически и динамический D-триггеры. Экспериментально подтвердилось более высокое быстродействие ячейки с динамическим типом архитектуры при сравнении с ячейкой со статическим типом.

Также для проверки работы инструмента со сложными блоками дополнительно была проведена характеризация многостадийного блока передискретизации входных данных, а также сериализатора.

Заключение

Разработанная программа позволяет выполнять характеризацию цифровых блоков и ячеек любой сложности с динамическим, статическим и смешанным типом архитектуры.

Работа выполняется в рамках проекта по созданию импульсного нейроморфного процессора «Алтай 3» компанией ООО «Мотив НТ»

Литература

1. Synopsys: [сайт] / Synopsys, Inc. Mountain View, 2026. URL: http://synopsys.com (дата обращения: 31.05.2026). Текст: электронный.
2. Berkeley Wireless Research Center: [сайт] / University of California, Berkeley. Berkeley, 2026. URL: http://bwrcs.eecs.berkeley.edu (дата обращения: 31.05.2026). Текст: электронный.
3. Baker R.J. CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2019. ISBN 978-1-11-948151-5.
4. Verilog-A/MS. — URL: https://www.verilogams.org/# (дата обращения: 03.04.2026).
5. Tcl Developer Xchange: [сайт] / Tcl Core Team, 2026. — URL: https://www.tcl-lang.org/ (дата обращения: 31.05.2026). — Текст: электронный.
6. Python Software Foundation: [сайт]. — Beaverton, 2026. — URL: python.org (дата обращения: 31.05.2026). — Текст: электронный.
7. Ильин С., Ласточкин О., Ищенко Н. Методика расчета зависимых временных ограничений для библиотек стандартных цифровых ячеек // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), 2021. — DOI: 10.31114/2078-7707-2021-2-17-22.

УДК 621.382.3+004.312.42

Общие принципы построения триггеров на основе методологии SRPG для уменьшения потребляемой мощности СБИС на примере отечественной полупроводниковой технологии КМОП 90 нм

Ильин С. А., к. т. н., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., к. т. н., Харламова М. В.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
mkharlamova@niime.ru

В работе рассмотрены основные принципы проектирования триггеров с применением методологии SRPG (State Retention Power Gating) на примере отечественной технологии КМОП 90 нм. Применение методологии SRPG обеспечивает снижение общего энергопотребления, при сохранении текущего состояния триггеров.
Ключевые слова: потребляемая мощность; энергоэффективность; триггеры с сохранением состояния при отключении питания; SRPG.

General principles of constructing triggers based on the SRPG methodology in domtstic semiconductor technology 90 nm

Ilin S. A., Ph.D, Kopeikin D. Yu., Lastochkin O. V., Ph.D, Kharlamova M. V.
Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
mkharlamova@niime.ru

The paper presents the general approaches to the design of SRPG triggers using domestic semiconductor technology with 90 nm design rules. The proposed solution reduce total power consumption of the device by turning off the power to the logic elements while maintaining the current state.
Keywords: power consumption; power efficiency; state retention power gainting flip-flops; SRPG.

С ростом плотности упаковки ИС задача проектирования устройств с низким энергопотреблением привлекает все большее внимание разработчиков [1]. Проблема энергоэффективности устройств является важной и актуальной как для КМОП 28 нм, так и для технологий уровня 180–90 нм.

Существует несколько методов, позволяющих достигнуть повышенной энергоэффективности, разрабатываемой ИС [2,3,4]. Одним из них является применение методологии отключения питания с сохранением состояния (State Retention Power Gating или SRPG), основная цель которой снижение энергопотребления в неактивном режиме и возобновление работы после выхода в активное состояние. При использовании SRPG-триггеров в неактивном режиме питание комбинационной логики отключается, а триггеры переходят в режим сохранения последнего рабочего состояния. Важно отметить, что такой подход ожидаемо увеличивает сложность реализации библиотеки SRPG-триггеров в части схемотехники и топологии, а также усложняет процесс физического синтеза кристалла.

Конструктивная особенность SRPG-триггеров заключается в наличии двух D-триггеров, имеющих два различных источника питания: Master-latch работает от отключаемого источника питания, Slave-latch, или его отдельная часть — запоминающий элемент, подключен к постоянно включенному источнику питания. Дополнительный сигнал сохранения состояния указывает на отключение питания и необходимость сохранения состояния.

В рамках данной работы разработаны схемотехника и топология экспериментального комплекта flip-flop/scan flip-flop триггеров в традиционном исполнении и с применением методологии SRPG. Проведен сравнительный анализ по площади, быстродействию, мощности и токам утечек с триггерами из семейства библиотек КМОП 90 нм (SVT / HVT).

Наилучший результат по мощности утечки показали SRPG версии триггеров библиотеки с высоким пороговым напряжением (HVT). В среднем мощность утечки снизилась на 80 % в сравнении с базовой версией. Стоит отметить, что использование SRPG ячеек привело к увеличению площади в среднем на 15 % в сравнении с базовой версией схемотехники триггера.

В данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- разработаны экспериментальные версии SRPG flip-flop триггеров основных STD библиотек для технологии КМОП 90 нм;
- проведены анализ и оценка результатов применения SRPG методологии в части мощности утечки и занимаемой площади триггеров.

Полученные результаты являются базисом для дальнейших исследований по поиску эффективных решений по реализации схемотехники и топологии SRPG триггеров, а также в направлении применения методологи SRPG в части снижения мощности утечки для технологий 90–180 нм. В рамках данной тематики планируется разработка и исследование расширенного комплекта SRPG триггеров с разными вариантами построения схемотехники и топологии.

Литература

1. Красников Г. Я. Общая теория технологий и микроэлектроника / Г. Я. Красников, Е. С. Горнев, И. В. Матюшкин. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. –434 с. –ISBN 978-5-94836-611-1.
2. Методы снижения энергопотребления СБИС, разрабатываемых в базисе технологии КМОП 28 нм / А. Ю. Забабурин, С. А. Ильин, Д. Ю. Копейкин и др. // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-1 (119). — С. 216–220. — DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.216.220.
3. Основные принципы проектирования и методика применения многоразрядных триггеров на примере технологии КМОП 28 нм / С. А. Ильин, Д. Ю. Копейкин, О. В. Ласточкин, Д. С. Шипицин // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-1 (119). — С. 211–215. — DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.211.215.
4. Заплетина М. А. Алгоритм оптимизации энергопотребления стандартных ячеек на основе методологии Logical Effort / М. А. Заплетина, С. А. Ильин, О. В. Ласточкин // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), 2021. — № 3. — С. 34–38. — DOI: 10.31114/2078-7707-2021-3-34-38.

УДК 621.382.3

Методика комплексной валидации PDK в маршруте автоматизированного проектирования цифровых СБИС

Насибуллин К. М., Загидуллина О. Р., Надин А. С.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
knasibullin@niime.ru

Сложность создания PDK с каждым годом увеличивается. В следствии чего необходимо находить новые функциональные решения для повышения качества средств верификации. Целью данной работы является разработка и исследование подхода к автоматизированному тестированию и валидации компонентов PDK с использованием инструментов цифрового маршрут проектирования.
Ключевые слова: PDK validation; Physical Verification; DRC/LVS; Parasitic Extraction (PEX); Static Timing Analysis (STA); LEF/GDS; RTL-to-GDSII.

Integrated PDK validation methodology in the Digital VLSI computer-aided design route

Nasibullin K. M., Zagidullina O. R., Nadin A. S.
Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

The complexity of creating a PDK is increasing every year. As a result, it is necessary to find new functional solutions to improve the quality of verification tools. The purpose of this work is to develop and research an approach to automated testing and validation of PDK components using digital route design tools.
Keywords: PDK validation; Physical Verification; DRC/LVS; Parasitic Extraction (PEX); Static Timing Analysis (STA); LEF/GDS; RTL-to-GDSII.

Качество PDK напрямую влияет на результаты проектирования микросхем. Ошибки в технологических файлах могут приводить к нарушению правил проектирования при P&R, нарушение целостности сигналов и, как следствие, необходимости многократного повторения этапов перепроектирования. В связи с этим особую актуальность приобретает верификация компонентов PDK.

В существующей практике функциональное тестирование PDK ограничено рамками аналогового маршрута проектирования интегральных схем. При этом компоненты PDK, которые необходимы для цифрового маршрута проектирования, остаются вне зоны верификации, что приводит к неполноте контроля качества PDK и создает риски при разработке цифроаналоговых и цифровых ИС.

Целью данной работы является разработка комплексного подхода к тестированию компонентов PDK, которые используются для цифрового маршрута проектирования интегральных схем.

В составе PDK, могут быть выделены три ключевых компонента для цифрового маршрута, подлежащих верификации:

- технологический LEF — технологический файл, содержащий описания слоев, межслойных соединений и задающий правила размещения и трассировки (Place&Route, P&R);

- технологический файл для экстракции паразитов qrcTechFile — файл для извлечения паразитных составляющих;
- файлы сопоставления (map-файлы) — файлы отображения и сопоставления номеров и названий слоев для трансляции между различными форматами (LEF ↔ GDS и т. д.).

Предлагаемый подход к их тестированию включает следующие этапы:

- верификация: проверка корректности описания слоев, via-правил и геометрических ограничений в techlef файле.

Валидация: сравнение результатов паразитной экстракции, полученных с использованием qrcTechFile, с эталонными значениями.

Контроль map-файлов: проверка согласованности и полноты набора слоев с контролем потери или дублирования слоев.

Тестирование полного цифрового маршрута

Таким образом, предложенная методика позволяет существенно сократить трудоемкость проверки технологических данных, повысить полноту тестового покрытия и обеспечить раннее обнаружение ошибок в компонентах PDK.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41.
2. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7-8. — С. 124–128.
3. Загидуллина О. Р., Надин А. С. Исследование LDE-эффектов и методов аттестации файлов DRC для субмикронных технологий 90-28 нм // Наноиндустрия, 2020. — № S96-2. — С. 619–622.
4. Насибуллин К. М., Загидуллина О. Р., Надин А. С. Разработка системы быстрых тестов для проверки качества и функциональности файлов и инструментов PDK // Российский форум «Микроэлектроника-2024». 10-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. Москва, 2024. — С. 1100–1102.
5. Насибуллин К. М., Загидуллина О. Р., Надин А. С. Маршрут процесса верификации при проектировании современных технологических библиотек // Наноиндустрия, 2024. — Т. 17. — № S10-2 (128). — С. 793–796.

УДК 621.382

Разработка и внедрение алгоритма контроля неподключенных затворов транзисторов на этапе физической верификации топологии СБИС

Сотсков А. С., Милютин С. В., Надин А. С.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
asotskov@niime.ru, smilyutin@niime.ru, anadin@niime.ru

Разработан и внедрен алгоритм контроля неподключенных затворов транзисторов и емкостей на МОП-структуре для комплекта средств проектирования (КСП) СБИС на этапе маршрута физической верификации. Данный алгоритм позволяет выявить отсутствие подключений КМОП структур для схем памяти, стандартных ячеек и любых других аналоговых схем и повышает скорость проектирования, и качество готового изделия.
Ключевые слова: КСП; Calibre; PDK; DRC; PERC; ERC; проверка; неподключенный; IP-блок.

Development and implementation of an algorithm for checking unconnected transistor gates at the stage of physical verification of VLSI topology

Sotskov A. S., Milyutin S. V., Nadin A. S.
Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

An algorithm for checking unconnected transistor gates has been developed and implemented, taking into account the capacitances on the MOSFET structure for a set of VLSI design tools at the stage of the physical verification route. This algorithm allows you to identify all the options for not connecting CMOS structures to memory circuits, digital standard cells, and any other circuits, and increases the design speed and quality of the finished product.
Keywords: Calibre; PDK; DRC; PERC; ERC; rule; checking; floating gate; IP block.

С целью повышения качества готового изделия появляются новые требования целостности схемы на этапе разводки топологии. В КМОП структурах не допускается оставлять неподключенными входы, даже если логический элемент не используется, за исключением отдельных случаев, без которых топология становиться незавершенной. Например, при размещении КМОП транзисторов в скомпилированных ячейках памяти. Основными причинами выявления неподключенных («floating») затворов могут быть:

- накопление электростатического напряжения на затворе, где при достижении определенного потенциала может наступить пробой диэлектрического слоя, что приведет к выходу транзистора и микросхемы из строя;
- непредсказуемое поведение схемы, при котором потенциалы входов КМОП транзисторов могут иметь неопределенное состояние и могут привести к ложному переключению выходного каскада;

- риск ложных срабатываний функций блоков схемы;
- проблемы с питанием, где при отсутствии подключения входов к шине земли или питания, существует вероятность потери питания или привести к его нестабильной работе, что повлияет на функциональность устройства.

Чтобы решить эти проблемы, был разработан алгоритм проверки топологии на неподключенные затворы и внедрен в разные маршруты физической верификации, одним из которых является DRC, который позволяет уже на ранней стадии проектирования выявлять подобные ситуации. Для гарантированнного выполнения поверки необходимо внести четкое определение неподключенного затвора, по другому его еще называют как Floating Gate, в командный файл DRC. А для дополнительных условий в зависимости от назначения блока схемы могут быть сделаны исключения. Одно из требований, например, для блоков памяти — это области стока и истока транзистора, затвор которого обнаружен как Floating Gate, соединены между собой.

Для удобства проектирования, например, в случае, когда топология для какого-либо IP-блока еще на стадии разработки и не готова к размещению на верхнем уровне иерархии схемы, цепи верхнего уровня могут быть подведены, но неподключены к будущему IP.Для таких цепей вводится дополнительный механизм в файл с проверками с целью исключения ложных ошибок. С помощью существующих или дополнительных меток разработчик может исключать цепи из проверки.

Таким образом, получать на выходе более компактный отчет без фильтрации ложных ошибок вручную. Тем самым, уменьшить риск пропуска верных ошибок.

Также механизм исключения ложных ошибок по цепям с назначенными именами может быть использован для специальных применений.

В качестве альтернативы реализации данной проверки на этапе DRC был использован маршрут LVS на основе инструмента программируемых электрических проверок Calibre PERC (Programmable Electrical Rule Checking). В данном случае маршрут базируется на экстракции нетлиста из топологии, на основе которого запускаются проверки PERC.

Реализован алгоритм проверки для поиска неподключенных затворов и внедрен в DRC и PERC в составе комплекта средств проектирования для технологии КМОП 90 нм. Алгоритм позволяет гарантированно выявить все неподключенные КМОП затворы, тем самым повысить качество топологии СБИС и работоспособность конечного изделия.

Литература

1. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7–8. — С. 124–128.
2. Загидуллина О. Р., Надин А. С., Трифанихина И. Е., Шипицин Д. С. Специализированное программное обеспечение для автоматизированного тестирования и верификации PDK // Труды НИИСИ, 2019. — Т. 9. — № 4. — С. 80–84.

УДК 621.38

Разработка физически неклонируемой функции с контролируемым преобразованием пространства запросов

Коротаев Ю. А., аспирант, Певцов Е. Ф. к. т. н., директор центра проектирования
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78
korotaevyua@yandex.ru, pevtsov@mirea.ru

Разработан подход к повышению устойчивости физически неклонируемых функций (ФНФ) к моделирующим атакам на основе преобразования пространства запросов. Предложена комплексная архитектура ФНФ. Реализован прототип на ПЛИС, получены оценки устойчивости. Рассмотрена реализация СФ-блока.
Ключевые слова: физически неклонируемые функции; моделирующие атаки; ФНФ типа арбитр; аппаратная безопасность; ПЛИС.

Development of a Physical Unclonable Function with Controlled Challenge Space Transformation

Korotaev Ya. A., post-graduate student, Pevtsov E. Ph., Ph.D, Director of the Design Center
MIREA — Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia
korotaevyua@yandex.ru, pevtsov@mirea.ru

An approach to improving the resistance of physical unclonable functions (PUFs) to modeling attacks based on the transformation of the challenge space has been developed. A complex PUF architecture is proposed. A prototype has been implemented on an FPGA, and resistance estimates have been obtained. The implementation of a soft-fault (SF) block is considered.
Keywords: physical unclonable functions; modeling attacks; arbiter PUF; hardware security; FPGA.

Физически неклонируемые функции являются одним из перспективных примитивов аппаратной безопасности, применяемых для аутентификации и идентификации интегральных схем. Вместе с тем классические «сильные» ФНФ, в частности ФНФ типа арбитр, остаются уязвимыми к моделирующим атакам на основе методов машинного обучения, поскольку злоумышленник при доступе к достаточному числу пар «запрос-ответ» может построить аппроксимирующую модель их поведения [1]. В связи с этим актуальной является разработка архитектур, повышающих устойчивость ФНФ к моделированию без существенного роста аппаратных затрат.

В работе предложена архитектура ФНФ с контролируемым преобразованием пространства запросов. Ее общая структура приведена на рис. 1.

Ключевым звеном схемы преобразования запросов выбрана «слабая» ФНФ типа Butterfly [2]. Данный тип физически неклонируемой функции имеет низкие аппаратные затраты и может быть реализован как на ПЛИС, так и в заказные ИС.

ФНФ типа Butterfly выступает в роли уникального скрытого параметра *s*, с помощью которого происходит преобразование внешних запросов c_{ext} во внутренние c_{int}: $c_{int} = F(c_{int}, s)$.

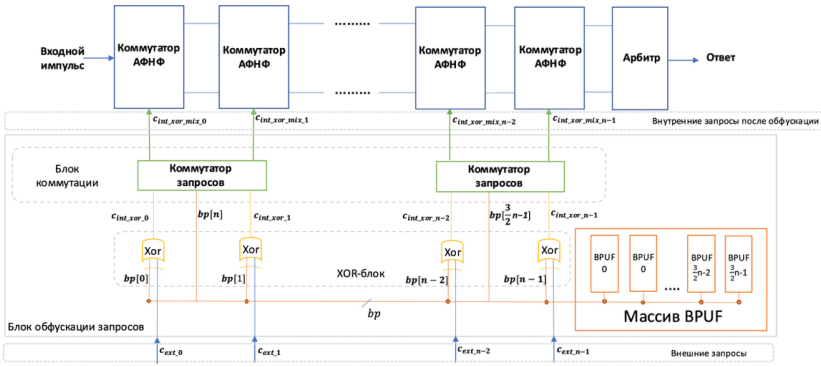


Рис. 1. Общая структура предлагаемой ФНФ

Полученный внутренний запрос поступает на основную ФНФ типа «арбитр», формирующую итоговый ответ комплексной ФНФ. Преобразование изменяет структуру отображения между внешними запросами и ответами и снижает эффективность моделирующих атак.

Для оценки эффективности предложенного подхода реализован прототип устройства на ПЛИС Xilinx/AMD серии Zynq-7000. Сформирован набор из 10^5 пар «запрос-ответ». Устойчивость оценивалась с использованием атак на основе искусственной нейронной сети (ИНС) [3] и градиентного бустинга. В качестве базового варианта для сравнения использовалась классическая ФНФ типа арбитр (АФНФ), реализованная в тех же условиях (см. табл. 1).

Таблица 1. Результаты оценки устойчивости ФНФ к моделирующим атакам.

Тип ФНФ	ИНС, точность атаки	Градиентный бустинг, точность атаки
АФНФ	0,975	0,914
ФНФ с контролируемым преобразованием пространства запросов	0,817	0,731

По сравнению с базовой архитектурой ФНФ точность атаки на основе ИНС снизилась с 97,5 % до 81,7 %, а атаки на основе градиентного бустинга — с 91,4 % до 73,1 %. Снижение составило 15,8 и 18,3 процентного пункта соответственно.

Стабильность ответов оценивалась при 10-кратной повторной подаче 10^3 одинаковых запросов при номинальных условиях работы ПЛИС. Средняя повторяемость ответов составила 95,3 %, что соответствует уровню ошибки воспроизведения 4,7 %.

Выводы

Использование «слабой» ФНФ типа Butterfly в качестве скрытого параметра преобразования запросов позволяет изменить структуру отображения «запрос-ответ» и существенно повысить устойчивость основной ФНФ типа арбитр к моделирующим атакам без значительного роста аппаратных затрат. Экспериментальная проверка на ПЛИС показала снижение точности атак на основе машинного обучения. Предложенное решение может рассматриваться как основа для дальнейшего переноса в СБИС и применения в задачах аутентификации и доверенного проектирования микроэлектронных устройств.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание для университетов № FSFZ-2026–0003) и с применением оборудования Центра коллективного пользования РТУ МИРЭА (соглашение от 01.09.2021 № 075–15-2021-689, уникальный идентификационный номер 2296.61321X0010).

Литература

1. Cao Y., Xu J., Wu J., Wu S., Huang Z., Zhang K. Advances in Physical Unclonable Functions Based on New Technologies: A Comprehensive Review // Mathematics, 2024. Vol. 12. № 1. P. 77. URL: https://doi.org/10.3390/math12010077.
2. Vatalaro M., De Rose R., Lanuzza M., Crupi F. Weak Physically Unclonable Functions in CMOS Technology: A Review // Chips, 2025. Vol. 4. № 1. P. 3. –URL: https://doi.org/10.3390/chips4010003
3. Коротаев, Ю. А. Метод исследования атак на основе машинного обучения на физически неклонируемые функции типа арбитр / Ю. А. Коротаев // Безопасность информационных технологий, 2025. — Т. 32. — № 1. — С. 85–94. — DOI: 10.26583/bit.2025.1.05. — EDN IKGBEH.

УДК 621.3.049.774.2

Разработка сложнофункционального блока асинхронного АЦП последовательного приближения

Матвеев А. В.
[1] *ООО «РИСКИ»*
299053, г. Севастополь, ул. Руднева, 41
[2] *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
artem.matveev@riscy.com

Работа посвящена разработке сложнофункционального (СФ) блока асинхронного АЦП с разрядностью 4 бит и частотой дискретизации 200 МГц по стандартной КМОП-технологии с длиной канала 28 нм. В статье приведены результаты моделирования преобразователя, а также разобраны особенности примененных при проектировании архитектурных и схемотехнических решений.
Ключевые слова: АЦП; SAR; динамический компаратор; асинхронная логика; быстродействующие преобразователи.

Matveev A. V.
[1] *RISCY LLC*
41 Rudneva St., Sevastopol, 299053
[2] *National Research Nuclear University MEPhI*
31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409
artem.matveev@riscy.com

This paper describes the development of a complex-function (CF) block of an asynchronous ADC with a 4-bit resolution and a 200 MHz sampling frequency using standard CMOS technology with a 28 nm channel length. The article presents the results of converter simulation and discusses the architectural and circuit design features used in the design.
Keywords: ADC; SAR; dynamic comparator; asynchronous logic; high-speed converters.

За последние годы одной из ключевых тенденций в области аналого-цифрового преобразования стала разработка быстродействующих АЦП с частотами дискретизации в свыше 100 МГц [1] (вплоть до единиц и десятков ГГц), ориентированных на применение в приемных трактах и высокоскоростных интерфейсах. АЦП для данных систем требуют сочетания высокой скорости, низкой и средней разрядности, а также масштабируемости в субмикронных КМОП-технологиях. Для реализации таких требований в рамках разрабатываемого для приемного тракта 12-битного АЦП с частотой дискретизации 200 МГц была выбрана архитектура конвейерного АЦП последовательного приближения (Pipeline-SAR), обеспечивающая компромисс между быстродействием, энергопотреблением и сложностью реализации при заданном быстродействии [2]. Данная работа посвящена разработке сложнофункционального (СФ) блока, являющегося ядром одного из каскадов указанного АЦП и определяющего его ключевые характеристики.

На рис. 1 изображена структурная схема разработанного СФ-блока.

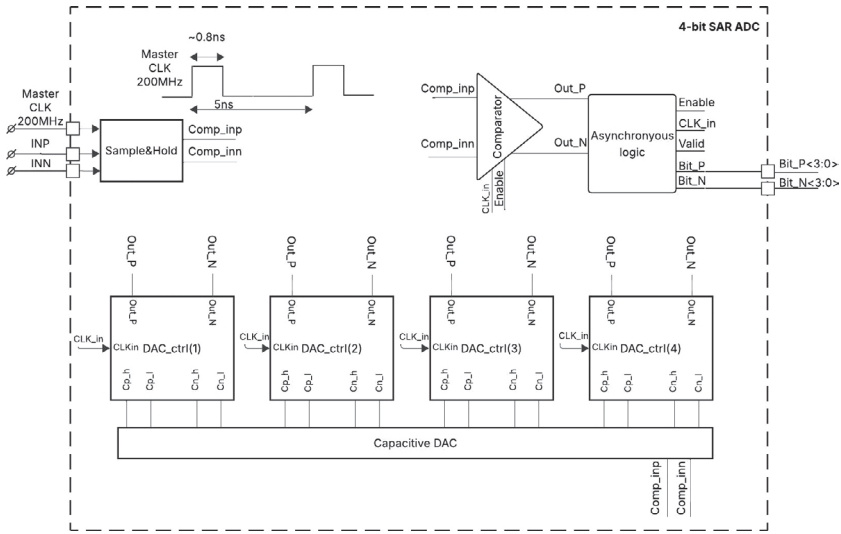


Рис. 1. Структурная схема разработанного асинхронного АЦП последовательного приближения

Разрабатываемый СФ-блок реализуется в стандартной КМОП-технологии 28 нм, ориентирован на работу с частотой дискретизации 200 МГц и представляет собой АЦП последовательного приближения с разрядностью 4 бита. Основными требованиями к блоку являются высокая линейность, динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих и устойчивость к технологическим и температурным вариациям. Важной особенностью данного АЦП является его асинхронность — основной контур, реализующий алгоритм последовательного приближения (компаратор — цифровая логика — ЦАП) сам генерирует тактовый сигнал для компаратора, тем самым:

1) Не требует дополнительного внешнего высокочастотного (>1 ГГц) тактового сигнала, только сигнал управления схемой выборки хранения, частотой 200 МГц.

2) Максимальная реализуемая частота работы данного АЦП ограничена лишь скоростью срабатывания компаратора и временем установления старшего значащего разряда на емкостном ЦАП [3]. Поэтому особое внимание было уделено оптимизации переключаемых емкостей и правильной настройке временных характеристик и задержек схемы асинхронной логики АЦП.

Результаты моделирования разработанного АЦП подтверждают его соответствие заданным требованиям. Проведены временные и спектральные анализы, а также исследовано влияние вариаций технологических параметров и температурных условий (PVT-анализ). Полученные характеристики демонстрируют работоспособность блока в составе конвейерного АЦП последовательного приближения с частотой дискретизации 200 МГц и возможность его использования

в многоканальных системах АЦП, использующих технику временного перемежения (time-interleaving).

Литература

1. B. Murmann, “ADC Performance Survey 1997-2022,” [Online]. Available: https://github.com/bmurmann/ADC-survey.
2. J. Zhao, Z. Huang and X. Hou, “A 10-bit 50-MS/s Asynchronous SAR ADC in 65 nm CMOS,” 2022 IEEE 14th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT), Chongqing, China, 2022. P. 225–229. DOI: 10.1109/ICAIT56197.2022.9862761.
3. H. Karrari, P. Andreani and S. Tan, “Asynchronous vs Synchronous SAR ADCs — Performance Beyond Nominal Speed,” 2024 19th Conference on Ph.D Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), Larnaca, Cyprus, 2024. P. 1–4. DOI: 10.1109/PRIME61930.2024.10559690.

УДК 004.3`1

Анализ эффективности Cell-Aware Test для детектирования дефектов в СнК в сравнении с традиционными методами (Scan, LBIST)

Лобачева К. С.[1,2], Парсегова В. С.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
lobacheva.ks@phystech.edu
[2] ПАО «Сбербанк»
121170, г. Москва, Кутузовский пр-т, 32 кА

В работе представлен анализ эффективности методологии Cell-Aware Test (CAT) для детектирования дефектов в СнК в сравнении с традиционными методами тестирования — сканированием (Scan) и логическим встроенным самотестированием (LBIST).
Ключевые слова: тестирование интегральных схем; дефекты; DFT; Scan; LBIST; Cell-Aware Test.

Analysis of the Effectiveness of Cell-Aware Test for Detecting Defects in SoCs in Comparison with Traditional Methods (Scan, LBIST)

Lobacheva K. S.[1,2], Parsegova V. S.[2]
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
lobacheva.ks@phystech.edu
[2] Sberbank PJSC
32A Kutuzovsky Ave., Moscow, 121170, Russia

This paper presents an analysis of the effectiveness of the Cell-Aware Test (CAT) methodology for detecting defects in SoCs in comparison with traditional testing methods — Scan and Logic Built-In Self-Test (LBIST).
Keywords: integrated circuit testing; defects; DFT; Scan; LBIST; Cell-Aware Test.

С развитием микроэлектроники процесс изготовления микросхем усложняется, повышается плотность дефектов и падает выход годных. Обеспечить надежное тестирование готовых устройств помогает Design for Testability (DFT) — набор концепций и методов, направленных на упрощение процесса тестирования интегральной схемы.

Традиционными методами DFT являются сканирование (Scan) и логическое встроенное самотестирование (LBIST). Scan — методология DFT, заменяющая обычные триггеры на сканируемые и объединяющая их в скан-цепи, что позволяет загружать тестовые векторы с внешнего ATE и выводить отклики для сравнения с эталоном. LBIST — встроенное самотестирование, при котором генерация паттернов и анализ откликов выполняются на кристалле без участия внешнего

тестера. Эти методы направлены на детектирование дефектов на границах ячеек и выявляют внутренние дефекты лишь косвенно [1]. Однако, с уменьшением технологии стандартные ячейки значительно усложняются, что существенно повышает вероятность возникновения производственных дефектов внутри них [1]. Методология Cell-Aware Test (CAT) использует аналоговое моделирование для целенаправленного выявления транзисторных дефектов и неисправностей типа обрыв/замыкание внутри ячеек [1–4].

Принцип методологии заключается в следующем: в место возможного дефекта вводится соответствующая неисправность (дополнительное сопротивление, короткое замыкание или изменение параметров транзистора) и выполняется симуляция при всех возможных тестовых воздействиях. Результат симуляции сравнивается с поведением ячейки без дефектов. На основе полученных данных для каждой ячейки формируется матрица обнаружения дефектов, кодирующая соответствие между тестовыми паттернами и выявляемыми ими дефектами [1–4].

В работе представлен анализ эффективности методологии CAT для детектирования дефектов в СнК в сравнении с традиционными методами тестирования Scan и LBIST.

Результаты сравнения демонстрируют, что CAT сокращает долю недетектируемых неисправностей на 80–90 % по сравнению с ATPG (Automatic Test Pattern Generation) на основе Scan (рис. 1) и LBIST-методом, использующим генерацию псевдослучайных паттернов. Однако повышение полноты тестирования достигается ценой увеличения временных затрат на тестере. Для CA-тестирования требуется на 30–50 % больше тестовых последовательностей по сравнению с ATPG на основе Scan, что пропорционально увеличивает время тестирования на ATE, в то время как LBIST открывает возможность автономного тестирования без внешнего оборудования.

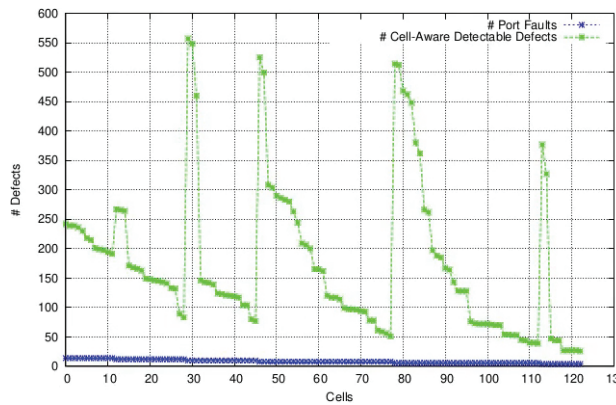


Рис. 1. Сравнение количества дефектов, детектируемых классическими ATPG и CA-ATPG

Данная работа демонстрирует необходимость перехода к гибридным стратегиям тестирования, сочетающим традиционные методы с Cell-Aware подходом.

Это поможет обеспечить баланс между качеством тестирования и тестовыми затратами.

Литература

1. Gao, Z., Hu, M.-C., Baert, R., Chehab, B., Swenton, J., Malagi, S., Huisken, J., Goossens, K., & Marinissen, E. J. (2024). Cell-Aware Test on Various Circuits in an Advanced 3-nm Technology. IEEE Design and Test, 41(2), 56-64.
2. Friedrich Hapke, Member, IEEE, Wilfried Redemund, Member, IEEE, Andreas Glowatz, Member, IEEE, Janusz, Rajski, Fellow, IEEE, Michael Reese, Member, IEEE, Marek Hustava, Martin Keim, Member, IEEE, Juergen Schloeffel, Member, IEEE, and Anja Fast. Cell-Aware Test. IEEE Transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems, 2014. Vol. 33. № 9.
3. Martin Rowe. Cell-aware ATPG test methods improve test quality. Test & Measurement World, 2012.
4. Z. Gao et al., Defect-location identification for cell-aware test. IEEE Latin Amer. Test Symp. (LATS), Mar. 2019. P. 1–6.

УДК 621.3.049.771.14

Разработка высоковольтной библиотеки стандартных цифровых элементов для проектирования микроконтроллеров со сверхнизким энергопотреблением

Ермаков И. В., Исаченко Д. А., Алферов В. А., Михеев А. Д., Макеев Г. А., Демин К. П.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В базисе отечественной технологии КМОП 180 нм (CMOSF8) разработана библиотека стандартных цифровых элементов, содержащая 580 ячеек, для проектирования микроконтроллеров со сверхнизким энергопотреблением (ultra-low power) и неотключаемым (always-on) высоковольтным доменом питания.
Ключевые слова: КМОП; библиотека стандартных цифровых элементов; сверхнизкое энергопотребление; высоковольтный неотключаемый домен питания.

Development of a High-Voltage Standard Cell Library for Ultra-Low-Power Microcontroller Design

Ermakov I. V., Isachenko D. A., Alferov V. A., Mikheev A. D., Makeev G. A., Demin K. P.
Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

Based on the domestic 180 nm CMOS process (CMOSF8), a standard cell library containing 580 cells was developed for the design of ultra-low-power microcontrollers with a high-voltage always-on power domain.
Keywords: CMOS; standard cell library; ultra-low power; high-voltage always-on power domain

Библиотека стандартных цифровых элементов (SC Lib) [1] представляет собой набор ячеек комбинационной и последовательностной логики, применяемый в цифровом маршруте проектирования заказных микросхем (ASIC) и систем на кристалле (SoC). Обычно такие библиотеки разрабатываются для работы с низким напряжением питания, формируемым из более высокого напряжения за счет линейного стабилизатора (LDO). Ключевой особенностью энергоэффективных устройств IoT [2] и носимой электроники с большим сроком автономной работы является длительное пребывание в режиме глубокого сна (deep sleep) с током потребления порядка единиц мкА [3], в котором активными остаются лишь блоки неотключаемого домена питания. Применение LDO в данном случае создает дополнительные потери энергии, существенно снижая общую энергоэффективность устройства. Решением проблемы является разработка специализированной высоковольтной библиотеки (HV SC Lib), способной напрямую работать в неотключаемом (always-on) домене питания. Это позволяет исключить LDO и существенно повысить энергоэффективность, открывая новые возможности для проектирования микроконтроллеров со сверхнизким энергопотреблением (ultra-low power).

В базисе отечественной технологии КМОП 180 нм (CMOSF8) разработана библиотека стандартных цифровых элементов CORELIB8DHV, содержащая полный

комплект файлов для цифрового маршрута проектирования. Библиотека включает 580 ячеек, среди которых: комбинационные элементы AND, NAND, OR, NOR, XOR, XNOR с числом входов от 2 до 4, составные логические элементы AND-OR с числом входов от 3 до 6, буферы, инверторы, мультиплексоры 2 в 1, полусумматоры, 1- и 2-разрядные полные сумматоры, защелки LATCH и триггеры FLIP-FLOP, элементы стробирования тактового сигнала, преобразователи уровней напряжения, филлеры. В библиотеке реализованы ячейки с нагрузочной способностью от X1 до X32. Для каждого элемента разработаны представления schematic, symbol, layout и abstract.

Отдельные этапы маршрута разработки библиотеки автоматизированы с использованием скриптов на языках SKILL, Bash и Tcl. Характеризация ячеек проводилась в различных PVT-углах при разбросе технологии Slow (SS), Typical (TT) и Fast (FF), напряжении питания от 1,65 до 3,6 В и температуре от −60 до 125 °C. При минимальном напряжении питания 1,65 В и разбросе технологии Slow была выявлена температурная инверсия временных характеристик. Верификация результатов характеризации выполнена с использованием двух независимых подходов, включающих сопоставление данных логического (gate-level) и SPICE-моделирования для тестовых схем из наборов ISCAS'85/89, а также статический временной анализ (STA).

Разработанная библиотека прошла апробацию, на ее основе спроектирован блок часов реального времени (RTC) для микроконтроллера со сверхнизким энергопотреблением. Проведено сравнение тока потребления устройства при использовании разработанной высоковольтной библиотеки, а также при альтернативной реализации на базе низковольтной библиотеки и LDO.

Литература

1. Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., Шипицин Д. С. Сравнительный анализ параметров стандартных цифровых элементов на примере библиотек в базисе технологии КМОП 28 нм // Наноиндустрия, 2020. –Т. 13. — № S5-2(102). –С. 308–310.
2. Михайлов В. Ю., Котляров Е. Ю., Зубов И. А., Нуйкин А. В., Кравцов А. С. Аспекты проектирования приемо-передающего устройства «Интернета вещей» // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2020. — № 4 (180). –С. 43–57.
3. Редон М., Русских М. Микроконтроллеры со сверхнизким энергопотреблением: маркетинговый ход или реальность? // Компоненты и технологии, 2018. — № 4 (201). –С. 72–76.

УДК 621.3.049

Сложнофункциональный блок источника опорных напряжения и тока типа bandgap в технологии 65 нм

Головин И. О., Громов И. С., Ямалиев С. И., Лобанков Д. С.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
IOGolovin@mephi.ru

Представлена разработка сложнофункционального блока источника опорных напряжения и тока типа bandgap, реализованного в КМОП-технологии 65 нм. Предлагаемая схема обеспечивает формирование стабильных опорных параметров с низкой чувствительностью к температурным, технологическим и параметрическим разбросам. Температурная компенсация достигается за счет суммирования компонент с отрицательным и положительным температурными коэффициентами. Приведены результаты схемотехнического моделирования и анализа после экстракции топологии. Показано, что температурная нестабильность не превышает 1 %, а чувствительность к изменению напряжения питания составляет не более ±1,5 %. Результаты моделирования методом Монте-Карло подтверждают устойчивость схемы к mismatch-разбросам, а применение цифровой подстройки позволяет повысить точность выходных параметров.
Ключевые слова: bandgap; источник опорного напряжения; источник опорного тока; КМОП 65 нм; температурная компенсация; цифровая подстройка.

On-Chip Functional Block of a Bandgap Reference for Voltage and Current in 65 nm CMOS Technology

Golovin I. O., Gromov I. S., Yamaliev S. I., Lobankov D. S., Dvinskikh P. D.
National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia
IOGolovin@mephi.ru

This work presents the development of an on-chip functional block of a bandgap reference implemented in 65 nm CMOS technology. The proposed circuit provides stable reference voltage and current with low sensitivity to temperature, process, and mismatch variations. Temperature compensation is achieved by combining components with complementary temperature coefficients. Simulation results and post-layout analysis are presented. It is shown that the temperature variation of the output parameters does not exceed 1 %, while the supply voltage sensitivity is within ±1.5 %. Monte Carlo simulation confirms the robustness of the circuit against mismatch variations, and the use of digital trimming improves the accuracy of the output parameters.
Keywords: bandgap reference; voltage reference; current reference; 65 nm CMOS; temperature compensation; digital trimming.

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания стабильных источников опорных сигналов для современных интегральных схем, функционирующих в условиях пониженного напряжения питания и значительных технологических

разбросов. В глубоких субмикронных КМОП-технологиях традиционные схемы bandgap требуют модификации архитектуры для обеспечения корректной работы и сохранения точностных характеристик. Использование специализированных схемотехнических решений позволяет расширить диапазон рабочих напряжений и повысить устойчивость к внешним воздействиям [1].

Разработан сложнофункциональный блок источника опорных напряжения и тока, включающий ядро bandgap, операционный усилитель, систему токовых зеркал и схему запуска. Операционный усилитель обеспечивает выравнивание потенциалов и равенство токов в симметричных ветвях схемы. Система токовых зеркал реализует масштабирование и формирование выходного тока. Схема запуска обеспечивает выход из метастабильных состояний и перевод схемы в рабочую точку.

Формирование опорных параметров осуществляется за счет суммирования компонент с отрицательным (CTAT) и положительным (PTAT) температурными коэффициентами. Применение резистивного делителя напряжения база–эмиттер позволяет снизить внутренние уровни напряжения, что расширяет диапазон допустимых напряжений питания [2].

Проведено моделирование с учетом температурного диапазона 10–40 °C, изменения напряжения питания в диапазоне 0,95–1,05 В, а также технологических (process) и параметрических (mismatch) разбросов. Получены следующие характеристики:

1) температурная нестабильность напряжения и тока — менее 1 %;
2) чувствительность к напряжению питания — ±1,5 %;
3) среднее значение опорного напряжения — ~506 мВ;
4) средний выходной ток — ~995 нА;
5) разброс по результатам Монте-Карло (3σ) — ~8,5 мВ и ~15 нА.

Проведен анализ до и после применения цифровой подстройки, показавший снижение разбросов выходных параметров. Расхождение результатов схемотехнического и посттопологического моделирования не превышает 1,3 %.

Разработанный сложнофункциональный блок демонстрирует устойчивую работу и высокую стабильность параметров. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенных схемотехнических решений и возможность их применения в составе аналоговых и смешанных интегральных схем. Перспективы работы связаны с экспериментальной верификацией и дальнейшей оптимизацией параметров.

Литература

1. Y. Osaki, T. Hirose, N. Kuroki and M. Numa, “1.2-V Supply, 100-nW, 1.09-V Bandgap and 0.7-V Supply, 52.5-nW, 0.55-V Subbandgap Reference Circuits for Nanowatt CMOS LSIs,” // IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 48. №6. P. 1530–1538, June 2013. DOI: 10.1109/JSSC.2013.2252523.
2. Hazucha, P., Moon, S.T., Schrom, G. et al. (2007) Low-voltage, buffered bandgap reference with selectable output voltage US Patent Number 7274250.

УДК 621.3.049

Система формирования опорных токов и напряжений на базе 10-битных ЦАП для многоканальных микросхем считывания

Двинских П. Д., студент, Норманов Д. Д., инженер-исследователь, Аткин Э. В., к. т. н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
PDDvinskikh@mephi.ru, DDnormanov@mephi.ru, EVAtkin@mephi.ru

Развитие технологии многоканальных микросхем считывания обусловило значительный прогресс в области физики элементарных частиц и медицинской диагностике, заняв центральное место в разработке современных матричных детекторов для систем трекинга и медицинских исследований. В связи с этим появляется необходимость в увеличении пространственного разрешения матричных приемников посредством уменьшения размеров каналов микросхем. Для считывающих каналов матрицы критически важным является вопрос точной и стабильной подстройки опорных токов и напряжений аналоговых блоков. В статье описана разработка системы формирования опорных токов и напряжений на базе 10-битных цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) для многоканальной интегральной микросхемы (ИМС). Особенностью разработки является адаптация системы подстроечных ЦАП на работу с одним общим источником опорного напряжения (ИОН). Такой подход позволяет минимизировать занимаемую площадь на кристалле до 0,61 мм^2 и снизить потребляемую мощность системы ЦАП до 0,6 мВт. Проектирование выполнялось по технологии КМОП с проектной нормой 65 нм и включало в себя схемотехническую и топологическую разработку, а также верификацию системы формирования опорных токов и напряжений в составе ИМС.
Ключевые слова: аналоговый тракт; многоканальные приемники; подстроечные ЦАП; IR-drop анализ; смешанное моделирование; КМОП-технология.

Reference current and voltage generation system based on 10-bit DACs for multichannel readout chips

Dvinskikh P. D., student, Normanov D. D., research engineer, Atkin E. V., Ph.D
National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia
PDDvinskikh@mephi.ru, DDnormanov@mephi.ru, EVAtkin@mephi.ru

The advancement of multichannel readout integrated circuit technology has driven significant progress in the fields of elementary particle physics and medical diagnostics, establishing itself as a cornerstone in the development of modern pixel detectors for tracking systems and medical imaging applications. This progress necessitates an increase in the spatial resolution of array sensors by reducing the pitch of readout channels. For the readout channels of such arrays, precise and stable tuning of bias currents and voltages in analog blocks is of critical importance. This paper describes the development of a bias current and voltage generation system based on 10-bit digital-to-analog converters (DACs) for a multichannel integrated circuit (IC). A distinctive feature of the

design is the adaptation of the trimming DAC system to operate with a single common voltage reference source. This approach minimizes the occupied die area to 0.61 mm² and reduces the power consumption of the DAC system to 0.6 mW. The design was implemented in a 65-nm CMOS technology and included circuit design, layout development, and verification of the bias generation system within the IC.

Keywords: analog front-end; multichannel readout; trimming DACs; IR-drop analysis; mixed-mode simulation; CMOS technology.

Достижения в области КМОП-технологии открывают новые возможности в области создания многоканальных детекторов. Одним из направлений является обеспечение оптимального сочетания технологии соединения матрицы сенсоров с ИМС и последующей конструктивной реализацией устройства. Ценность ИМС для таких многоканальных приемников обусловлена их важнейшими преимуществами: высокой степенью интеграции, быстродействием, низким энергопотреблением и стоимостью.

Развитие технологии ИМС обусловило значительный прогресс в области физики элементарных частиц, заняв центральное место в разработке современных многоканальных детекторов для систем трекинга. Также многообещающим направлением является развитие детекторов, способных вести подсчет отдельных фотонов с разрешением в один пиксель, что открывает новые горизонты для научной и медицинской диагностики.

Всю область многоканальной ИМС можно разделить на две части: пиксельную и периферийную (рис. 1). Система формирования опорных токов и напряжений, расположенная в составе периферийной части и включающая в себя набор подстроечных ЦАП, обеспечивает необходимую функцию генерации и точной стабилизации опорных токов и напряжений, необходимых для функционирования всех аналоговых узлов многоканальной ИМС [1]. Система формирования должна: задавать согласованное смещение компараторов, выставлять пороги дискриминации компараторов, формировать потенциалы и опорные токи для зарядо-чувствительного усилителя (ЗЧУ), усилителя-формирователя (УФ) и межблочных буферных усилителей, а также обеспечивать работу инжекционной системы и блока калибровки.

При проектировании системы формирования опорных напряжений и токов необходимо учитывать, что наличие множества параллельных обрабатывающих каналов вносит ряд негативных эффектов. К числу основных факторов, искажающих установочные параметры, относятся перекрестные помехи между каналами, паразитные параметры длинных интеркоммуникационных линий, эффекты обратного выброса (kick-back), а также омическое падение напряжения (IR-drop) на межсоединениях [2]. Совокупное влияние данных факторов способно привести к отклонению рабочих токов и напряжений аналоговых трактов от заданных номиналов.

Для задания и подстройки токов и напряжений считывающих каналов, в системе формирования используется несколько видов ЦАП. С учетом особенностей текущего примера ИМС используется 2 вида ЦАП с токовым и напряженческим выходами. На рис. 2 показаны электрические схемы используемых для подстройки 10-битных токового и напряженческого ЦАП.

Ограничение конечного выходного сопротивления из-за низкого рабочего диапазона напряжений (в данной технологии 1 В) требует использования каскодной архитектуры ЦАП [3].

Схема смещения выполняет две функции: формирует напряжение для каскодного транзистора и задает стабильное по температуре, напряжению питания и технологическим разбросам значение тока, соответствующего младшему значащему биту в токовой ячейке ядра ЦАП. Эта схема является составной частью выходного каскада ИОН и встроена непосредственно в каждый ЦАП. Такое решение позволяет повысить нагрузочную способность ИОН и обеспечить стабильность его работы при подключении нагрузки в виде 15 ЦАП.

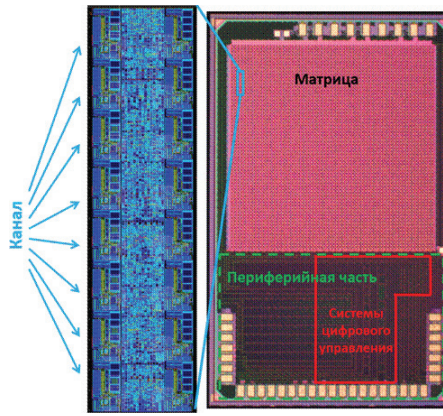
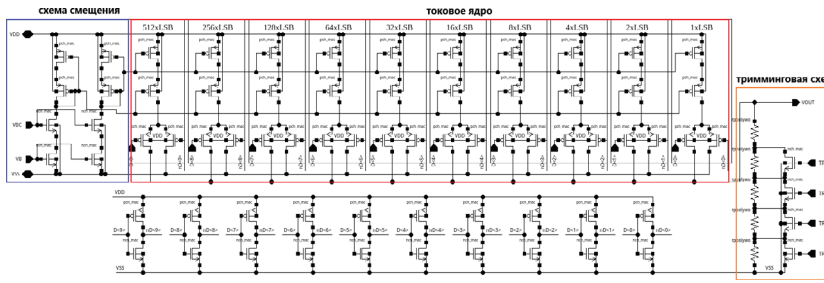


Рис. 1. Расположение системы цифрового управления в ИМС

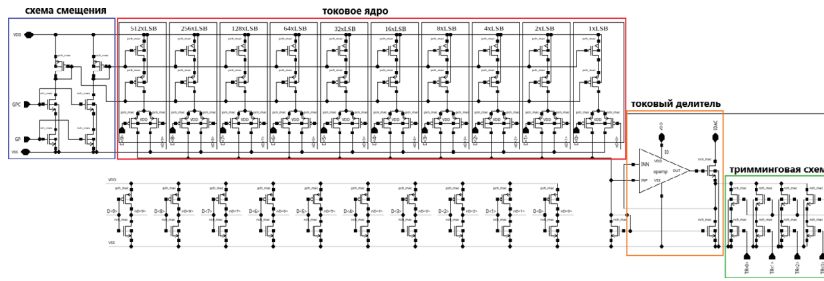
Для снижения выходного тока матрицы до необходимого уровня после ядра ЦАП установлена схема токового делителя, выполненная в виде токового зеркала с активным регулированием. Высокая линейность такого токового делителя достигается путем выравнивания стоковых потенциалов токоделительных транзисторов с помощью операционного усилителя (ОУ) с большим коэффициентом усиления. Ключевым преимуществом такого решения является способность работать при низком входном напряжении согласования при сохранении высокой точности деления тока.

Вышеописанные ЦАП являются неотъемлемой и важной частью глобальной системы формирования опорных токов и напряжений для всей считывающей матрицы, поэтому вопросы их системной интеграции занимают отдельный этап разработки. На этапе смешанного моделирования взаимодействия ЦАП с пиксельной матрицей возникает целый ряд новых эффектов, которые невозможно обнаружить при анализе только отдельного блока: перекрёстные помехи между различными аналоговыми и цифровыми функциональными узлами в глобальной части кристалла, проблемы электромагнитной совместимости, влияние паразитных параметров длинных межсоединительных линий, а также нежелательные пролазы со стороны самой матрицы. Поэтому для функционирования всей СИМС разработка

ЦАП на уровне всей системы становится задачей, не менее сложной и значимой, чем проектирование ЦАП как отдельностоящего блока.



а



б

Рис. 2. Схема 10-битного (*а*) напряженческого (*б*) токового ЦАП

Моделирование системы формирования опорных токов и напряжений, включающей в себя набор из 25 подстроечных ЦАП, проводилось на примере матричной ИМС, имеющей 32×32 независимых пикселей. Каждый ЦАП подключён к матрице через межблочный буферный усилитель для повышения нагрузочной способности и уменьшения пролазов со стороны пиксельной части. на выходе каждого ЦАП предусмотрен фильтрующий конденсатор для подавления высокочастотных помех и обеспечения устойчивости работы схемы. Кроме того, в состав окружения входит ИОН, который задает величину младшего значащего разряда для ЦАП. Некоторые ЦАП являются частью инжекционной и тестовой подсистемы, что позволяет использовать их для формирования управляющих сигналов и калибровки через контактную площадку.

Выводы

Предложена разработка системы формирования опорных токов и напряжений для многоканальных микросхем считывания на примере матричной ИМС. Установлено, что предложенная архитектура системы формирования обеспечивает устойчивую и точную цифровую подстройку опорных токов и напряжений при совместном функционировании всех периферийных блоков в составе микросхемы.

В ходе данного исследования в технологии КМОП 65 нм рассматривается влияние паразитных затворных токов утечки на схему формирования ЦАП и делается вывод о влиянии тока МЗР на величину этой утечки. Также освещается вопрос выбора разрядности ЦАП, необходимый для детектирования минимального заряда блоком компараторов. В данной работе предложены и реализованы схемотехнические и топологические схемы подстроечных ЦАП с МЗР = 10 нА для токового и МЗР = 809 мкВ для напряженческого ЦАП при разрядности N = 10 бит. Выполнена комплексная верификация ЦАП в составе микросхемы матричного приемника, позволившая определить основные статические и динамические параметры. На основе схемотехнических решений разработана топология обоих видов ЦАП с размещением токовых ячеек по методу массива с общим центром. Занимаемая площадь на кристалле составляет 0,014 и 0,015 мм^2 для токового и напряженческого ЦАП соответственно. Проведено моделирование с экстракцией паразитных параметров, подтвердившее корреляцию с исходными схемами на уровне 98–99 %.

Описана интеграция разработанных ЦАП в систему формирования опорных токов и напряжений, а также проведено смешанное моделирование этой системы на примере матричной СИМС. Общее потребление системы формирования опорных токов и напряжений составило 0,6 мВт при занимаемой площади 0,61 мм^2.

Исследование выполнено за счет контракта № 39-3-25-44-771 между НИЦ «Курчатовский институт» и НИЦ «Курчатовский институт» –НИИСИ.

Литература

1. Fornaini A. X-ray imaging and readout of a TPC with the Medipix CMOS ASIC, 2005.
2. Atkin E.V. «Trends in integrated circuit design for particle physics experiments» // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2017. Vol. 798. № 1. P. 012204.
3. Yu C.H. et al. A 90 nm 10-bit 1GS/s current-steering DAC with 1-V supply voltage // 2008 IEEE International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT). IEEE, 2008. P. 255–258.

УДК 621.382

Разработка и оптимизация дискриминатора для многопороговых гибридных пиксельных детекторов в 65 нм КМОП

Лобанков Д. С., Ямалиев С. И., Аткин Э. В., Головин И. О., Громов И. С.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
DSLobankov@mephi.ru

В работе представлены методы разработки и оптимизации дискриминаторов для многопороговых гибридных пиксельных детекторов. Выбрана архитектура токового компаратора, устойчивая к паразитным утечкам затвора порядка единиц нА, характерным для технологии 65 нм КМОП с опцией General Purpose.
Ключевые слова: гибридный пиксельный детектор; дискриминатор; утечки затвора; 65 нм КМОП; низкое энергопотребление.

Development and optimization of a discriminator for multi-threshold hybrid pixel detectors in 65 nm CMOS

Lobankov D. S., Yamaliev S. I., Atkin E. V., Golovin I. O., Gromov I. S.
National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia
DSLobankov@mephi.ru

This paper presents design and optimization methodologies for discriminators in multi-threshold hybrid pixel detectors. A current-comparator architecture was selected for its robustness against parasitic gate leakages on the order of nanoamperes, which are characteristic of the 65 nm General Purpose CMOS process option.
Keywords: hybrid pixel detector; discriminator; gate leakage; 65 nm CMOS; low power consumption.

Переход к спектрометрическому режиму требует интеграции нескольких независимых каналов дискриминации в одной пиксельной ячейке, что ужесточает ограничения по площади и энергопотреблению аналогового тракта [1]. В технологии 65 нм КМОП общего назначения токи утечки затвора достигают единиц наноампер, что сопоставимо с рабочими токами схемы и вызывает значительный разброс порогов срабатывания. Для подавления данного эффекта при разработке применена топология сравнения токов с выходным каскадом в виде защелки Траффа [2]. В ходе оптимизации скорректированы соотношения W/L ключевых транзисторов, в критических узлах применены устройства с высоким пороговым напряжением (HVT), а режим смещения адаптирован для стабилизации потенциала узла сравнения. Принципиальная схема дискриминатора приведена на рис. 1.

Входной сигнал формируется зарядочувствительным предусилителем (ЗЧУ) с коэффициентом преобразования 30 мВ/кэ$^{-}$. Моделирование в САПР методом Монте-Карло подтверждает эффективность предложенных решений. Среднеквадратичный разброс порога снижен до $\sigma = 6{,}33$ мВ, что эквивалентно

0,21 кэ$^-$ ($3\sigma \approx 0{,}63$ кэ), и полностью укладывается в диапазон коррекции попиксельного 5-битного токового ЦАП (шаг ~2,2 мВ, диапазон ±35 мВ). Время срабатывания при входном сигнале 1 кэ составляет 14,5 нс. Потребляемый статический ток покоя не превышает 900 нА при напряжении питания 1,0 В. Занимаемая площадь −180 мкм² на канал, что обеспечивает возможность интеграции четырех независимых каналов в пиксельной ячейке 75×75 мкм^2. Анализ в углах PVT (углы TT/FF/SS, напряжение питания 0,9−1,1 В, температура 0−80 °C) демонстрирует устойчивую работу с отклонением задержки не более 40 % от типичных значений.

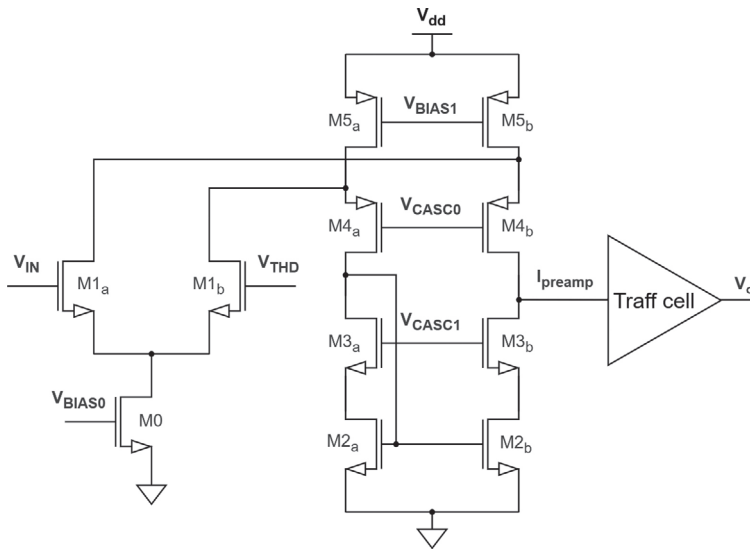


Рис. 1. Принципиальная схема дискриминатора

Предложенный подход обеспечивает надежную работу спектрометрического пикселя в условиях технологических ограничений 65 нм КМОП. По удельной мощности и плотности каналов решение сопоставимо с архитектурой Medipix3, превосходя их по гибкости калибровки порогов. Результаты оптимизации дискриминатора лягут в основу проектирования полного аналогового тракта спектрометрического пикселя, включая зарядочувствительный предусилитель.

Литература

1. R. Ballabriga, J. Alozy, M. Campbell, E. Fröjdh, E. H. M. Heijne, T. Koenig, X. Llopart, J. Marchal, D. Pennicard, T. Poikela, L. Tlustos, P. Valerio, W. Wong, and M. Zuber, “Review of hybrid pixel detector readout ASICs for spectroscopic X-ray imaging,” J. Instrum. Vol. 11. P01007, Jan. 2016. DOI: 10.1088/1748-0221/11/01/P01007.
2. H. Traff, “Novel approach to high speed CMOS current comparators,” Electron. Lett. Vol. 28. № 3. P. 310−312, 1992.

УДК 621.3.049.77:621.382

Разработка тестового кристалла ReRAM

Ермаков И. В., Демин К. П., Исаченко Д. А.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Комплект средств проектирования (PDK) КМОП КНИ 350 нм адаптирован под технологию ReRAM. Разработана топология тестового кристалла 10×10 мм, содержащая 166 групп тестовых элементов (TEG), 22 матрицы 32×32 и 16×32, модуль с блоками записи и считывания и блок памяти ReRAM 70×8.
Ключевые слова: КМОП; КНИ; резистивная память; мемристор; тестовый кристаллDK.

Design of a ReRAM Test Chip

Ermakov I. V., Demin K. P., Isachenko D. A.
Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

The PDK for the 350 nm CMOS SOI process was adapted for ReRAM technology. A 10×10 mm test chip layout containing 166 test element groups (TEGs), twenty-two 32×32 and 16×32 memory arrays, a module with read/write blocks, and a 70×8 ReRAM memory block was designed.
Keywords: CMOS; SOI; ReRAM; memristor; test chip; PDK.

Резистивная память (ReRAM) –это одна из перспективных технологий энергонезависимой памяти с произвольным доступом, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с EEPROM [1]. В настоящей работе проводится комплексное исследование технологии ReRAM с элементом хранения (ЭХ), выполненным до первого слоя металлизации в цикле FEOL [2].

В рамках исследования авторами была разработана топология тестового кристалла ReRAM 10×10 мм с группами тестовых элементов (TEG) и модулями ReRAM (рис. 1). Разработка выполнялась с использованием комплекта средств проектирования (PDK) для отечественной технологии КМОП КНИ 350 нм, адаптированного под особенности ReRAM. В состав PDK были добавлены 10 новых слоев, 5 приборов ReRAM, 111 правил DRC и правила LVS для экстракции приборов ReRAM и их параметров из топологии, а также модифицирована программа генерации фигур заполнения.

С целью поиска оптимального конструктивного исполнения ЭХ и ячейки памяти ReRAM было спроектировано 166 групп тестовых элементов (TEG), содержащих различные варианты дискретных ЭХ, ячеек и матриц 3×4.

Для исследования ячеек памяти в составе массива было спроектировано 22 модуля 1,657×1,657 мм. Каждый из них, помимо контроллера цифрового последовательного интерфейса и 12 контактных площадок, содержит матрицу 32×32 или 16×32 с конкретным вариантом конструктивного исполнения ячеек ReRAM, блок ограничения тока записи, а также аналоговые мультиплексоры для адресации строк и столбцов матрицы.

Также было разработано два модуля 1,9×1,9 мм, каждый из которых оснащен 16 контактными площадками и контроллером цифрового последовательного интерфейса для конфигурации режимов работы, ввода данных и адресации. Первый модуль содержит исключительно периферийные блоки записи и считывания со вспомогательными схемами, что позволяет проводить автономное тестирование независимо от массива ячеек памяти. Второй модуль представляет собой полноценный блок памяти ReRAM 512 бит, в состав которого интегрированы аналогичные блоки записи и считывания, блок ограничения тока, а также матрица, включающая 64 варианта конструктивного исполнения ячеек с дифференциальной конфигурацией 2T2R [3] и тестовые строки. Наличие тестовых строк с фиксированными резисторами обеспечивает высокую тестопригодность ИС и позволяет детально исследовать характеристики как периферийных блоков, так и самих элементов ReRAM.

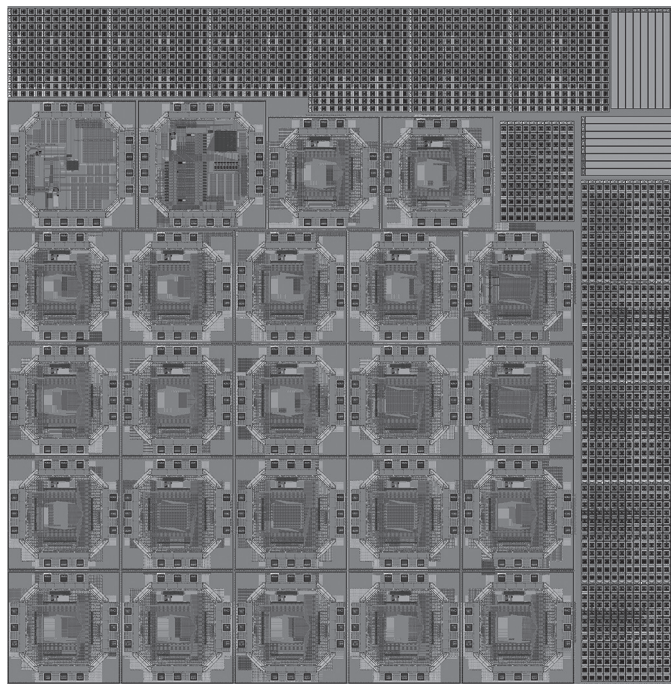


Рис. 1. Топология тестового кристалла ReRAM

Выбор предельного размера топологии тестового кристалла 10×10 мм обусловлен необходимостью минимизации количества фотошаблонов и снижения стоимости изготовления. Каждому модулю в составе тестового кристалла присвоен уникальный идентификационный номер. Для всей площади кристалла выполнена генерация фигур заполнения (tiles), а финальная верификация (проверки DRC

и LVS) проведена успешно. Разработанный тестовый кристалл предназначен для полного цикла производства и в настоящее время находится на этапе изготовления.

Исследование выполнено при поддержке РНФ (Проект № 24-91-18005 от 20.05.2024 г., шифр «Вакуоль ФРР-180»).

Литература

1. Ermakov I. V., Zubov I. A., Nuykin A. V., Timoshin S. A., Vasilyev E. S. An Ultra Low-Power Low-Cost EEPROM for UHF RFID Tags in a Single-Poly 90 nm CMOS Process / // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020, St. Petersburg and Moscow, 27–30 января 2020 года. –St. Petersburg and Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. –P. 108–111.
2. Бобовников П. Г, Ермаков И. В. Мемристорный элемент на основе КМОП-технологии // пат. 218020 U1 РФ., МПК G11C 16/00 / № 2022131355, заявл. 01.12.2022, опубл. 02.05.2023 /, заявитель АО «НИИМЭ».
3. Демин К. П., Ермаков И. В., Бобовников П. Г. Способы записи и считывания состояния ячеек энергонезависимой памяти ReRAM // Материалы научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика — 2025»: Сборник статей, М.: МИЭТ, 2025. 69–73 стр.

УДК 621.382; 681.518

Разработка интегральной микросхемы системы управления фрезерным ЧПУ станком по КМОП-технологии

Алаторцев С. К., Сердюков В. В.
Кубанский государственный университет
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149

В работе рассмотрены вопросы разработки интегральной микросхемы системы управления фрезерным станком с числовым программным управлением, реализуемой по КМОП-технологии. Проведен анализ основных требований к микросхемам управления приводами, обработки управляющих сигналов и координации работы узлов ЧПУ-оборудования. Рассмотрены функциональные блоки проектируемой микросхемы, включая модули цифровой логики, интерфейсы ввода-вывода, блоки управления шаговыми и сервоприводами, а также узлы синхронизации и контроля. Показаны преимущества применения КМОП-технологии при создании специализированных интегральных схем для систем промышленной автоматизации, в том числе снижение энергопотребления, повышение помехоустойчивости и возможность интеграции большого числа функциональных модулей на одном кристалле. Рассмотрена возможность использования разработанной микросхемы в составе систем управления фрезерными ЧПУ станками различного класса.
Ключевые слова: ЧПУ; фрезерный станок; интегральная микросхема; КМОП-технология; система управления; промышленная автоматизация.

Development of an integrated circuit for a milling CNC machine control system using CMOS technology

Alatortsev S. K., Serdyukov V. V.
Kuban State University
149 Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia

The paper discusses the development of an integrated circuit for a milling CNC machine control system implemented using CMOS technology. The main requirements for control integrated circuits intended for drive control, signal processing, and coordination of CNC equipment units are analyzed. The functional blocks of the designed integrated circuit are considered, including digital logic modules, input/output interfaces, stepper and servo drive control units, as well as synchronization and monitoring blocks. The advantages of CMOS technology for the development of application-specific integrated circuits for industrial automation systems are demonstrated, including reduced power consumption, improved noise immunity, and the possibility of integrating a large number of functional modules on a single chip. The possibility of using the developed integrated circuit as part of control systems for milling CNC machines of various classes is considered.
Keywords: CNC; milling machine; integrated circuit; CMOS technology; control system; industrial automation.

Современные фрезерные станки с числовым программным управлением предъявляют жесткие требования к точности, быстродействию и надежности управляющей электроники. Традиционные системы, построенные на наборе отдельных микроконтроллеров, программируемых логических схем и драйверов, страдают от увеличенных габаритов, повышенного энергопотребления и снижения безотказности из-за большого числа межблочных соединений. Альтернативой, позволяющей преодолеть эти недостатки, выступает разработка специализированной интегральной микросхемы, объединяющей основные функции управления на одном кристалле. В условиях необходимости импортонезависимости и повышения технологической безопасности создание такой микросхемы приобретает особую актуальность.

Применение КМОП-технологии для данных целей обусловлено рядом ее принципиальных преимуществ. КМОП-структуры характеризуются ничтожно малым статическим энергопотреблением, высокой степенью интеграции, естественной помехоустойчивостью и зрелой маршрутной базой проектирования. Эти качества особенно ценны для смешанных цифроаналоговых узлов, работающих в условиях интенсивных электромагнитных полей, коммутационных наводок и механических вибраций. Кроме того, КМОП-технология позволяет разместить на одном кристалле быстродействующее вычислительное ядро, прецизионные схемы обратной связи и интерфейсные драйверы, минимизируя паразитные задержки и увеличивая общую надежность.

Предлагаемая архитектура СБИС включает несколько взаимосвязанных функциональных узлов. Центральное место занимает цифровое ядро управления, которое интерпретирует команды управляющей программы, рассчитывает траектории перемещений, координирует работу осей и синхронизирует технологические операции. Непосредственное сопряжение с исполнительными механизмами осуществляют блоки управления приводами. Эти модули формируют импульсные последовательности с требуемыми временными характеристиками для шаговых двигателей или сервоприводов, реализуют алгоритмы плавного разгона и торможения, а также обрабатывают сигналы датчиков положения для повышения точности позиционирования. Интеграция всех каналов в одном кристалле устраняет межсоединения и делает движение осей более согласованным.

Для взаимодействия с периферийным оборудованием в микросхему встроены интерфейсные блоки. Они обеспечивают прием сигналов от концевых выключателей и датчиков обратной связи, опрос цепей аварийной остановки, а также обмен данными с управляющим компьютером или операторской панелью по стандартным последовательным протоколам и параллельным шинам. Особую роль играют встроенные средства контроля и диагностики: схемы мониторинга питания, логика обнаружения сбоев и фиксации ошибок, сторожевые таймеры и цепи безопасного останова. Эти узлы не только повышают эксплуатационную безопасность, но и существенно сокращают время поиска неисправностей.

При проектировании топологии особое внимание уделено электромагнитной совместимости, отводу тепла и защите входных цепей от перенапряжений, неизбежных в цеховых условиях. Оптимизированная топология минимизирует перекрёстные помехи и гарантирует устойчивость к статическому электричеству.

Ключевым результатом работы является создание однокристального решения, способного заменить совокупность разрозненных компонентов, что ведет к уменьшению габаритов аппаратуры, снижению себестоимости серийных

изделий и существенному повышению показателей надежности. Разработанная микросхема формирует основу для построения импортонезависимых систем ЧПУ нового поколения, отличающихся высокой точностью обработки, устойчивостью к промышленным воздействиям и возможностью дальнейшей функциональной интеграции.

Литература

1. Петров И. А., Кузнецов В. М. Системы числового программного управления металлорежущими станками. — М.: Машиностроение, 2018.
2. Иванов С. П., Орлов Д. В. Проектирование цифровых интегральных схем по КМОП-технологии. –СПб.: БХВ-Петербург, 2020.
3. Сидоров А. Н., Ефремов П. К. Микроэлектронные устройства промышленной автоматики. — М.: Техносфера, 2019.
4. Smith M. Application-Specific Integrated Circuits. –Boston: Addison-Wesley, 1997.
5. Weste N., Harris D. CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective. –4th ed. –Boston: Pearson, 2011.

УДК 004.415.5

Разработка линтера Verihogg для языка SystemVerilog

Парфенов А. В., Самодуров Н. С., Меделян А. В., Лемехов Д. Ю.
Санкт-Петербургский государственный университет, математико-механический факультет, кафедра системного программирования
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Представлено развитие прототипа линтера Verihogg для языка SystemVerilog (IEEE 1800-2017), основанного на Surelog и UHDM. Расширен набор диагностических правил (более 100), охватывающих ключевые конструкции языка и элементы верификации. Набор правил сформирован с ориентацией на покрытие, сопоставимое с коммерческими решениями. Реализована система конфигурации для управления проверками и уровнями их критичности. Проведено тестирование на проектах с открытым исходным кодом.
Ключевые слова: SystemVerilog; IEEE 1800-2017; статический анализ; линтер; Surelog; UHDM; верификация; открытый исходный код.

Development of the Verihogg linter for the SystemVerilog language

Parfenov A. V., Samodurov. N. S., Medelian A. V., Lemekhov D. Yu.
Saint Petersburg State University, Faculty of Mathematics and Mechanics, Department of System Programming
7–9 Universitetskaya Embankment, Saint Petersburg, 199034, Russia

The development of the Verihogg linter prototype for the SystemVerilog language (IEEE 1800-2017), based on Surelog and UHDM, is presented. The set of diagnostic rules has been extended (more than 100), covering key language constructs and verification elements. The rule set was formed with a focus on coverage comparable to commercial solutions. A configuration system for managing checks and their severity levels has been implemented. Testing was carried out on open-source projects.
Keywords: SystemVerilog; IEEE 1800-2017; static analysis; linter; Surelog; UHDM; verification; open source.

Ранее авторами был создан прототип открытого линтера для SystemVerilog (IEEE 1800-2017) [1] на основе компилятора Surelog [8] и семантической модели UHDM [9]. Прототип подтвердил возможность глубокого статического анализа кода, включая несинтезируемые конструкции, используемые в методологиях верификации (UVM), однако содержал ограниченный набор правил. Настоящая работа посвящена развитию инструмента: существенному расширению набора диагностик, реализации системы конфигурации и апробации на проектах с открытым исходным кодом.

При формировании набора правил в качестве ориентира по покрытию использовался коммерческий линтер Verissimo [6]; это позволило достичь сопоставимой широты проверок в рамках открытого решения. Реализовано свыше 100 правил, сгруппированных по категориям:

- объектно-ориентированные конструкции (циклическое наследование, дублирование классов, корректность интерфейсных классов);

- covergroup и coverpoint (дублирование групп и точек покрытия, корректность выражений coverpoint и cross);
- события и перечисления (дублирование событий и литералов перечислений, некорректное использование событий);
- операторы и шаблоны присваивания (опаттерны, скалярные конструкции, оператор inside, приведение типов);
- управляющие конструкции (циклы for и foreach, управление событиями);
- DPI-объявления и системные функции (корректность деклараций, аргументы системных задач и функций);

Каждому правилу присвоен уровень критичности (error, warning, note), что позволяет классифицировать дефекты по степени их влияния на корректность проекта. Реализована система конфигурации, позволяющая избирательно включать и отключать правила и группы проверок и задавать пороговый уровень критичности.

Verihogg протестирован на ряде проектов с открытым исходным кодом и показал стабильную работу: число ложных срабатываний невелико, при этом инструмент обнаруживает дефекты, пропускаемые другими открытыми решениями. Verihogg закрывает существующий пробел в экосистеме открытых средств анализа SystemVerilog и применим как в промышленных, так и в учебных проектах по верификации HDL-кода.

Литература

1. IEEE Standard for SystemVerilog. IEEE Std 1800-2017. New York: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8299595.
2. Verilator [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/verilator/verilator.
3. Svlint [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/dalance/svlint.
4. Verible [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/chipsalliance/verible.
5. Popoloski M. Slang [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/MikePopoloski/slang.
6. Verissimo SystemVerilog Linter [Электронный ресурс]. AMIQ EDA. URL: https://eda.amiq.com/products/verissimo-linter.
7. Verihogg Linter [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/verihogg/verihogg-lint.
8. Surelog [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/chipsalliance/Surelog.
9. Dargelas A. Universal Hardware Data Model // Proc. WOSET, 2020. URL: https://woset-workshop.github.io/PDFs/2020/a10.pdf.

УДК 621.311.6

Метод целенаправленного проектирования преобразователя напряжения

Коробок М. А., Прищепа Н. И., Львов Б. Г.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
korobok.m.a@hse.ru

При заданной исходной цели или целевого состояния разработки сложной технической системы (ТС) на начальных стадиях проектирования возникают проблемные задачи, заключающихся в выявлении в многоуровневой иерархической структуре ТС подсистем и элементов, которые подлежат совершенствованию и согласования технических требований к ним с исходными целями. Количественная оценка влияния внутренних проектных параметров на выходные характеристики технической системы затруднена ввиду нелинейного и взаимосвязанного характера этих зависимостей. Предлагаемый метод позволяет определить те внутренние параметры технической системы, которые оказывают наибольшее влияние на целевые характеристики и может быть использован для принятия решений по изменению внутренних параметров в соответствии с исходными целями. Применение метода на практике может привести к снижению количества доработок на более поздних стадиях разработки. Метод использован при проектировании понижающего преобразователя напряжения в соответствии с заданными исходными целями. Верификация методом численного моделирования подтвердило корректность полученных результатов.

Ключевые слова: исходная цель проектирования; иерархическая структура технической системы; матрица связей параметров; ранжирование параметров; понижающий преобразователь напряжения.

A method of purposeful design of a voltage converter

Korobok M. A., Prishchepa N. I., Lvov B. G.
National Research University Higher School of Economics
Moscow State Institute of Electronics and Mathematics
123458, Russia, Moscow, st. Tallinskaya, 34
korobok.m.a@hse.ru

With a given initial purpose or target state of development of a complex technical system (TS), problematic tasks arise at the initial stages of design, which consist in identifying subsystems and elements in the multilevel hierarchical structure of the TS that need to be improved and their technical requirements coordinated with the initial purposes. Quantification of the influence of internal design parameters on the output characteristics of a technical system is difficult due to the nonlinear and interrelated nature of these dependencies. The proposed method makes it possible to determine those internal parameters of the technical system that have the greatest impact on the target characteristics and can be used to make decisions on changing internal parameters in accordance

with the initial purposes. Applying the method in practice can lead to a reduction in the number of improvements at later stages of development. The method is used in the design of a step-down voltage converter in accordance with the specified initial purposes. Verification by numerical simulation confirmed the correctness of the results obtained.
Keywords: initial design purpose; hierarchical structure of the technical system; matrix of parameter relationships; parameter ranking; step-down voltage converter.

На начальных этапах проектирования сложных технических систем (ТС), когда стоимость ошибки на порядки ниже, чем на последующих, можно оценить целесообразность проекта, выбрать архитектуру, скорректировать требования с минимальными временными и материальными затратами [1, 2]. Но даже при наличии готового аналога сохраняется неопределенность проектных параметров, поскольку для улучшения выходных характеристик системы отсутствует однозначное понимание того, какие именно параметры следует изменять, а количество таких параметров может быть велико. В силовой электронике базовые топологии остаются неизменными десятилетиями, поэтому улучшение характеристик достигается не сменой архитектуры (технических решений), а настройкой внутренних параметров [3]. При этом их влияние на выходные характеристики может носить нелинейный характер. Эта неопределенность на поздних стадиях может обернуться конфликтами и несоответствиями техническому заданию из-за неучтенных взаимодействий между проектными параметрами и выходными характеристиками ТС.

Именно системные параметры определяют выходные характеристики, в то время как параметры подсистем, входящих в состав ТС, определяют лишь допустимые границы характеристик [4]. Среди множества параметров системы важно идентифицировать именно те, которые оказывают доминирующее влияние на конечные характеристики и целенаправленно их изменять. При этом математическое или имитационное моделирование требует полного набора параметров, и определение их влияния на систему может требовать больших временных и трудовых ресурсов, что на начальных этапах может быть нецелесообразно.

Метод целенаправленного проектирования направлен на выявление тех параметров ТС, которые влияют на цели, и содержит следующие этапы:

1) формулирование исходной цели проектирования и назначения ТС;
2) построение иерархической структуры ТС;
3) построение иерархической структуры параметров ТС;
4) определение существенных параметров ТС;
5) ранжирование и определение важных пар цели(ей) и существенных параметров ТС;
6) установление технических противоречий ТС.

Практическая значимость метода состоит в том, что позволяет решать следующие задачи:

- проводить построение дерева целей проектирования;
- выявлять подсистемы и параметры для модернизации;
- устанавливать последовательность задач проектирования;
- определять технические функции технических систем для достижения исходной цели;
- выявлять технические и физические противоречия;

- выявлять влияние изменения параметров подсистем на параметры других подсистем;
- создавать цифровые двойники сложных технических систем.

Метод был использован для проектирования понижающего преобразователя напряжения блока питания мощностью 65 Вт с целью увеличения КПД с 93 до 95 % при сохранении плотности мощности 6,8 Вт/см^3. Метод позволил выявить основные внутренние параметры системы, оказывающие наибольшее влияние на выходные (целевые) параметры. Кроме того, были определены технические противоречия системы. Верификация методом численного моделирования подтвердило корректность полученных результатов. В результате практической реализации КПД преобразователя изменилось с 93 до 95,68 % при плотности мощности 6,8 Вт/см^3.

Литература

1. ISO/IEC/IEEE 15288:2023. Systems and software engineering — System life cycle processes [Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем]: Международный стандарт. — Женева: ISO, 2023.
2. INCOSE (ed.). INCOSE systems engineering handbook. –John Wiley & Sons, 2023.
3. Kolar J.W. et al. Performance trends and limitations of power electronic systems // 2010 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. IEEE, 2010. P. 1–20.
4. Kolar J.W., Biela J., Minibock J. Exploring the pareto front of multi-objective single-phase PFC rectifier design optimization-99.2 % efficiency vs. 7kW/din 3 power density // 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference. IEEE, 2009. P. 1–21.

УДК 621.382.2/.3

Разработка повышающего DC-DC преобразователя на основе массива зарядового насоса по отечественной КМОП-технологии 130 нм

Калёнов А. Д., Мусихина Е. М.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработан повышающий DC-DC преобразователь на основе массива зарядового насоса, выполненный по технологии КМОП с технологической нормой 130 нм. Преобразователь обеспечивает повышение напряжения с 3,3 В до 12 В, а также формирование дополнительных опорных уровней.
Ключевые слова: DC-DC преобразователь; повышающий преобразователь; зарядовый насос; матрица ячеек; КМОП

Development of a step-up DC-DC converter using a charge pump array based on 130-nm CMOS technology

Kalyonov A. D., Musikhina E. M.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

A step-up DC-DC converter based on a charge pump array and manufactured using 130 nm CMOS technology has been developed. The converter boosts voltage from 3.3 V to 12 V and generates additional reference levels.
Keywords: DC-DC; boost converter; charge pump; cell matrix; CMOS.

Современная силовая электроника предъявляет высокие требования к компактным источникам питания, способным формировать высокие напряжения для специализированных систем, таких как управление светодиодами, автомобильная электроника. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью создания повышающих преобразователей с высоким КПД при минимальных габаритах систем. В составе таких систем часто один источник питания должен обеспечивать работу сразу нескольких функциональных узлов с разными требованиями по напряжению. Например, для микроконтроллеров и логических схем типичным является напряжение 3,3 В, для аналоговых интерфейсов и датчиков 5 В, а для управления силовыми ключами, дисплеями или исполнительными механизмами 7–12 В. Наличие фиксированных отводов от единого зарядового насоса позволяет отказаться от использования нескольких DC-DC преобразователей, что упрощает структуру всей схемы, уменьшает занимаемую площадь на кристалле и повышает общий КПД системы.

Целью работы является исследование и разработка повышающего DC-DC преобразователя на базе матричной структуры зарядового насоса, обеспечивающего повышение входного напряжения с 3,3 до 12 В. В отличие от традиционных решений с использованием индуктивных элементов, предлагаемый подход предполагает применение массива ячеек зарядовых насосов, что позволяет достичь высокого выходного напряжения за счет каскадирования ячеек.

В качестве примера для разрабатываемого устройства выбран DC-DC преобразователь для нейростимулятора, представленный в статье [1]. В отличие от исходной архитектуры реализован фиксированный выход 12 В и дополнительные уровни напряжения: 3,3, 5,25, 7,5, 9,75 В. Такой подход исключает необходимость в формировании программируемого напряжения, что позволило снизить сложность управления без потери основных характеристик.

В процессе реализации исследуется архитектура многоступенчатого зарядового насоса с двухфазным управлением [2]. Для формирования дополнительных уровней напряжения проектируется специализированный высоковольтный плавающий преобразователь уровня на емкостной основе, обеспечивающий малые сквозные токи и высокое быстродействие [3]. Разрабатываемая структура включает в себя схему управления, обеспечивающую формирование необходимых фаз для корректной работы емкостных преобразователей уровня.

Практическая значимость работы заключается в создании отечественного прототипа повышающего преобразователя, обеспечивающего стабильное выходное напряжение 12 В и формирующего дополнительные уровни. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании источников питания для устройств с питанием от низковольтных литий-ионных аккумуляторов, а также в составе систем на кристалле, требующих высоких напряжений смещения.

Литература

1. Palomeque-Mangut, D.; Rodríguez-Vázquez, Á.; Delgado-Restituto, M. A Fully Integrated, Power-Efficient, 0.07–2.08 mA, High-Voltage Neural Stimulator in a Standard CMOS Process. Sensors 2022, 22, 6429.
2. Pelliconi, Roberto & Iezzi, David & Baroni, Andrea & Pasotti, Marco & Rolandi, Pier Luigi. (2001). Power efficient charge pump in deep submicron standard CMOS technology. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 38, 1068-1071. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 38. 73–76.
3. D. Palomeque-Mangut, A. Rodríguez-Vázquez and M. Delgado-Restituto, “A Wide-Range, High-Voltage, Floating Level Shifter with Charge Refreshing in a Standard 180 nm CMOS Process,” 2022 IEEE 13th Latin America Symposium on Circuits and System (LASCAS), Puerto Varas, Chile, 2022. P. 01–04. DOI: 10.1109/LASCAS53948.2022.9789044.

УДК 621.382.2/.3

Проектирование интерфейсной части 8-канального нейростимулятора на базе отечественной КМОП-технологии

Янова П. А.[1], Калёнов А. Д.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработана 8-канальная структура интерфейсной части нейростимулятора на основе модульной архитектуры, выполненной в отечественном техпроцессе. Каждый из 8 каналов представляет собой законченный тракт преобразования цифрового кода в аналоговый ток стимуляции и имеет независимую настройку управления.
Ключевые слова: ЦАП; гибридная архитектура; нейростимулятор; КМОП

Development of an 8-bit digital-to-analog converter for a neurostimulator based 180 nm CMOS technology

Yanova P. A., Kalyonov A. D.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

An 8-channel structure of the interface part of the neurostimulator has been developed based on a modular architecture made in the domestic process technology. Each of the 8 channels represents a complete path for converting a digital code into an analog stimulation current and has an independent control setting.
Keywords: DAC; hybrid architecture; neurostimulator; CMOS.

Хроническая боль –это распространенная медицинская проблема, при которой нейростимуляция спинного мозга является передовым высокоэффективным методом лечения. Однако существующие имплантируемые системы преимущественно базируются на зарубежной элементной базе, что ограничивает их доступность и технологическую независимость. Актуальной задачей становится разработка отечественного 8-канального нейростимулятора, в частности его интерфейсной части, отвечающей за формирование токов стимуляции. Главным звеном, определяющим качество и безопасность стимуляции, является выходной каскад генератора импульсов [1].

В работе представлена разработка интерфейсной части выходного каскада для восьмиканального нейростимулятора, выполненного по отечественной КМОП-технологии. Основной функцией устройства является формирование прецизионных токов стимуляции в каждом канале на основе цифровых кодов.

Восьмиканальный нейростимулятор спроектирован по модульному принципу: каждый канал представляет собой законченный тракт преобразования цифрового кода в аналоговый ток стимуляции и управляется независимо.

Основными функциональными элементами являются:

- восемь каналов. Каждый включает в себя: источник опорного тока; 8-битный гибридный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), где 4 старших бита реализованы унарной архитектурой, а 4 младших бита –бинарной;

термометрический декодер «4 в 15»; токовое зеркало с высоким выходным импедансом, реализующее ступенчатое регулирование максимальной амплитуды тока в зависимости от режима (2, 10 или 20 мА), а также цифровую логику управления;
- восемь выходных каскадов с управляющими ключами на n-канальных МОП-транзисторах;
- цифровой блок управления, формирующий сигналы для переключателей;
- отдельные аналоговые шины земли для каждого канала, обеспечивающие гальваническую развязку токовых цепей и минимизацию перекрёстных помех.

Выходной масштабированный ток преобразуется выходным каскадом либо в ток стимуляции, подаваемый на электрод через вывод, либо отводится на соответствующую землю в зависимости от состояния управляющих ключей. Такой подход позволяет независимо включать и выключать каждый канал. Цифровой блок управления формирует индивидуальные сигналы для всех каналов, обеспечивая независимую настройку амплитуды, длительности и временной последовательности импульсов.

Таким образом, предложенная интерфейсная часть на основе гибридного ЦАП конфигурации «4+4» обеспечивает баланс между точностными характеристиками и энергоэффективностью [2]. Архитектура восьмиканального нейростимулятора сочетает гибкость выбора параметров терапии с модульностью, обеспечивая полный тракт формирования тока в каждом канале. Масштабирование тока от 2 до 20 мА через токовое зеркало позволяет сохранять стабильность тока стимуляции при изменении импеданса нагрузки в диапазоне 100–1000 Ом. Разработанное решение отвечает требованиям к восьмиканальным нейростимуляторам, реализуемым в отечественной КМОП-технологии.

Литература

1. Palomeque-Mangut D, Rodríguez-Vázquez Á, Delgado-Restituto M. A Fully Integrated, Power-Efficient, 0.07-2.08 mA, High-Voltage Neural Stimulator in a Standard CMOS Process // Sensors (Basel). –2022. –p.6429
2. Калёнов А.Д., Янова П.А. Разработка 8-битного цифроаналогового преобразователя для нейростимулятора на отечественной КМОП-технологии 180 нм // Российский форум Микроэлектроника 2025. Сборник тезисов докладов. Предконференция № 2 «Электронная компонентная база и радиоэлектронные системы». — Зеленоград: 2025. — С. 90–91.

УДК 04.383.5

Реализация алгоритма пассивного автофокуса на ПЛИС с использованием диагонального лапласиана LAPD и аппроксимационных кривых

Василевский В.А., Зарипов Р.А.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Implementation of a Passive Autofocus Algorithm on FPGA Using the LAPD Diagonal Laplacian and Approximation Curves

Vasilevskii V.A., Zaripov R.A.
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

High speed and accuracy of passive autofocus in real time are critical for industrial video surveillance and robotic vision systems. Conventional CPU-based software implementations fail to provide the required performance at high resolution and high frame rate. This paper presents a heterogeneous implementation of a passive autofocus algorithm on an FPGA-based board with processor cores. Image sharpness is estimated using the LAPD diagonal Laplacian operator, and the focus position is refined by quadratic approximation of the focus curve. The approach yields high focus-position accuracy with a small number of frames. The algorithm is implemented on the AMD Xilinx Kria KV260 Vision AI Starter Kit (Zynq UltraScale+ MPSoC). The focus-measure pipeline is realized in programmable logic (PL) in fixed-point arithmetic; quadratic least-squares approximation and VCM lens-motor control via I2C are executed in the processing system (PS). The architecture processes 1920×1080 video at 30 fps in real time and is suitable for embedded machine-vision systems that require fast and accurate autofocus.

Keywords: passive autofocus; FPGA; LAPD; diagonal Laplacian; focus measure; quadratic approximation; least squares; Zynq UltraScale+ MPSoC; Kria KV260; real-time image processing; SystemVerilog.

Введение

В системах промышленного видеонаблюдения и робототехнического зрения критически важна высокая скорость и точность пассивного автофокуса в реальном времени. Традиционные программные реализации на CPU не обеспечивают требуемую производительность при высоком разрешении и высокой кадровой частоте. В работе предложена гетерогенная реализация алгоритма автофокуса на плате на базе ПЛИС с использованием процессорных ядер. Для определения резкости применяется диагональный лапласиан LAPD[1] и квадратичная аппроксимация кривой резкости. Такой подход позволяет достичь высокой точности положения фокуса при минимальном количестве кадров.

Обзор существующих решений

В литературе описаны разнообразные методы реализации автофокуса на FPGA, однако все они не обеспечивают требуемую точность в определении резкости.

Например, в работе Jin S. H. et al. [2] предложена аппаратная архитектура автофокуса в реальном времени, на Xilinx XC3S5000. Однако, авторы использовали простую метрику резкости (adaptive thresholding), что ограничивает точность на текстурах. Zhang H. et al. [3] реализовали алгоритма подъема с оценкой энергии краёв. Данный подход не имеет устойчивости к шуму. В работе Chen C. Y. et al. [4] предложена пассивная система автофокуса на ПЛИС с использованием дискретного вейвлет-преобразования (DWT) и нейронной сети. Однако, этот метод требует значительных вычислительных ресурсов и сложен в реализации по сравнению с предлагаемым.

Методика

В рабочей области, представляющей собой квадрат размером 200×200 пикселей в центре кадра, вычисляется значение меры резкости. Для этого применяется диагональный лапласиан LAPD, продемонстрировавший наивысшую эффективность[5] . Операция свёртки для окна 3 на 3 определяется как:

$$(I \cdot K)(x,y) = \sum_{i=-1}^{1} \sum_{j=-1}^{1} I(x+i, y+j) \cdot K(i,j),$$

где I — интенсивность пикселя, K — ядро свёртки.

Для каждого пикселя выполняются свёртки с ядром лапласиана и его диагональными компонентами. Ядро лапласиана и его диагональные компоненты:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \qquad K_{d1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \qquad K_{d2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Значение LAPD вычисляется как сумма абсолютных значений свёрток: $D(I(x,y)) = |I \cdot K| + |I \cdot K_{d1}| + |I \cdot K_{d2}|$.

Полученные значения аккумулируются в скользящем окне 7×7, после чего локальные меры суммируются и усредняются по всей рабочей области, а затем линза передвигается на следующую позицию. Результаты сохраняются, и операция повторяется еще 15 раз, формируя 16 пар значений (координата линзы, фокусная мера). Из них отбираются три максимальных значения фокусной меры, по которым методом наименьших квадратов строится парабола. В качестве оптимального положения линзы выбирается координата вершины параболы.

Архитектура реализации

Для реализации алгоритма использована платформа AMD Xilinx Kria KV260 Vision AI Starter Kit[6], включающая процессорную систему Zynq UltraScale+ MPSoC[7], модуль камеры с сенсором AR1335 и драйвером мотора VCM DW9790. Управление интерфейсом драйвера осуществляется через процессорную часть (PS) по протоколу I2C, а взаимодействие с программируемой логикой (PL) платы — по протоколу AXI. В PL реализован конвейер для вычисления фокусной меры в рабочей области, включая модули свёртки 7×7. Алгоритмы построения фокусной параболы и драйвер управления модулем VCM реализованы в PS. Все вычисления в PL производятся в формате с фиксированной точкой (fixed-point). Архитектура позволяет обрабатывать видеоформата 1920×1080 при частоте 30 кадров/с в реальном времени.

Результаты

На языке SystemVerilog были реализованы модули расчета фокусной меры, скользящего окна, свёртки и fixed-point библиотека. В процессорной части (PS) на языке

С реализованы алгоритмы управления программируемой логикой, квадратичной аппроксимации методом наименьших квадратов и управления мотором фокусирующей линзы через I2C.

Заключение

Полученная реализация демонстрирует стабильную работу в реальном времени. Решение может быть использовано в встраиваемых системах машинного зрения, где требуется быстрый и точный автофокус.

Литература

1. Pertuz S., Puig D., García M.A. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus. Pattern Recognition, 2013. Vol. 46. Iss. 5. P. 1415–1432.
2. Jin S.H. et al. A dedicated hardware architecture for real-time auto-focusing using an FPGA. Machine Vision and Applications, 2010. Vol. 21. P. 637–648.
3. Zhang H. et al. Real-Time Auto-Focus System Design Based on Climbing Algorithm and its FPGA Implementation. Proceedings of the 2012 International Conference on Computational Intelligence and Security, 2012. P. 341–345.
4. Chen C.Y., Hwang R.C., Chen H.T. FPGA Implementation of Passive Autofocus System Based on SOM Neural Network // Electronics, 2020. Vol. 9. №6. P. 969.
5. Memon F., Unar M.A., Memon S. Image Quality Assessment for Performance Evaluation of Focus Measure Operators. Mehran University Research Journal of Engineering & Technology, 2015. Vol. 34. №4. P. 379–386.
6. Документация к платформе Xilinx Kria KV260 Vision AI Starter Kit URL: https://docs.amd.com/r/en-US/ug1089-kv260-starter-kit/Summary.
7. Документация к процессорной системе Zynq UltraScale+ MPSoC URL: https://docs.amd.com/r/en-US/pg201-zynq-ultrascale-plus-processing-system/Zynq-UltraScale-MPSoC-Processing-System-v3.5-LogiCORE-IP-Product-Guide.

УДК 681.518:621.355.9

Программно-аппаратный комплекс для тестирования алгоритмов систем контроля и управления аккумуляторными батареями в реальных условиях

Мацкевич А. А., Лисновецкий Д., Гречко Е. А., Гребцов Д. К., Дружинин А. А.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
matskevich.tech@gmail.com

Разработан программно-аппаратный комплекс на базе Arduino Nano для тестирования алгоритмов параметризации моделей литий-ионных аккумуляторных батарей и оценки состояния заряда (SoC) в реальных условиях эксплуатации. Комплекс измеряет напряжение, ток и температуру аккумуляторной батареи, выполняет онлайн-идентификацию параметров модели и оценку SoC методами кулонометрии и расширенного фильтра Калмана (EKF). Измеренные и вычисленные данные передаются в реальном времени по радиоканалу 2,4 ГГц (nRF24L01) на приемное устройство, соединенное с персональным компьютером, где отображаются в специально разработанном приложении. Комплекс предназначен для экспериментальной отработки и тестирования алгоритмов систем контроля и управления аккумуляторными батареями (BMS) и был апробирован на электрическом багги.
Ключевые слова: системы контроля и управления аккумуляторными батареями; оценка состояния заряда; эквивалентная схема замещения; литий-ионные аккумуляторы; тестирование алгоритмов BMS.

Software-Hardware Complex for Field Testing of Battery Management System Control Algorithms

Matskevich A. A., LisnovetskiZD., Grechko E. A., Grebtsov D. K., Druzhinin A. A.
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
matskevich.tech@gmail.com

A software-hardware complex based on the Arduino Nano board has been developed for testing parameterization algorithms for lithium-ion battery models and real-time state-of-charge (SoC) estimation in field conditions. The complex measures the voltage, current, and temperature of the battery, performs online parameterization of its model, and estimates SoC using coulomb counting and an extended Kalman filter (EKF). The measured and computed data are transmitted in real time over a 2.4 GHz radio channel (nRF24L01) to a receiving device connected to a personal computer, where they are displayed in a purpose-built application. The complex is intended for the experimental development and testing of battery management system (BMS) control algorithms and has been field-tested on an electric buggy.
Keywords: battery management systems; state-of-charge estimation; equivalent circuit model; lithium-ion batteries; BMS algorithm testing.

Литий-ионные аккумуляторные батареи благодаря высокой удельной энергии и мощности являются основным источником питания современных электротранспортных средств, аэрокосмических систем и портативной электроники [1, 2]. Безопасность и эффективность их эксплуатации определяются качеством работы систем контроля и управления аккумуляторными батареями (BMS), которые на основе измерений тока, напряжения и температуры оценивают состояние заряда (SoC) и параметры модели батареи в виде эквивалентной электрической схемы [3]. Для получения этих оценок применяется широкий спектр алгоритмов — от простого кулонометрического счета до адаптивных фильтров Калмана, обеспечивающих компенсацию накопленной ошибки интегрирования тока и учитывающих нелинейную динамику батареи [4, 5].

Одним из ключевых требований к алгоритмам BMS является их устойчивость к реальным условиям эксплуатации — динамическим нагрузкам, температурным колебаниям и вариациям параметров конкретных ячеек. Комплексная валидация подобных алгоритмов в промышленной практике проводится на стендах полунатурного моделирования (Hardware-in-the-Loop), позволяющих формировать широкие наборы тестовых сценариев с учетом разброса параметров ячеек и погрешностей измерительных каналов [6, 7]. Несмотря на эффективность такого подхода, стоимость и сложность подобных стендов ограничивают их доступность для отработки алгоритмов в рамках учебных и мелкосерийных исследовательских проектов. Альтернативой могут служить недорогие автономные логгеры на базе распространенных микроконтроллерных платформ, которые уже показали приемлемую надежность и точность при решении задач длительного мониторинга различных физических величин в реальных условиях [7]. В связи с этим актуальной задачей является создание доступного программно-аппаратного комплекса, позволяющего регистрировать и обрабатывать параметры аккумуляторной батареи непосредственно в условиях реальной эксплуатации транспортного средства, аэрокосмических систем или портативной электроники, обеспечивая при этом точность измерений и гибкость, достаточные для сравнительного тестирования различных алгоритмов онлайн параметризации и оценки SoC.

Разработанное устройство построено на базе Arduino Nano и включает измерительные каналы напряжения, тока и температуры аккумуляторной батареи. На основе получаемых данных в реальном времени выполняется идентификация параметров эквивалентной электрической схемы второго порядка (2RC-модель) рекурсивным методом наименьших квадратов (RLS) [8, 9], а также расчет SoC методом кулонометрии и расширенным фильтром Калмана (EKF) [4, 5]; архитектура программного обеспечения допускает замену данных алгоритмов на любой другой метод параметризации и оценки SoC для целей сравнительного тестирования. Полученные значения передаются по радиоканалу 2,4 ГГц с использованием модуля nRF24L01 на приемное устройство, подключенное к персональному компьютеру. Разработанное приложение обеспечивает визуализацию напряжения, тока, температуры, оцененных параметров модели и SoC в реальном времени, а также сохранение данных для последующего анализа.

Работоспособность разработанного комплекса была подтверждена в ходе натурных испытаний на электрическом багги. Для данного объекта характерны резкие изменения тока при разгоне и торможении, что создает условия, приближенные к реальной эксплуатации электротранспорта.

В ходе испытаний комплекс обеспечил непрерывную синхронную регистрацию электрических и тепловых параметров батареи, что позволило оценить устойчивость реализованных алгоритмов параметризации и оценки SoC к реальным динамическим сценариям эксплуатации.

Таким образом, разработанный комплекс представляет собой универсальную и доступную платформу для экспериментальной отработки и сравнительного тестирования алгоритмов BMS в условиях, приближенных к реальной эксплуатации, и может быть использован как в лабораторных, так и в реальных условиях эксплуатации при разработке BMS для электротранспорта.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госзадание), соглашение 075-03-2026-305, проект № FSMG-2024-0046.

Литература

1. Faruque O., Islam M. J., Faruq O., Alam M. M. A Comprehensive Review of Past and Present Developments of Li-Ion Batteries // Discover Sustainability, 2026. Vol. 7. Art. 825.
2. Zhao T., Zhang Y., Wang M., Feng W., Cao S., Wang G. A Critical Review on the Battery System Reliability of Drone Systems // Drones, 2025. Vol. 9. № 8. Art. 539.
3. Laudani D. P., Milillo D., Quercio M., Riganti Fulginei F., Sabino L. A Comprehensive Review of Equivalent Circuit Models and Neural Network Models for Battery Management Systems // Batteries, 2026. Vol. 12. № 1. Art. 37.
4. Knox J., Blyth M., Hales A. Advancing state estimation for lithium-ion batteries with hysteresis through systematic extended Kalman filter tuning // Scientific Reports, 2024. Vol. 14. Art. 12472.
5. Nishanth G., Murali Krishnan M., Parandhaman B., Harinarayanan J. Hardware implementation of EKF based SOC estimate for lithium-ion batteries in electric vehicle applications // Scientific Reports, 2025. Vol. 15. Art. 15551.
6. Berger F., Jöst D., Barbers E., Quade K., Wu Z., Sauer D. U., Dechent P. Benchmarking battery management system algorithms — Requirements, scenarios and validation for automotive applications // eTransportation, 2024. Vol. 22. Art. 100355.
7. Park S., Moura S., Lee K. Integration of hardware and software for battery hardware-in-the-loop toward battery artificial intelligence // IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024. Vol. 10. № 1. P. 888–900.
8. Zhen D., Liu J., Ma S., Zhu J., Kong J., Gao Y., Feng G., Gu F. Online battery model parameters identification approach based on bias-compensated forgetting factor recursive least squares // Green Energy and Intelligent Transportation, 2024. Vol. 3. № 4. Art. 100207.
9. Islam Md. M., Qiu L., Ruby R. Accurate state of charge estimation for UAV-centric lithium-ion batteries using customized unscented Kalman filter // Journal of Energy Storage, 2025. Vol. 107. Art. 114955.

УДК 621.384

Принципы построения пиксельной считывающей электроники для детекторов прямого преобразования в технологии КМОП GP 65 нм

Ямалиев С. И., Лобанков Д. С., Аткин Э. В.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

В работе представлены принципы проектирования пиксельной считывающей электроники для детекторов прямого преобразования на базе КМОП-технологии 65 нм GP. Выполнен сравнительный анализ и схемотехническое моделирование нескольких архитектур зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ), оптимизированных под ограничения технологии: напряжение питания ~1,0 В, повышенная спектральная плотность шума (~30–40 % выше аналогов LP-вариантов) и токи утечки затвора до ~10^{-7} А/мкм².
Ключевые слова: ЗЧУ; КМОП 65 нм; считывающая электроника; СИМС; пиксельный детектор; ENC.

Principles of construction of pixel reading electronics for direct conversion detectors in GP 65 nm CMOS technology

Yamaliev S. I., Lobanov D. S., Atkin E. V.
National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia

This paper presents the design principles of pixel readout electronics for direct-conversion detectors based on 65 nm GP CMOS technology. A comparative analysis and circuit-level simulation of several charge-sensitive amplifier architectures were performed, optimized for technological constraints: supply voltage ~1.0 V, increased noise spectral density (~30–40 % higher than LP variants), and gate leakage currents up to ~10^{-7} A/μm².
Keywords: CSA; 65 nm CMOS; read-out electronics; ASIC; pixel detector; ENC.

Введение

Современные пиксельные детекторы прямого преобразования требуют высокой пространственной разрешающей способности (шаг пикселя ~50–100 мкм) и высокой скорости обработки сигналов. Это приводит к необходимости интеграции аналоговых и цифровых блоков в пределах площади одного пикселя при ограниченном энергопотреблении. Технология КМОП 65 нм GP обеспечивает высокое быстродействие, однако накладывает ограничения на аналоговый дизайн: напряжение питания ~1,0 В [1], увеличение спектральной плотности шума (~ на 30–40 % выше по сравнению с LP) и рост токов утечки затвора до ~10^{-7} А/мкм². В этих условиях ключевую роль играет оптимизация входного каскада [2].

Получены следующие результаты: разработанные топологии обеспечивают эквивалентный шумовой заряд ENC на уровне 47–60 e^- (рис. 1), время нарастания сигнала 17–44 нс, энергопотребление ~4 мкА на канал, динамический диапазон ~415–455 мВ при занимаемой площади кристалла 8–21 мкм^2. Показано, что выбор

архитектуры определяется компромиссом между шумом, быстродействием и плотностью интеграции [3].

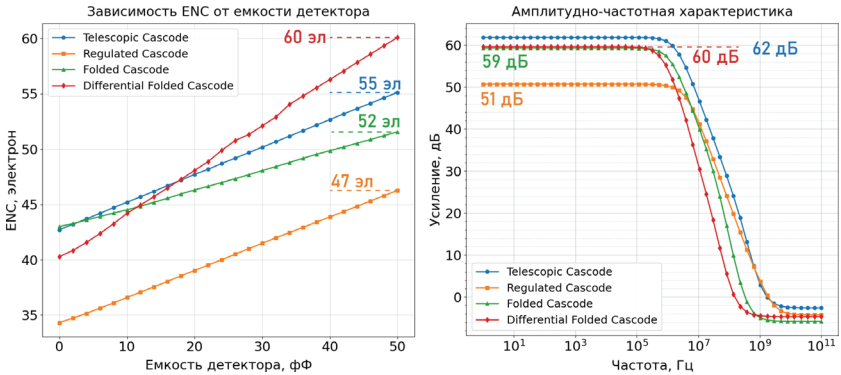


Рис. 1. Зависимость шума ENC от емкости датчика (слева) и частоты без учета ОС (справа)

Сформулированые практические рекомендации: для матриц с высокой плотностью пикселей (шаг ~50–100 мкм) предпочтительны архитектуры с минимальной схемотехнической сложностью, обеспечивающие наилучшую масштабируемость; для задач, требующих повышенной помехоустойчивости и расширенного динамического диапазона, целесообразно применять многокаскадные решения с активной компенсацией и регулировкой смещения. Несмотря на ухудшенные аналоговые характеристики, технология 65 нм GP остается оправданным выбором для пиксельных СИМС следующего поколения благодаря высокой скорости переключения и плотности интеграции. Полученные результаты формируют практические рекомендации по выбору архитектуры входного каскада для детекторов следующего поколения.

Литература

1. M. Manghisoni, L. Gaioni, L. Ratti, V. Re, and G. Traversi, “Introducing 65 nm CMOS technology in low-noise read-out of semiconductor detectors,” Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. Vol. 624. № 2. P. 373–378, Dec. 2010. DOI: 10.1016/j.nima.2010.02.266.
2. R. Ballabriga, M. Campbell, and X. Llopart, “Asic developments for radiation imaging applications: The medipix and timepix family,” Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. Vol. 878. P. 10–23, Jan. 2018. DOI: 10.1016/j.nima.2017.07.029.
3. L. Gaioni, Massimo Manghisoni, Valerio Re et al., “SISSA: RD53 analog front-end processors for the ATLAS and CMS experiments at the High-Luminosity LHC,” PoS. Vol. Vertex2019, p. 021, 2020. DOI: 10.22323/1.373.0021.

УДК 621.382

Калибровочная система для интегральных схем матричных приемников высокого разрешения

Громов И. С., Лобанков Д. С., Ямалиев С. И., Головин И. О., Аткин Э. В.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
ISGromov@mephi.ru

В работе рассматривается разработка и исследование системы инжекции тестового заряда для пиксельной интегральной микросхемы с матрицей 32×32, предназначенной для калибровки и тестирования аналогового канала обработки сигнала. Аналоговый канал включает зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ), формирователь и систему компараторов, после которых осуществляется цифровая обработка сигнала. Предложенная система реализует инжекцию заряда через калибровочную емкость, а также контроль выходного напряжения, через пиксельный повторитель, что позволяет формировать эквивалентный входной сигнал с заданной амплитудой и временными характеристиками и проводить комплексное тестирование всех этапов обработки сигнала.
Ключевые слова: инжекция заряда; калибровочная система; пиксельный детектор; тестовый импульс;

Calibration System for Integrated Circuits of High-Resolution Matrix Receivers

Gromov I. S., Lobanov D. S., Yamaliev S. I., Golovin I. O., Atkin E. V.
National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia
ISGromov@mephi.ru

This paper presents the development and study of a test charge injection system for a 32×32 pixel integrated circuit designed for calibration and testing of the analog signal processing channel. The analog channel includes a charge-sensitive amplifier (CSA), a shaper, and a comparator system, followed by digital signal processing. The proposed system implements charge injection through a calibration capacitor, enabling the formation of an equivalent input signal with specified amplitude and temporal characteristics and allowing comprehensive testing of all stages of signal processing.
Keywords: charge injection; calibration system; pixel detector; test pulse.

Представленная калибровочная система разработана для интеграции в пиксельные системы, она позволяет формировать контролируемый эквивалент входного зарядового сигнала непосредственно на входе пикселя, обеспечивая возможность калибровки порогов, оценки шумовых характеристик, измерения линейности и временных параметров канала обработки сигнала. В отличие от внешних источников излучения, внутренняя инжекция обеспечивает высокую повторяемость, локальность и независимость от внешних условий, что делает ее ключевым инструментом для тестирования, настройки и верификации работы как аналоговой, так и цифровой части пиксельного детектора.

Архитектура системы разделена на периферийную и пиксельную части (рис. 1). Периферийная часть формирует тестовый импульс (ступенчатое напряжение заданной амплитуды и длительности), который затем подается на общую для всех пикселей управляющую шину. Пиксельная часть, детектируя фронт или спад этого импульса (в зависимости от необходимой полярности заряда: дырки или электроны), осуществляет инжекцию калибровочного заряда через встроенный конденсатор в аналоговый тракт пикселя, а также, с помощью размещенного в каждом пикселе повторителя, осуществляет съем аналогового сигнала напряжения аналогового тракта пикселя.

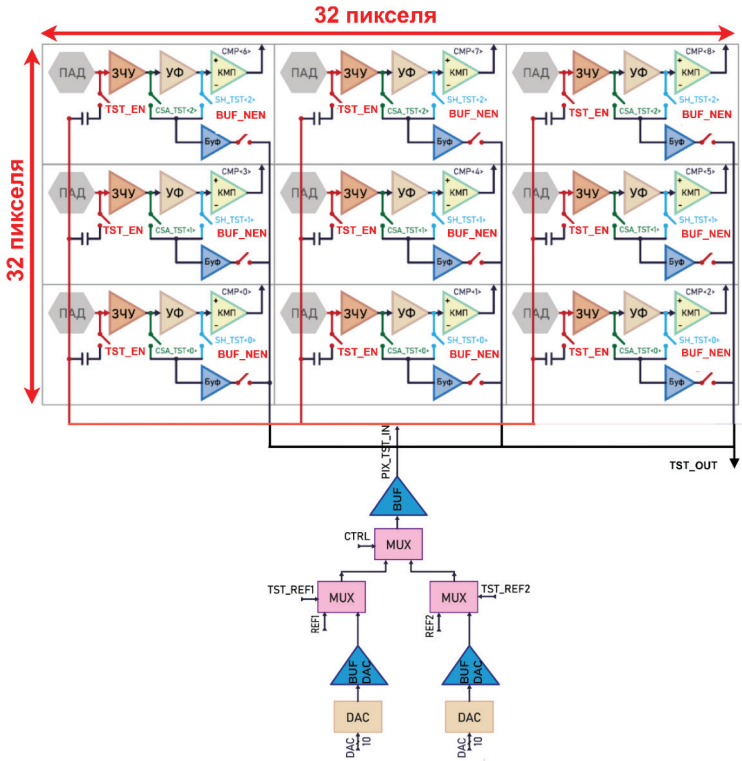


Рис. 1. Структурная схема инжекционной системы

Съем выходного сигнала с аналоговых узлов пикселя осуществляется через колонно-строчную схему чтения, позволяющую считывать данные только с одного пикселя в каждый момент времени.

Пиксельная часть калибровочной системы выполняет две основные функции:

1) инжекционная функция — преобразование принятого импульса напряжения в зарядовый сигнал и подача его на вход аналогового тракта пикселя;

2) измерительная (выходная) функция — съем импульсного сигнала напряжения с аналогового тракта пикселя для контроля правильности работы аналоговой части пикселя.

Таким образом, калибровочная система позволяет не только подавать тестовый сигнал, но и независимо измерять отклик пикселя на этот сигнал.

На рис. 2 показана структурная схема пиксельной части калибровочной системы.Она включает в себя инжекционную емкость $C_{инж}$, ключ инжекции TST_EN и выходной пиксельный повторитель PIX_BUF

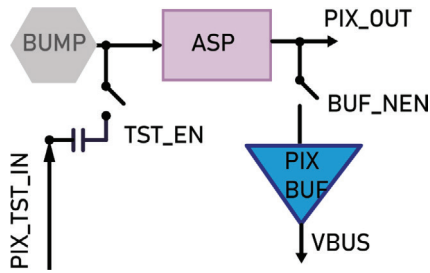


Рис. 2. Пиксельная часть калибровочной системы

Инжекционная емкость $C_{инж}$ одним выводом подключена к цепи формирования перепада напряжения, другим — к чувствительному узлу аналогового тракта пикселя (ASP). При подаче тестового импульса на инжекционную емкость возникает быстрое изменение напряжения на обкладках конденсатора, что вызывает возникновение токового импульса, поступающего на вход аналогового тракта пикселя и иммитирующего попадание заряженной частицы.

Ключ инжекции (схема маскирования по входу), управляемая сигналом TST_EN, разрешает или блокирует прохождение тестового перепада на инжекционную емкость. При TST_EN = 1 пиксель разрешает инжекцию, при TST_EN = 0 — блокирует. Это позволяет реализовать два режима инжекции:

1) глобальную инжекцию — TST_EN = 1 для всех пикселей;
2) адресную (выборочную) инжекцию — TST_EN = 1 только для выбранного пикселя или группы.

Выходной повторитель напряжения (PIX BUF) предназначен для съема напряжения с аналогового тракта пикселя и передачи его за пределы матрицы с целью последующего анализа. Это позволяет верифицировать правильность работы аналоговой части пикселя после подачи тестового заряда. Он выполнен на основе истокового повторителя, который обладает высоким входным сопротивлением (минимально нагружает чувствительный узел) и низким выходным сопротивлением. Для снижения статического энергопотребления матрицы в истоковый повторитель введен сигнал BUF_NEN, который отключает повторитель по питанию, когда измерение не производится.

Литература

1. Mir, Jamil & Clough, Robert & MacInnes, Ruaraidh & Gough, Christopher & Plackett, Richard & Sawada, Hide & MacLaren, Ian & Maneuski, Dima & O'Shea, Val & McGrouther, Damien & Kirkland, Angus. (2016). Characterisation of the Medipix3 detector for electron imaging. 10.1002/9783527808465.EMC2016.6818.
2. X. Llopart et al., "Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. Vol. 581. № 1–2. P. 485–494, 2007.
3. C. Llopart et al., "The Medipix3 architecture, a high resolution, zero dead-time pixel detector readout chip," Radiation Measurements. Vol. 42. № 4–5. P. 614–618, 2007.
4. M. Campbell et al., "The Medipix2 and Medipix3 pixel readout chips," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. Vol. 633. suppl. 1, S1–S10, 2011.

УДК 621.382

Разработка полностью цифрового блока POR

Коваленко Н. О.
АО «Дизайн центр «Кристал»
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
Nkovalenko@dckristal.com

В работе рассматриваются реализация и особенности применения полностью цифрового блока Power-on reset (POR), на основе анализа зарубежных патентов.
Ключевые слова: Power-on reset; POR; сдвиговый регистр; счетчик.

Kovalenko N. O.
DC "Kristal"
MIET National Research University
Nkovalenko@dckristal.com

This paper examines the implementation and application features of a fully digital Power-on Reset (POR) unit, based on an analysis of foreign patents.
Keywords: Power-on reset; POR; shift register; counter.

В большинстве случаев блоки POR разрабатываются в рамках аналогового маршрута проектирования и их работа основана анализе текущего напряжения питания и выработке сигнала сброса при превышении заданного порогового значения. Работа цифровых блоков POR основана на обеспечении задержки выработки сигала сброса после превышения напряжения питания, при котором цифровые элементы начинают выполнять свои логические функции, и наличия тактовой частоты.

На основе информации из зарубежных патентов [1–3], на языке Verilog было разработано два варианта блоков POR. Первый из них(рис. 1) основан на логике работы двух счетчиков и трех компараторов.

Второй вариант работает на основе нескольких цепей сдвиговых регистров. Количество триггеров в одной цепи и количество цепей определяют вероятность корректного отрабатывания блока POR, что и является ее главным недостатком.

После разработки обоих вариантов блока POR, проведено сравнение их эффективности, а также проанализированы основные недостатки и варианты их устранения, для первого варианта блока POR предложены пользовательские рекомендации, рассчитанные на основе теоретических и практических выкладок. Для второго варианта разработана модификация (рис. 3), позволяющая избежать случая срабатывания, сигала сброса сразу после подачи питания и наличия тактовой частоты.

Для каждого варианта реализации блока POR разработаны математические модели, которые позволяют определить временные границы выработки сигнала сброса, путем выбора предустановленных значений компараторов П31 и П32 (для первого варианта реализации), путем выбора количества триггеров в цепях сдвиговых регистров и количества самих сдвиговых регистров (для второго и третьего вариантов реализации).

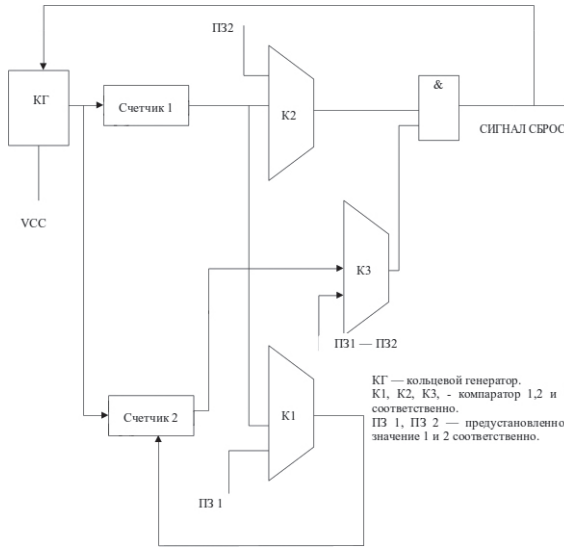


Рис. 1. Структурная схема блока POR на основании счетчиков

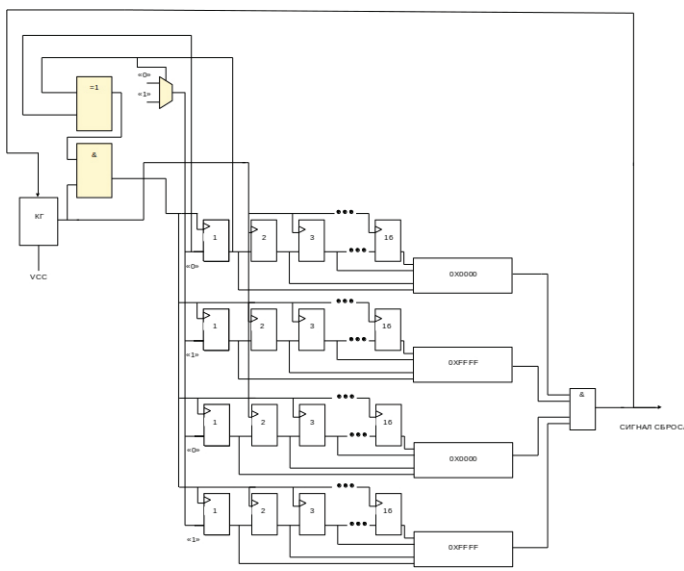


Рис. 2. Структурная схема модификации устройства сброса по включению питания

В случае первого варианта реализации мы работаем с дискретным набором времен, задаваемых пользователем чрез тактовую частоту генератора от минимального до максимального, тогда общие формулы будут выглядеть, как:

Tmin = ((П32-П3l + 1) + S) * Tclk

Tmax = ((П32- П3l) + 2^n + S) *Tclk

n — разрядность счетчика

S — Количество состояний конечного автомата — 1(в данном контексте 5)

Ts — Период сигнала кольцевого генератора

Во втором случае мы работаем с дискретным набором времен от 0 до n тактов и пользователь исходя из имеющихся данных о вероятности отрабатывания устройства за определенное количество тактов, выбирает удовлетворяющую его вероятность, рассчитанную по формуле:

$$f(n,x,x0) = 1-(1/2^n)^(x-x0+1),$$

где n — число цепей в устройстве; x — число триггеров в сдвиговом регистре; x0 — число итераций, за которое приемлемо отрабатывает устройство.

Литература

1. US 6,278302, B1, Tony S. El-Kik, DIGITAL POWER-UPRESET CIRCUIT, Aug. 21, 2001.
2. US 7400,179 B2, David H. Lin, San Jose, CA (US), DIGITAL POWER-ON RESET, Jul. 15, 2008.
3. US 8,198.925 B1, Yongjiang Wang, Austin, TX (US), DIGITAL POWER ON RESET, Jun. 12, 2012.

УДК 004.052.42

Сравнительный анализ эффективности методов верификации периферийных интерфейсов микроконтроллера на основе унифицированного блока верификации и прямых тестовых воздействий

Сапрыкина В. С.[1,2,3], Нефедов Д. А.[1,2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
vsaprykina@niime.ru
[2]АО «Оптимизирующие технологии»
119296, г. Москва, Ленинский пр-т, 68/10
[3]Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Проведен сравнительный анализ эффективности метода верификации периферийных интерфейсов, основанного на применении унифицированного блока верификации, и метода верификации, основанного на написании прямых тестовых воздействий на примере верификации микроконтроллера.
Ключевые слова: функциональная верификация; микроконтроллер; периферийный интерфейс.

Comparative efficiency analysis of microcontroller peripherals verification methods: unified verification unit vs direct testing

Saprykina V. S.[1,2,3], Nefedov D. A.[1,2]
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
vsaprykina@niime.ru
[2]Optimizing technologies
119296, Russia, Moscow, Leninsky Ave., 68/10
[3]Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

A comparative analysis of the efficiency of a unified verification unit-based method and a direct testing-based method for peripheral interface verification is presented, with microcontroller verification as a case study.
Keywords: functional verification; microcontroller; peripherals.

В настоящее время сложность проектируемых систем на кристалле (СнК) и микроконтроллеров быстро возрастает, так как этому способствует совершенствование как технологических процессов, так и методологий проектирования [1]. Современные СнК и микроконтроллеры состоят из множества сложных функциональных блоков (СФ-блоков) периферийных интерфейсов, которые обмениваются данными друг с другом и с вычислительным ядром через одну или несколько стандартизованных системных шин. Как правило, дизайн-центры переиспользуют ранее разработанные

и верифицированные СФ-блоки. Однако для обеспечения корректности взаимодействия всех компонентов требуется комплексная верификация на уровне СнК.

В целях проведения интеграционного тестирования могут использоваться разные методы верификации. Одним из таких методов является метод верификации периферийных интерфейсов, основанный на использовании унифицированного блока, который содержит узел управления и набор верификационных СФ-блоков проверяемых периферийных интерфейсов [2]. Верификационные СФ-блоки периферийных интерфейсов настраиваются путем передачи пакетов управления от тестируемого устройства к блоку управления посредством настраиваемого физического интерфейса. Пакет управления содержит идентификатор СФ-блока, адрес настраиваемого параметра и его значение.

Наиболее общепринятым методом является метод написания прямых тестовых воздействий. Он заключается в ручном формировании запросов для тестируемого устройства и проверки откликов в виде процедур, задач или поведенческих моделей [3].

В рамках данной работы был проведен сравнительный анализ двух методов верификации по следующим параметрам: количеству и объему файлов разработанных тестов; функциональному покрытию подключений; общему кодовому покрытию; времени, затрачиваемому на симуляцию; способности обнаруживать ошибки, встраиваемые в проект. Объект исследования при проведении сравнительного анализа — 32-разрядный микроконтроллер с процессорным ядром Cortex-M1. Сравнение показало, что метод верификации периферийных интерфейсов обеспечивает сокращение общего объема тестовых файлов в семь раз, так как возможность программной настройки верификационных СФ-блоков позволяет использовать одно тестовое окружение для верификации набора периферии микроконтроллера. Использование данного метода верификации позволяет также сократить время, затрачиваемое на симуляцию в пакетном режиме, на 11,3 % за счет однократной компиляции тестового окружения. Метрики покрытий для обоих методов верификации оказались сопоставимыми с небольшим преимуществом предлагаемого метода верификации. Метод верификации периферийных интерфейсов выявил 92,5 % от общего числа встроенных в проект микроконтроллера мутаций, в то время как метод прямых тестовых воздействий — только 63,6 %. Таким образом, метод верификации периферийных интерфейсов показал большую эффективность в сравнении с методом прямых тестовых воздействий по всем рассмотренным показателям.

Литература

1. Нуйкин А. В., Кравцов А. С., Васильев Е. С., Гордиенко А. В. Развитие защищенной аппаратной платформы NE32 на базе архитектуры RISC-V для применения в составе доверенных микроконтроллеров // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 76–78. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.76.78.
2. Сапрыкина В. С., Нефедов Д. А. Метод верификации периферийных интерфейсов цифровых микросхем // Труды 67-й Всероссийской научной конференции МФТИ: Радиотехника и компьютерные технологии. — М.: Физматкнига, 2025. — С. 38–40.
3. Saini P., Singla R. SoC Verification Technologies and Methodologies // 2025 IEEE 20th Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC), 2025. P. 194–199. DOI: 10.1109/NMDC64551.2025.11234110.

УДК 621.391:519.6

Способ сжатия сигналов с аналого-информационным преобразователем

Карпов В. Н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе представлен способ сжатия сигналов на основе аналого-информационного преобразователя. Приведены результаты моделирования и экспериментальной апробации, подтверждающие оцифровку частотно-разреженных сигналов с частотой дискретизации в четыре раза ниже критерия Котельникова/Найквиста.
Ключевые слова: аналого-информационный преобразователь; сжатие сигналов; частотно-разреженные сигналы.

A method for compressing signals using an analog-to-information converter

Karpov V. N.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

This paper presents a signal compression method based on an analog-to-data converter. Simulation and experimental results are presented, confirming the digitization of frequency-sparse signals with a sampling rate four times lower than the Kotelnikov/Nyquist criterion.
Keywords: analog-to-information converter; signal compression; frequency-sparse signals.

Классический критерий Котельникова/Найквиста требует частоты дискретизации не ниже удвоенной максимальной частоты сигнала, что при обработке широкополосных разреженных сигналов приводит к избыточному потоку данных, в особенности в многоканальных системах [1, 2]. Альтернативой является теория сжатой дискретизации, которая гласит, что можно оцифровывать сигналы с частотой значительно ниже частоты Найквиста за счет аналого-информационного преобразователя (АИП) [3, 4]. В отличие от традиционного АЦП, АИП выполняет сжатие непосредственно на этапе оцифровки, а не после нее.

Предложенный способ включает аналоговую часть, реализующую сжатую дискретизацию, и цифровую часть, реализующую восстановление исходных данных методом ортогонального поиска соответствий [5]. Моделирование разработанного способа в среде MATLAB подтвердило восстановление исходного сигнала при снижении частоты дискретизации в четыре раза по сравнению с критерием Найквиста.

Проведен комплексный анализ влияния параметров реального радиотракта на эффективность АИП. Установлены пороговые значения: отношение сигнал/шум — не менее 12 дБ, выходная точка пересечения третьего порядка — не ниже 19 дБмВт, разрядность АЦП — не менее 8 бит.

Для экспериментальной апробации создан прототип АИП на основе двойного балансного смесителя, LC-фильтра и генератора М-последовательности. Натурные испытания с частотно-разреженными сигналами подтвердили работоспособность способа при четырехкратном снижении частоты дискретизации. Экспериментальные данные согласуются с результатами моделирования [6].

Разработанный способ позволяет снизить информационный поток в многоканальных системах, таких как FMCW датчики, системы структурного мониторинга и когнитивное радио.

Литература

1. Donoho D. L. Compressed sensing // IEEE Transactions on Information Theory, 2006. Vol. 52. № 4. P. 1289–1306.
2. Candes E. J., Romberg J., Tao T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information // IEEE Transactions on Information Theory, 2006. Vol. 52. № 2. P. 489–509.
3. Kirolos S., Laska J., Wakin M. et al. Analog-to-information conversion via random demodulation // 2006 IEEE Dallas/CAS Workshop on Design, Applications, Integration and Software. –Richardson, 2006. P. 71–74.
4. Tropp J., Laska J., Duarte M., Romberg J., Baraniuk R. Beyond Nyquist: Efficient sampling of sparse bandlimited signals // IEEE Transactions on Information Theory, 2010. Vol. 56. № 1. P. 520–544.
5. Pati Y. C., Rezaiifar R., Krishnaprasad P. S. Orthogonal matching pursuit: Recursive function approximation with applications to wavelet decomposition // Proceedings of 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 1993. P. 40–44.
6. Meleshin Y. M., Karpov V. N., Lyalin K. S., Kuzmin I. A. Application of an analog-to-information converter in multichannel radio systems // 2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), Yekaterinburg, Russian Federation, 2023, –P. 143–146.

УДК 681.786

Многозонные активно-импульсные телевизионные измерительные системы для построения 3D рельефов наблюдаемых объектов

Капустин В. В., к. т. н., Захлебин А. С., к. т. н.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40

В работе представлена разработка и исследование алгоритма построения 3D рельефа наблюдаемых объектов на основе карт глубин активно-импульсных телевизионных измерительных систем (АИ ТИС), полученных с использованием многозонного метода измерения дальности. Алгоритм успешно демонстрирует способность преобразовывать двумерные карты глубин полученные с использованием АИ ТИС в трехмерные рельефы объектов, используя информацию о глубине для восстановления положения точек в трехмерном пространстве.
Ключевые слова: Навигация; карты глубин; измерение дальности; АИ ТИС; облако точек; фильтрация изображений; многозонный метод измерения дальности.

Multi-area active-pulse television measuring systems for constructing 3D reliefs of observed objects

Kapustin V. V., Ph.D, Zahlebin A. S., Ph.D
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

This paper presents the development and study of an algorithm for constructing 3D terrain of observed objects based on depth maps from active-pulse television measurement systems (AP TMS) obtained using a multi-zone ranging method. The algorithm successfully demonstrates the ability to transform 2D depth maps obtained using AP TMS into 3D terrain of objects, using depth information to reconstruct the positions of points in 3D space.
Keywords: Navigation; depth maps; ranging; AP TMS; point cloud; image filtering; multi-zone ranging

Активно-импульсные оптико-электронные приборы видения позволяют получать информацию об объектах, находящихся в зоне наблюдения в условиях пониженной оптической прозрачности среды за счет значительного подавления помехи обратного рассеяния (ПОР). Активно-импульсные телевизионные измерительные системы (АИ ТИС) являются следующим этапом развития активно-импульсных оптико-электронных приборов за счет интеграции с вычислительными устройствами для обработки сигналов и изображений. АИ ТИС при использовании многозонных методов измерения дальности (ММИД) способны в реальном времени выполнять измерение дальностей до объектов наблюдения в каждом элементе формируемого

изображения (формирование карты глубин) с последующим построением трехмерных профилей наблюдаемых объектов [1].

Применение ММИД в АИ ТИС основывается на формировании двух групп кадров. Первая группа представляет собой сумму кадров с локальными активными зонами видения (АЗВ), то есть постоянными остаются длительности задержки стробирования (первая АЗВ). Вторая группа кадров формируется путем суммирования кадров, содержащих такие АЗВ, местоположение которых в пространстве изменяется. Местоположение АЗВ смещается в пространстве путем изменения величины длительности задержки стробирования на некоторый дискретный шаг (суммарная АЗВ) [2].

Для получения линейного измерительного участка (зависимости яркости объектов в поле зрения системы от дальности до них) необходимо выполнить нормировку суммарной АЗВ. Нормировка выполняется путем деления значений яркостей пикселей I2 в видеокадре, содержащем суммарную АЗВ на значения яркостей пикселей I1 в видеокадре, содержащем первую АЗВ (рис. 1).



Рис. 1. Визуализация принципа вычисления измерительной функции для ММИД

Непосредственное использование результатов нормировки для построения 3D профилей объектов сопряжено с рядом сложностей. Результаты нормировки представляют собой двумерные изображения, где каждый пиксел содержит информацию об отношении освещенности в каждой точки в сцене. Для восстановления трехмерной структуры объектов необходимо преобразовать эту двумерную информацию в дальностную информацию, а затем в трехмерные координаты согласно следующей последовательности [3]:

1) калибровка АИ ТИС;
2) получение карты глубины;
3) фильтрация карты глубины;
4) построение облака точек;
5) триангуляция облака точек;
6) 3D рельеф объекта.

Практическая реализация

Реализация алгоритма построения 3D рельефа объекта выполнялась в среде Matlab. Для практической реализации алгоритма был выбран объект, который имеет матовую (тряпичную) поверхность (рис. 3*а*) которая в ближнем ИК-диапазоне спектра имеет однородную диффузную поверхность (рис. 3*б*), что позволяет избежать паразитных переотражений. Объект располагался на дальности 6,5 метров от передней линзы объектива макета АИ ТИС.



а *б* *в*

Рис. 3. Объект исследования: исходный вид объекта (*а*); кадр сформированный АИ ТИС для суммарной АЗВ (*б*); карта глубин в псевдоцветах (*в*)

Данный объект был снят с использованием макета АИ ТИС. Параметры съемки представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры АИ ТИС в эксперименте

Метод	Длительность импульса стробирования ЭОП, нс	Длительность импульса подсвета, нс	Шаг внутрикадрового сканирования, нс	Задержка стробирования, нс	Разрешение кадра, пикс.
ММИД	50	30	1	50	2064×1544

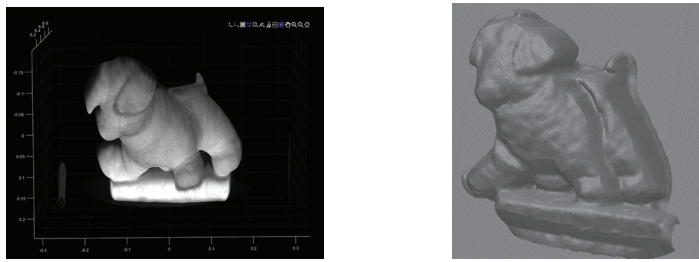
Калибровка АИ ТИС. Калибровка АИ ТИС выполнялась с целью получения внутренних параметров камеры АИ ТИС с использованием стандартного шаблона «шахматное поле» и приложения Camera Calibrator в Computer Vision Toolbox для MATLAB.

Получение карты глубины. Для получения «карты глубины», содержащей значение дальности в каждом пикселе, нормированный кадр умножается на калибровочные коэффициенты, определенные для линейной аппроксимации (рис. 3*в*).

Фильтрация карты глубины. Диапазон дальностей в карте глубин ограничивается пороговым методом для исключения других объектов кадре, применяется гауссовское размытие с ядром размером 21×21 что позволяет уменьшить количество шумов на будущем облаке точек и способствует повышению качества, построенного 3D рельефа

Построение облака точек. Использование функции «pcfromdepth» и внутренних параметров камеры для преобразования карты глубин в облако точек и единиц измерения для осей из пикселей в метры (рис. 4*а*).

Триангуляция облака точек. После получения трехмерных координат (X, Y, Z) для множества точек, для создания непрерывной поверхности из дискретного набора точек применяется метод триангуляции Делоне [4]. Этот метод выбран по причине его способности формировать равномерные треугольные сетки, что позволяет воспроизводить рельеф местности с высокой детализацией (рис. 4*б*). Основным принципом триангуляции Делоне является соединение точек таким образом, чтобы ни одна из вписанных окружностей треугольников не содержала других точек внутри себя.



а *б*

Рис. 4. Построение 3D рельеф объекта: облако точек (*а*); 3D-поверхность (*б*)

Таким образом, в результате разработки и апробации алгоритма построения 3D рельефа наблюдаемых объектов на основе карт глубин, полученных с использованием ММИД, можно сделать следующие выводы. Алгоритм успешно демонстрирует способность преобразовывать двумерные карты глубин в трехмерные рельефы объектов, используя информацию о глубине для восстановления положения точек в трехмерном пространстве. Применение гауссовского размытия позволяет эффективно сгладить выбросы при формировании облака точек. Применение метода триангуляции Делоне позволило создать 3D рельеф объекта с высокой степенью детализации. Результаты работы открывают потенциал предложенного алгоритма для дальнейших исследований и разработок в области 3D моделирования и визуализации местности и объектов на основе карт глубин, полученных с использованием АИ ТИС.

Литература

1. Wang X. et al. Three-dimensional range-gated flash LIDAR for land surface remote sensing // Land Surface Remote Sensing II. SPIE, 2014. Vol. 9260. P. 858–867.
2. Капустин В. В. Многозонные методы формирования карт глубин с использованием активно-импульсных телевизионных измерительных систем/ В. В. Капустин, А. К. Мовчан // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения, 2023. — № 2. — С. 44–53.

3. Мусихин И. Д. 3D-реконструкция поверхностей с использованием активно-импульсной телевизионной измерительной системы / И. Д. Мусихин, В. В. Капустин, С. А. Забуга, А. Мовчан // Материалы докладов междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления» Томск, 2023. –Ч. 2. — С. 237–239.
4. Левин Б. А. Моделирование рельефа на основе триангуляции Делоне / Б. А. Левин, И. Н. Розенберг, В. Я. Цветков // Наука и технологии железных дорог, 2018. — Т. 2. — № 1 (5). — С. 3–15.

УДК 621.396.67

Двухдиапазонный антенный элемент S-диапазона для систем связи прямого спутникового доступа

Костелецкий В. П.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр-т Ленина 40
kosteletskiy.vp@gmail.com

Разработан приемо-передающий антенный элемент (АЭ), работающий в S-диапазоне. АЭ осуществляет частотное разделение приема и передачи с разными направлениями круговой поляризации. Предназначен для систем связи нового поколения на основе АФАР. Показаны его электрические характеристики и топология.
Ключевые слова: антенный элемент; АФАР; коэффициент усиления; патч антенна; S-диапазон; негеостационарные спутниковые системы.

Dual-band S-band antenna element for direct satellite access communication systems

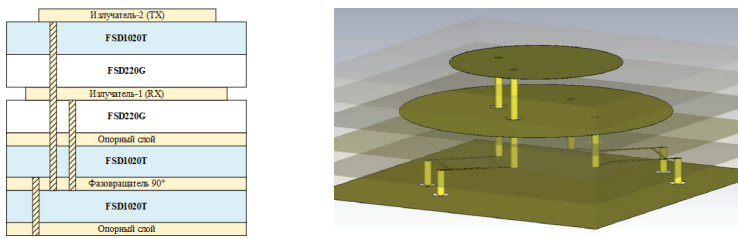
Kosteletskii V. P.
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia
kosteletskiy.vp@gmail.com

An transmit-receiving antenna element (AE) operating in the S-band has been developed. The AE provides frequency separation for reception and transmission using different circular polarization directions. It is designed for next-generation communication systems based on AESA. Its electrical characteristics and topology are shown.
Keywords: antenna element; AESA; antenna gain; patch antenna; S-band; non-terrestrial networks.

Одним из ключевых направлений развития спутниковых телекоммуникационных систем сегодня выступает развертывание глобального широкополосного доступа на платформе негеостационарных орбитальных группировок. Подобные архитектуры, закрепленные в спецификациях международного консорциума 3GPP, ориентированы на обеспечение непрерывного покрытия, включая удаленные и инфраструктурно необеспеченные регионы, за счет бесшовной интеграции спутникового сегмента в единую телекоммуникационную экосистему. Практическая реализация данной концепции требует создания спутниковой полезной нагрузки принципиально нового типа, способной к эффективному взаимодействию с наземными абонентскими терминалами по протоколам мобильной связи в первую очередь Direct-to-Device и Direct-to-Cell [1]. Наиболее рациональным техническим решением при построении такой нагрузки выступают активные фазированные антенные решетки (АФАР). Их применение продиктовано необходимостью быстрого электронного сканирования луча при движении космического аппарата на низкой орбите, а также возможностью одновременного формирования множества лучей, что напрямую влияет на пропускную способность и зону обслуживания [2]. Ключевым элементом, определяющим качество

предоставляемых услуг в гибридных системах связи, являются антенные элементы (АЭ), из которых формируется полотно АФАР. Именно их характеристики в конечном счете задают эффективность работы всей решетки.

Данная работа выполнялась в ФГАОУВО ТУСУР в рамках проекта Пр2030-МОН наука/СТП1/Б/19. В результате, разработан компактный АЭ с круговой поляризацией, работающий на прием (ПРМ) и передачу (ПРД) в диапазонах частот 2170–2200 МГц и 1970–2010 МГц соответственно. По уровню –15Дб ширина полосы ПРМ составила 85 МГц, а ПРД 100 МГц соответственно. Развязка между ПРМ и ПРД достигается за счет конструкции АЭ, и составляет не менее 30 дБ. Также АЭ реализует на ПРМ левую круговую поляризацию, а на ПРД правую. На центральных частотах получены: коэффициенты отражения (ПРМ = –16,6 дБ, ПРД = –17 дБ), коэффициенты усиления (ПРМ = 3,3 дБи, ПРД = 2,9 дБи), диаграммы направленности и коэффициента эллиптичности (ПРМ = 5, ПРД = 2,9). АЭ представляет собой планарную конструкцию (рис. 1), состоящую из пяти последовательно спрессованных диэлектрических слоев, между которыми расположены слои металлизации. На первых трех слоях расположены ПРМ и ПРД излучатели, на оставшихся слоях, два полосковых квадратурных моста.



а *б*

Рис. 1. Топология слоев (*а*) и трехмерная модель показывающая расположение составных частей (*б*) АЭ

Каждый мост рассчитан на свой диапазон ПРМ: 2170–2200 МГц и ПРД: 1970–2010 МГц. Такая конструкция легко реализуется в рамках типовых технологических процессов используемых производителями печатных плат. Широкая ДН такого АЭ позволяет использовать его для реализации полотна АФАР.

Параметры, предъявляемые к приемнику, наверное, приводить не целесообразно поскольку тематика тезисов сфокусирована на антенном элементе.

Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2026-0007 Минобрнауки России.

Литература

1. Co-Frequency Interference Analysis of Satellite-Direct-to-Device System on Terrestrial IMT Cellular Network / Q. Liu, L. Wang, R. Hou, Z. Zhang, X. Li and W. Zhao // 2025 3rd International Conference on Ubiquitous Communication (Ucom), Hang Zhou, China, 2025. P. 294–298.
2. Технические и регуляторные аспекты реализации спутниковых систем с прямым подключением к устройству / М. В. Стрелец, А. Н. Костин, А. С. Пастух и др. // Электросвязь, 2024. — № 9. — С. 2–11.

УДК 621.396.677

Компенсация нелинейных искажений в одноразрядной управляемой проходной фазированной антенной решетке С-диапазона

Григорьев И. В., Туральчук П. А., к. ф.-м. н.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
ivgigorev@etu.ru

Измерены характеристики управляемой антенной системы с диаграммообразующей схемой на основе p-i-n диодов. Использованы методы снижения нелинейных искажений за счет оптимизации управляющих напряжений на нелинейных элементах и внесения цифровых предыскажений.
Ключевые слова: антенны систем связи; проходные ФАР; нелинейные искажения; аппаратная линеаризация; цифровые предыскажения.

Nonlinear distortion compensation in a C-band 1-bit Reconfigurable Transmitarray Antenna

Grigoriev I. V., Turalchuk P. A., Ph.D
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5f Professora Popova St., Saint Petersburg, 197022, Russia
ivgigorev@etu.ru

The characteristics of a reconfigurable antenna system with a p-i-n diode based beamforming network have been measured. Methods for reducing nonlinear distortion by optimisation of the control voltage applied to the beamforming network and by subsequent digital predistortion are employed.
Keywords: communication system antennas; transmitarrays; nonlinear distortion; hardware linearisation; digital predistortion.

Альтернативой дорогостоящим полностью цифровым антенным решеткам для систем связи 5G/6G могут являться проходные фазированные антенные решетки (ПФАР) [1–3]. Однако из-за пространственного затухания первичного электромагнитного поля каждая элементарная ячейка ПФАР возбуждается сигналом различной мощности [4]. Это приводит к пространственно-распределенным нелинейным искажениям в управляющих элементах гибридной диаграммообразующей схемы (ДОС) [5]. При этом значительную долю нелинейных искажений вносят усилители мощности. Для повышения линейности приемо-передающего тракта, нагруженного на антенную систему с нелинейной ДОС, требуется применение эффективных методов компенсации интермодуляционных искажений.

В сравнительно бюджетной архитектуре ПФАР добиться высокой линейности возможно путем оптимизации напряжений смещения нелинейных элементов. Также, эффективность минимизации уровня утечки мощности в соседний канал (ACLR) в рассматриваемой архитектуре возможно увеличить за счет применения стандартных алгоритмов внесения цифровых предыскажений (DPD) [6, 7].

В работе исследуется применение аналогового и цифрового методов линеаризации одноразрядной ПФАР С-диапазона частот.

Изменение управляющего напряжения на нелинейных компонентах в составе ДОС позволяет минимизировать уровень ACLR. При оптимизации напряжения смещения p-i-n-диодов в диапазоне 1,0–1,2 В уровень ACLR снижается на 13–23 дБ в зависимости от линейности тракта формирования. Показано, что уровень излучаемых интермодуляционных продуктов ниже в условиях оптимального напряжения смещения на управляющих элементах ДОС. Для сигналов со сложным типом модуляции применение лишь аналогового метода может быть недостаточно. В рамках работы предложено дополнительное использование метода компенсации нелинейных искажений в ПФАР путем введения цифровых предыскажений по сигналу в дальней зоне. Введение цифровых предыскажений позволяет снизить ACLR до уровня −51 дБн при возбуждении сигналом LTE с полосой 20 МГц. При этом оптимальное напряжение на элементах ДОС смещается к верхней границе исследованного диапазона, где собственные искажения ячеек минимальны. Аналоговый метод снижает излучаемые интермодуляционные продукты без дополнительных вычислительных затрат и изменения аппаратной части, а цифровой метод позволяет достичь предельный уровень, определяемый собственным внеполосным излучением тракта формирования.

Таким образом, использование аналоговой оптимизации управляющих напряжений в ДОС и метода внесения цифровых предыскажений позволяет по принятому в дальней зоне сигналу эффективно линеаризовать приемо-передающий тракт и повысить качество излучаемого сигнала при сохранении низкой себестоимости как самой антенной системы, так и реализации исследуемых методов. Предложенный подход может рассматриваться как эффективное решение для современных систем связи.

Литература

1. Benefits of digital phased array radars / S. H. Talisa et al. // Proceedings of the IEEE, 2016. Vol. 104. № 3. P. 530–543.
2. Hansen R. C. Phased Array Antennas. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2009. 552 p.
3. Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review / S. V. Hum, J. Perruisseau-Carrier // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013. Vol. 62. № 1. P. 183–198.
4. PIN-diodes Phase-Shifters Power Consumption Estimation for Beam Scanning Transmitarray Application / V. V. Kirillov, P. A. Turalchuk // 2022 ElConRus. IEEE, 2022. P. 1066–1069.
5. Linearity of PIN Diode Switch in Both ON-state and OFF-state / F. Ghorbani et al. // 2023 EuMC. IEEE, 2023. P. 251–254.
6. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers / D. R. Morgan et al. // IEEE Transactions on signal processing, 2006. Vol. 54. № 10. P. 3852–3860.
7. Björnson E., Demir Ö. T. Introduction to multiple antenna communications and reconfigurable surfaces. Emerald Group Publishing, 2024. 210 p.

УДК 004.383.3, 681.513.6

Оптимизация вычисления ковариационной матрицы для адаптивных цифровых антенных решеток на ПЛИС

Калеев Д. В., к. т. н., Туринцев К. А.
ООО «Автономные технологии»
119607, г. Москва, Раменский б-р, 1
kaleev@org.miet.ru, billiscreezo228@gmail.com

Предложен рекурсивный метод оценки ковариационной матрицы для алгоритма МНК в цифровых ФАР. Решение снижает рост аппаратных затрат ПЛИС при масштабировании числа каналов. Разработана RTL-модель в формате с фиксированной точкой, обеспечивающая обработку сигналов ГНСС в реальном времени.
Ключевые слова: ПЛИС; пространственная фильтрация; ФАР; ковариационная матрица; алгоритм МНК; рекурсивное вычисление.

Optimization of Covariance Matrix Calculation for Adaptive Digital Antenna Arrays on FPGA

Kaleev D. V., Ph.D, Turintsev K. A.
Autonomous Technologies LLC
1, Ramensky Blvd., Moscow, 119607, Russia
kaleev@org.miet.ru, billiscreezo228@gmail.com

A recursive covariance matrix estimation method for the LMS algorithm in digital phased arrays is proposed. The solution mitigates the quadratic growth of FPGA hardware costs when scaling the number of channels. A fixed-point RTL model has been developed for real-time GNSS signal processing.
Keywords: FPGA; spatial filtering; phased array antennas; covariance matrix; LMS algorithm; recursive calculation.

Основной проблемой аппаратной реализации комплексного алгоритма МНК на базе ПЛИС является высокая ресурсоемкость модуля оценки ковариационной матрицы (CVM) [1]. В существующих решениях использование фильтра скользящего среднего (SMA) с окном наблюдения требует хранения больших объемов данных в блочной памяти (Block RAM). При этом количество необходимых блоков цифровой обработки сигналов (DSP) возрастает квадратично — как O(M^2), где M — число элементов антенной решетки [2].

В данной работе предлагается оптимизация модуля CVM за счет перехода к рекурсивным алгоритмам вычисления. В отличие от стандартных методов со скользящим средним, рекурсивное обновление (recursive block update) полностью исключает необходимость буферизации данных в длинных линиях задержки, заменяя их компактными итерационными вычислителями.

Для верификации предложенной архитектуры выполнен логический синтез RTL-модели для ПЛИС классов Artix-7 и Cyclone V. Вычисления производятся в формате с фиксированной точкой Q4.12, что обеспечивает оптимальный баланс между динамическим диапазоном и точностью сходимости. Целевая тактовая

частота работы модуля привязана к частоте работы АЦП и равняется 125 МГц. Итоговая утилизация ресурсов ПЛИС представлена в табл. 1 (табл. 1):

Таблица 1. Утилизация ресурсов ПЛИС при синтезе под семейство Artix7

Ресурс	M = 4	M = 8
LUT элементы	9500	12500
FF элементы	15000	25000
DSP-блоки	130	250

Литература

1. Джиган В. И. Адаптивные фильтры и их приложения в радиотехнике и связи. Часть 1. // Современная электроника, 2009. — № 9. — С. 56–63.
2. D. Kaleev, K. Turintsev. Fixed-Point Implementation of the LMS Adaptive Algorithm on FPGA for Digital Phased Array Signal Processing // 2026 ElCon Conference of Young Researchers in Computing & Processing, and Information Security (ElCon-CP), 2026.

УДК 621.396.96

Исследование возможности использования компараторов в MIMO РЛС

Съедин Е. М.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе исследована возможность применения компараторов в MIMO РЛС вместо АЦП для снижения аппаратной сложности и потока данных. Приведены результаты моделирования виртуальной антенной решетки и экспериментального сравнения трактов с АЦП и компаратором.
Ключевые слова: MIMO РЛС; однобитное аналого-цифровое преобразование.

Investigation of the feasibility of using comparators in MIMO radars

Syedin E. M.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

The paper investigates the possibility of using comparators in MIMO radar systems instead of ADCs to reduce hardware complexity and data throughput. The results of virtual antenna array simulation and an experimental comparison of receiver chains based on an ADC and a comparator are presented.
Keywords: MIMO radar; one-bit ADCs.

В работе рассматривается возможность применения компараторов в радиолокационных станциях на базе технологии множественного входа и множественного выхода (далее MIMO РЛС) с целью упрощения аппаратной реализации. Актуальность исследования обусловлена ростом числа каналов в современных MIMO РЛС: при использовании АЦП с увеличением разрядности возрастает объем выходных данных. В результате ограничивающим фактором становится уже не только сам узел преобразования, но и интерфейс передачи данных, а также вычислитель, на котором производится последующая цифровая обработка. Интерес к использованию малобитного, включая однобитное, квантования в MIMO-системах подтверждается рядом работ, в которых рассмотрены вопросы обнаружения целей в MIMO РЛС, а также оценки каналов и характеристик приема в системах связи [1]–[7].

В этой связи исследовалась возможность перехода от традиционного АЦП к компараторному приему, при котором компаратор рассматривается как простейшее однобитное квантующее устройство.

В рамках работы выполнено моделирование виртуальной антенной решетки MIMO РЛС с использованием BPSK-последовательностей, обеспечивающих разделение передающих каналов. Проведен анализ влияния разрядности квантования на уровень пиковых и интегральных боковых лепестков матрицы «дальность-скорость».

Моделирование показало, что снижение разрядности квантования с 8 до 1 бита приводит к возрастанию пикового уровня боковых лепестков на 0,5 дБ,

а интегрального — на 2 дБ при заданных условиях, но позволяет сократить информационный поток в восемь раз. В экспериментальной части изготовлены одноканальные макеты приемного тракта с АЦП и компаратором. Проведено сравнение сигналов, полученных при различных способах квантования, а также сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования. Полученные результаты показывают, что применение компараторов в MIMO РЛС представляет практический интерес для построения аппаратно упрощенных и энергоэффективных решений при условии использования алгоритмов обработки, адаптированных к низкой разрядности.

Литература

1. Huang W. et al. Target Detection in Massive MIMO Radar With Few-Bit ADCs // IEEE Transactions on Signal Processing, 2026. Vol. 74. P. 1190–1205.
2. Jacobsson S., Durisi G., Coldrey M., Gustavsson U., Studer C. One-Bit Massive MIMO: Channel Estimation and High-Order Modulations // Proceedings of the IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2015. P. 1304–1309.
3. Mollén C., Choi J., Larsson E. G., Heath R. W. Uplink Performance of Wideband Massive MIMO With One-Bit ADCs // IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017. Vol. 16. № 1. P. 87–100.
4. Cheng Z., He Z., Liao B. Target Detection Performance of Collocated MIMO Radar With One-Bit ADCs // IEEE Signal Processing Letters, 2019. Vol. 26. № 12. P. 1832–1836.
5. Y. M. Meleshin, R. N. Kolesnikov, E. M. Syedin, V. K. Tsvetkov, V. N. Karpov and A. L. Pereverzev. A Planar Wide-Angle 16×32 MIMO Antenna Array for K-Band Radar // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol. 25. № 6. P. 2481–2485.
6. Мелёшин Ю. М., Лавриненко А. Д., Съедин Е. М., Безруков И. А. Аппаратная реализация алгоритма со знакопеременным накоплением в MIMO радиолокаторах // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии, 2026. — Т. 9. — № 3. — С. 451–462.
7. Мелёшин Ю. М. Алгоритм управления пространственным распределением мощности в MIMO-радиолокаторах с BPSK- и QPSK-сигналами // Радиотехника, 2026. — Т. 90. — № 1. — С. 54–71.

УДК 53.088.7

Система грубого наведения прототипа наземного оптического терминала для лазерной связи в канале «Земля — высотная платформа»

Тюрников А. Ю., Гарифханов И. Т., Пономарев К. С., Кожанов И. А., Стрижак Д. В., к. т. н. Булатов К. М., Сафина Н. А., Алиев А., к. ф.-м. н. Зайцев Д. Л.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В работе представлена система грубого наведения прототипа наземного оптического терминала лазерной связи для канала «Земля — высотная платформа» и результаты ее испытаний. Система грубого наведения обеспечивает поиск объекта, первичный захват и сопровождение в пределах рабочего поля. Для сопровождения цели использован ПИД-регулятор, работающий по отклонению объекта в кадре от нулевого положения. Также разработанные алгоритмы применяются для решения задачи компенсации углов наклона принимаемого пучка, в которой требования к быстродействию существенно выше из-за атмосферных возмущений.

Ключевые слова: лазерная связь; высотная платформа; наземный оптический терминал; грубое наведение; сопровождение цели; опорно-поворотное устройство; ПИД-регулятор; угловые искажения.

Coarse pointing system for a ground-based optical terminal prototype for laser communication in an Earth-to-high-altitude platform link

Tyurnikov A. Yu., Garifkhanov I. T., Ponomarev K. S., Kozhanov I. A., Strizhak D. V., Bulatov K. M. Ph.D, Safina N. A., Aliev A., Zaitsev D. L. Ph.D
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

This paper presents the coarse pointing system of a prototype ground-based optical laser communication terminal designed for the Earth-to-high-altitude platform link, along with the results of its testing. The coarse pointing system performs target acquisition, initial capture, and tracking within the operational field of view. A PID controller is employed for target tracking, operating based on the target's deviation from the zero position within the image frame. Additionally, the developed algorithms are applied to compensate for the tilt angles of the incoming beam—a task requiring significantly higher response speeds due to atmospheric disturbances.

Keywords: laser communication; high-altitude platform; ground-based optical terminal; coarse pointing; target tracking; gimbal assembly; PID controller; angular distortions.

Лазерная связь представляет интерес для построения высокоскоростных каналов передачи данных между наземными станциями, высотными платформами и космическими аппаратами. По сравнению с радиоканалом она позволяет получить более высокую пропускную способность, а также отличается высокой направленностью излучения и узкой спектральной полосой. В системах такого типа, как правило, используется иерархия грубого и точного наведения [1, 2]. Система грубого наведения обеспечивает поиск объекта, первичный захват и сопровождение в пределах рабочего поля, тогда как последующие контуры обеспечивают более точную угловую стабилизацию.

В работе рассматривается система грубого наведения прототипа наземного оптического терминала лазерной связи для канала «Земля — высотная платформа». Основой системы является замкнутый контур управления, в котором положение цели определяется по видеопотоку с камеры. Он формирует управляющее воздействие на опорно-поворотное устройство. Реализованы режимы поиска, захвата и сопровождения цели.

Концептуальная схема прототипа отражает построение замкнутого программно-аппаратного контура оптического наведения и связи, обеспечивающего поиск, захват и сопровождение цели в составе наземного оптического терминала (рис. 1). В ходе испытаний на ТВ-имитаторе система обеспечила первичный захват стационарной цели со средним временем 0,6 с. Для движущейся цели среднее время первичного захвата составило 2,79 с. При сопровождении движущейся цели на интервале 100 с максимальная среднеквадратичная угловая ошибка сопровождения цели составила 0,93 угловых минут при скорости движения цели до 3 градусов в секунду.

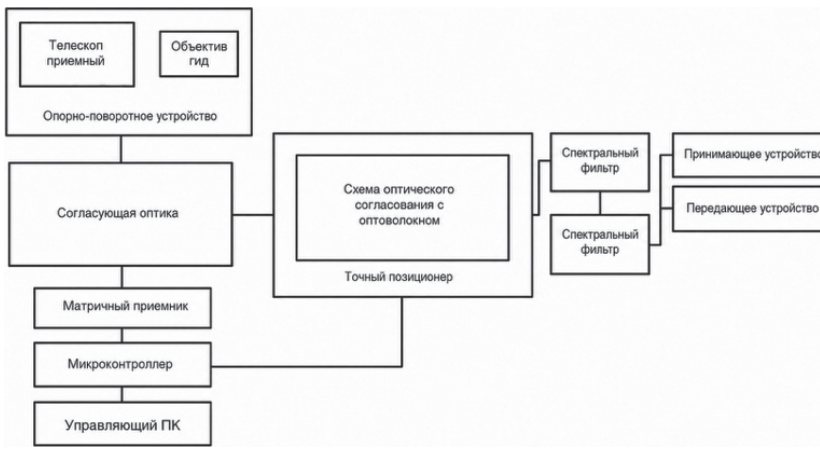


Рис. 1. Концептуальная схема прототипа наземного оптического терминал

Отдельное внимание уделено программной части системы. Разработан программный интерфейс доступа к монтировке, обеспечивающий управление опорно-поворотным устройством, непрерывный опрос его состояния и работу монтировки в замкнутом контуре сопровождения цели. Для сопровождения цели использован

ПИД-регулятор, работающий по отклонению объекта в кадре от нулевого положения с учетом ограничений, связанных с динамическими возможностями монтировки. Такое построение программной части позволяет отделить задачи обработки изображения от задач управления приводами и обеспечивает удобную интеграцию системы грубого наведения в общую архитектуру прототипа наземного терминала.

Помимо задачи грубого наведения, в работе рассмотрено применение используемых алгоритмов управления в другой подсистеме терминала — системе компенсации углов наклона принимаемого пучка. При распространении излучения в атмосфере возникают угловые искажения, из-за которых пучок приходит на приемную оптику с отклонением от расчетного направления. Это приводит к дополнительным потерям в приемном тракте и в ряде случаев делает дальнейший ввод излучения невозможным. Для компенсации таких отклонений использован быстродействующий гальвосканер с частотой отработки управляющих воздействий до 15 тысяч точек в секунду. Показано, что применяемый алгоритм управления эффективен и в этом контуре, несмотря на существенно более высокие требования к быстродействию по сравнению с системой грубого наведения. Полученные результаты подтверждают эффективность выбранного подхода как для задачи грубого наведения, так и для задачи быстрой угловой стабилизации пучка.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда НТИ в рамках Договора № 70-2025-000804 от 26.05.2025.

Литература

1. Kaymak Y. et al. A Survey on Acquisition, Tracking, and Pointing Mechanisms for Mobile Free-Space Optical Communications // IEEE Commun. Surv. Tutor, 2018. Vol. 20(2). P. 1104–1123. DOI: 10.1109/COMST.2018.2804323.
2. Abdelfatah R., Alshaer N., Ismail T. A review on pointing, acquisition, and tracking approaches in UAV-based FSO communication systems // Opt. Quantum Electron, 2022. Vol. 54: 571. DOI: 10.1007/s11082-022-03968-2.

УДК 0621.391.64: 551.55

Применение адаптивной оптики для коррекции атмосферных искажений в лазерном канале связи прототипа наземного терминала лазерной связи «Земля — высотная платформа»

Гарифханов И. Т., Пономарев К. С., Тюрников А. Ю., Кожанов И., Стрижак Д. В., к. т. н. Булатов К. М., Сафина Н. А., Алиев А., к. ф.-м. н. Зайцев Д. Л.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В работе рассматривается влияние атмосферной турбулентности на характеристики лазерного канала связи наземного терминала. Приведены результаты теоретического анализа и экспериментального исследования блужданий луча и фазовых искажений, включая оценку их характерных частот. На основе полученных данных разработан макет системы точного наведения с адаптивной оптикой, включающий датчик Шака—Гартмана, биморфное зеркало и петлю обратной связи коррекции волнового фронта.
Ключевые слова: лазерная связь; атмосферная турбулентность; адаптивная оптика; коррекция волнового фронта; биморфное зеркало; датчик Шака — Гартмана; блуждание луча; фазовые искажения.

The use of adaptive optics to correct atmospheric distortions in the laser communication channel of the prototype ground-based laser communication terminal “Earth — high-altitude platform”

Garifkhanov I. T., Ponomarev K. S., Tyurnikov A. Yu., Kozhanov I., Strizhak D. V., Ph.D Bulatov K. M., Safina N. A., Aliev A., Ph.D Zaytsev D. L.
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

The paper examines the influence of atmospheric turbulence on the characteristics of a laser communication channel for a ground terminal. The results of theoretical analysis and experimental study of beam wander and phase distortions are presented, including an assessment of their characteristic frequencies. Based on the obtained data, a prototype of a precision guidance system with adaptive optics has been developed, including a Shack–Hartmann sensor, a bimorph mirror, and a wavefront correction feedback loop.
Keywords: laser communication; atmospheric turbulence; adaptive optics; wavefront correction; bimorph mirror; Shack–Hartmann sensor; beam wander; phase distortions.

При распространении лазерного излучения в атмосферном канале турбулентные неоднородности показателя преломления приводят к флуктуациям интенсивности, уширению пучка, смещению его энергетического центра и фазовым искажениям. Для наземных терминалов лазерной связи эти эффекты снижают плотность мощности в фокальной плоскости и ухудшают эффективность ввода излучения в приемный тракт. Для компенсации таких возмущений применяется адаптивная

оптика, обеспечивающая коррекцию волнового фронта в реальном времени и стабилизацию пространственно-угловой структуры пучка [1].

Характерные частоты блуждания луча f_T и изменения фазовой картины f_G определяются формулами [2]:

$$f_T = 0{,}33 D^{-1/6} \lambda^{-1} \left[\int_0^L C_n^2(z) V^2(z) dz \right]^{1/2}, \quad f_G = 2{,}31 \lambda^{-6/5} \left[\int_0^L C_n^2(z) V^{5/3}(z) dz \right]^{3/5}.$$

Откуда для различных турбулентных профилей от слабого, соответствующего прохладной ночи, к сильному, соответствующему жаркому летнему дню в городе, можно оценить характерные частоты для длины волны $\lambda = 1550$ нм на расстоянии 10 км при умеренном ветре до 2 м/с:

Таблица 1. Характерные частоты атмосферных искажений для различных турбулентных профилей

C_n^2, м$^{-2/3}$	f_T, Гц	f_G, Гц
$1{,}0 \cdot 10^{-15}$	12	130
$1{,}0 \cdot 10^{-14}$	38	411
$1{,}7 \cdot 10^{-14}$	49	530
$1{,}0 \cdot 10^{-13}$	120	1300

В работе представлены результаты анализа влияния атмосферной турбулентности на характеристики лазерного канала связи и их сопоставление с экспериментальными данными. В ходе экспериментов получены данные о поведении пучка в атмосферном тракте; по ним оценены характерные частоты блужданий луча и фазовых искажений. Поскольку требования к быстродействию системы коррекции определяются временной структурой атмосферных возмущений и зависят от диапазона частот, в котором сосредоточена основная энергия флуктуаций, результаты анализа использованы при разработке макета системы точного наведения для наземного терминала лазерной связи с применением адаптивной оптики.

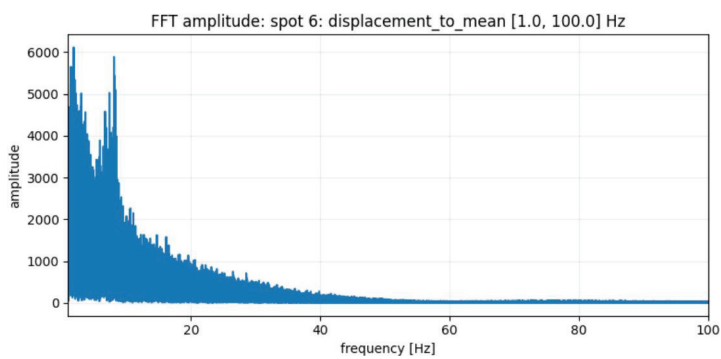


Рис. 1. Спектр колебаний пучка из-за атмосферных искажений при слабых турбулентности и ветре

В макете реализована зеркально-линзовая схема, позволяющая минимизировать хроматические аберрации и согласовать апертуру принятого пучка с корректирующими и измерительными узлами. Принятый пучок формируется так, чтобы полностью охватить топологическое зеркало ТМ, на котором происходит коррекция волнового фронта. Затем пучок сжимается до размеров стандартных оптических элементов. Пройдя через каскад делителей, пучок анализируется датчиком Шака — Гартмана, который по петле обратной связи корректирует поведение топологического зеркала [3]. Быстродействие датчика согласовано с характерными частотами атмосферных искажений и достигает 1 кГц, позволяя удерживать сфокусированный пучок в пределах размеров сердцевины одномодового оптоволокна величиной 9 мкм даже при высоких значениях турбулентности.

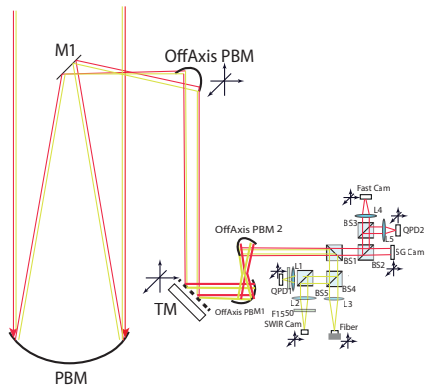


Рис. 2. Принципиальная схема системы точного наведения

Для описания волнового фронта используется модальное представление на основе полиномов Цернике, позволяющее учитывать вклад низших и средних аберраций. Коэффициенты разложения применяются для расчета управляющих воздействий на электроды биморфного зеркала с учетом влияния каждого канала на форму отражающей поверхности [4]. Петля обратной связи функционирует в замкнутом режиме: на каждом цикле измеряются остаточные искажения, вычисляется требуемая коррекция, после чего на управляющие электроды подаются напряжения, величина которых зависит от амплитуды соответствующих мод.

Литература

1. Toyoshima M. Recent trends in space laser communications for small satellites and constellations // J. Lightwave Technol., 2021. Vol. 39. P. 693–699.
2. Tyson R. K. Principles of Adaptive Optics. 4th ed. / Boca Raton: CRC Press, 2015.
3. Platt B. C., Shack R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing // J. Refract. Surg., 2001. Vol. 17 (5). P. S573–S577.
4. Toporovskiy V. et al. Bimorph deformable mirror with a high density of electrodes to correct for atmospheric distortions // Appl. Opt., 2019. Vol. 58 (22). P. 6019–6026.

УДК 621.3.049.774, 621.391.63, 519.725

Реализация высокоскоростного модема наземного терминала оптической связи на ПЛИС с исследованием эффективности кодов коррекции ошибок в атмосферном канале.

Кожанов И. А., Гарифханов И. Т., Пономарев К. С., Тюрников А. Ю., Стрижак Д. В., к. т. н. Булатов К. М., Сафина Н. А., Алиев А. Э., к. ф.-м. н. Зайцев Д. Л.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Разработан прототип модема на базе ПЛИС для наземного терминала лазерной связи в свободном пространстве. Реализована передача данных в реальном времени со скоростью 1 Гбит/с, а также методы коррекции ошибок на основе сверточных и LDPC (Low Density Parity Check, код с малой плотностью проверок на четность) кодов. Проведено исследование эффективности этих кодов применительно к атмосферным оптическим каналам связи «земля–высотная платформа» и «земля–низкоорбитальный спутник».
Ключевые слова: лазерная связь; высотная платформа; низкоорбитальный спутник; наземный терминал; ПЛИС; коды коррекции ошибок; атмосферный канал связи.

FPGA-Based High-Speed Ground-Terminal Modem for Free-Space Optical Communication with Error-Correction Coding for the Atmospheric Channel

Kozhanov I. A., Garifkhanov I. T., Ponomarev K. S., Tyurnikov A. Yu., Strizhak D. V., Bulatov K. M., Safina N. A., Aliev A. E., Zaitsev D. L.
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

An FPGA-based modem prototype has been developed for a ground terminal of a free-space laser communication system. Real-time data transmission at a rate of 1 Gbit/s has been implemented, along with error-correction methods based on convolutional and LDPC (Low-Density Parity-Check) codes. The efficiency of these codes has been investigated with respect to atmospheric optical communication channels of the "ground–high-altitude platform" and "ground–low-earth-orbit satellite" types.
Keywords: laser communication; high-altitude platform; low-earth-orbit satellite; ground terminal; FPGA; error-correction codes; atmospheric communication channel.

Одним из наиболее перспективных каналов связи является лазерная связь в свободном пространстве (FSO, Free-Space Optical), обеспечивающая скорости передачи данных, недостижимые для традиционных радиоканалов, а также высокую устойчивость к радиочастотным и электромагнитным помехам. В настоящее время активно ведутся исследования и разработки систем связи между группировками спутников, наземными терминалами и высотными платформами [1].

В данной работе описывается разработка модема для наземного терминала лазерной связи, предназначенного для формирования данных в оптическом тракте канала «земля–высотная платформа» или «земля–низкоорбитальный спутник». Передача данных с наземного терминала осложняется наличием атмосферных флуктуаций (турбулентности, поглощения, рассеяния), вызывающих значительные искажения сигнала и повышение уровня битовых ошибок. Для обеспечения надежной передачи в таких условиях необходимо применение специализированных протоколов, ориентированных на работу в каналах с высоким уровнем шума. За основу принят протокол SDA (Space Development Agency) [2], в котором широко используются коды коррекции ошибок (FEC, Forward Error Correction, коды прямого исправления ошибок). Суть FEC-кодирования состоит в добавлении к информационным битам избыточных, что позволяет с высокой вероятностью обнаруживать и исправлять ошибки на стороне приемника без повторной передачи. Эффективность применения LDPC-кодов в системах FSO-связи показана, в частности, для каналов с быстрыми замираниями [3].

Актуальные скорости передачи данных в современных системах FSO-связи составляют порядка 1–10 Гбит/с. Настоящая работа направлена на создание модема, обеспечивающего скорость симплексной передачи данных на скорости 1 Гбит/с с исследованием возможности ее увеличения. В качестве оптического трансивера используются стандартные SFP-модули с длиной волны 1550 нм, что обусловлено их совместимостью с волоконно-оптическими компонентами тракта терминала, наличием окна прозрачности атмосферы на данной длине волны, а также удобством интеграции в существующие системы обработки информации. Для формирования сигнала применяется ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) Kintex UltraScale+ XCKU5P (AMD Xilinx), позволяющая реализовать алгоритмы коррекции ошибок в режиме реального времени на скоростях порядка 1 Гбит/с и обеспечивающая гибкость при прототипировании. Также в работе исследуется эффективность аппаратной реализации используемых кодов коррекции ошибок на ПЛИС к задаче исправления ошибок в атмосферном оптическом канале связи. Реализованные методы FEC-кодирования, LDPC-код с кодовой скоростью 1/2 для информационных данных и сверточный код с кодовой скоростью 1/6 для заголовка пакета, обеспечивают снижение BER с уровня 10^{-3}, характерного для атмосферного FSO-канала в условиях умеренной турбулентности, до уровня ниже 10^{-9}.

Литература

1. Limi I. A., Monteiro P. P. Revolutionizing Free-Space Optics: A Survey of Enabling Technologies, Challenges, Trends, and Prospects of Beyond 5G Free-Space Optical (FSO) Communication Systems // Sensors, 2024. Vol. 24. № 24. Art. 8036. DOI: 10.3390/s24248036.
2. Space Development Agency. Optical Communications Terminal Standard. Version 4.0.0. 2024. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sda.mil/wp-content/uploads/2024/07/SDA_OCT_Standard_4.0.0_final-20240701.pdf (дата обращения: 10.04.2026).
3. Sonali, Dixit A., Jain V. K. Analysis of LDPC Codes in FSO Communication System Under Fast Fading Channel Conditions // IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021. Vol. 2. P. 1663–1673. DOI: 10.1109/OJCOMS.2021.3095758.

УДК 621.396.9

Разработка программно-аппаратного комплекса для генерации сигналов глобальной спутниковой системы навигации

Авдеев Е. А., Сердюков В. В.
Кубанский государственный университет
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149
eliseyavdeev@mail.ru

В данной работе представлен программно-аппаратный комплекс (ПАК) класса 01.01 «Модульные программно-аппаратные комплексы базовых станций» для генерации сигналов глобальной спутниковой системы навигации, реализованный на базе программно-определяемого радио (SDR) с использованием микрокомпьютера.
Ключевые слова: спуфинг; спутниковая система навигации; беспилотные летательные аппараты; геолокация; искусственные координаты; логистика; транспортировка.

Development of a Hardware and Software Complex for Global Navigation Satellite System Signal Generation

Avdeev E. A., Serdyukov V. V.
Kuban State University
149 Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia
eliseyavdeev@mail.ru

This paper presents a hardware and software system for generating global satellite navigation system signals, implemented using a software-defined radio (SDR) and a microcomputer.
Keywords: spoofing; satellite navigation system; unmanned aerial vehicles; geolocation; artificial coordinates; logistics; transportation.

В настоящее время беспилотные авиационные системы (БАС) находят все большее применение в различных индустриальных отраслях. Наиболее часто БАС применяются для инвентаризации складов, доставки небольших грузов, обработки сельскохозяйственных территорий. Однако каждая из этих задач подразумевает перемещение БАС внутри зон, экранированных от сигнала спутников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Это приводит к тому, что БАС не могут прокладывать маршруты самостоятельно и требуют ручной корректировки траектории [1].

В рамках данного проекта разрабатывался ПАК, способный генерировать сигналы ГНСС. Благодаря этому БАС, используя стандартный GPS модуль, способен мгновенно установить свое местоположение и перейти в искусственную систему координат. Его создание можно разделить на три этапа.

Первый этап включает в себя разработку программ для электронных вычислительных машин (ЭВМ) для генерации файлов, содержащих отчеты искусственных спутников и передачи этих данных с помощью SRD. Первая программа получает на вход данные реальных спутников, полученных из архивов NASA, и формирует

сообщение, содержащее данные о последнем местоположении (GGA) протокола NMEA-0813 [2]. Вторая программа, разработанная в среде GNU Radio основанной на языке программирования Python, передает данные с помощью SDR.

Во второй этап входит подбор элементов аппаратной базы и их соединение. Для передачи сигнала было использовано программно-определяемое радио HackRF. Данное решение обусловлено тем, что оно портативно, удобно в управлении и тем, что рабочие частоты большинства SDR включают в себя 1575,42 МГц. Для управления HackRF, хранения передаваемых данных и исполнения программы передачи был выбран микрокомпьютер Raspberry Pi 3 Model B. Итоговая схема аппаратной части представлена на рис. 1.

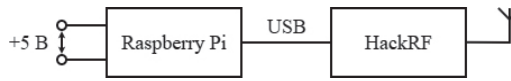


Рис. 1. Структурная схема аппаратной части

Третий этап состоял в разработке корпуса для аппаратной части для обеспечения ее надлежащего функционирования в агрессивных средах. Для моделирования модели была использована программа Autodesk Inventor. Чертеж корпуса представлен на рис. 2.

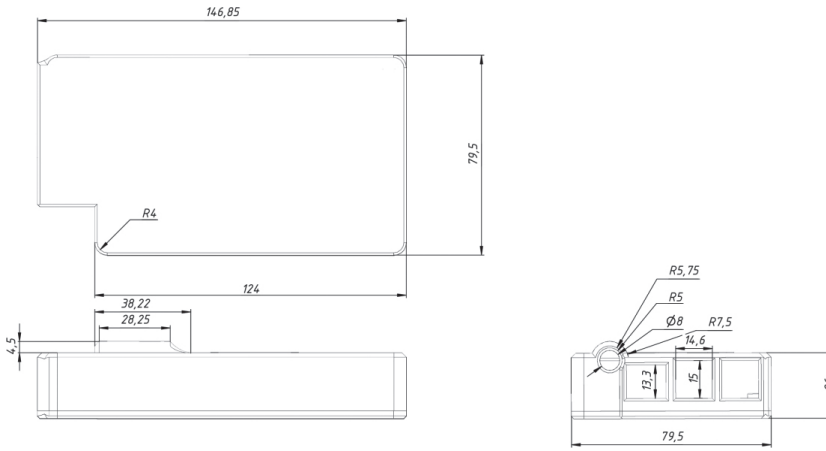


Рис. 2. Чертеж корпуса аппаратной части

Проверка работоспособности ПАК проводилась в программе u-Center. В качестве приемника выступал приемник на базе модуля u-blox NEO-6M, способного принимать сигналы NMEA-0813. В результате проверки были установлены следующие характеристики ПАК:

- дальность работы ПАК — 100 м;
- точность позиционирования с 1 базовой станцией — до 2 метров;
- выходная мощность: от 3 мВт до 32 мВт
- стандарты работы: GPS-L1 1575,42 МГц, GPS-L2 1227,6 МГц.

Литература

1. Москалева Ю. А. Система глобального позиционирования / Ю. А. Москалева, А. С. Лямчева, В. В. Корчагин // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС, 2022. — С. 180–182.
2. Щербакова М. П. Формат записи координат в сообщении протокола NMEA-0183 / М. П. Щербакова, П. А. Безмен // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении, 2022. — С. 223–228.

УДК 621.382

Разработка системы для идентификации подвижных объектов по технологии КМОП System on Chip

Михалева З. В., Сердюков В. В.
Кубанский государственный университет
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149
lassa.vanter@yandex.ru

Представлена разработка КМОП системы на кристалле для идентификации подвижных объектов. Приведены архитектурные решения, обеспечивающие обработку видеопотока и выделение движущихся целей. Представлены графики зависимости точности от порога, энергопотребления от частоты и задержки от разрешения кадра. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенной System on Chip (SoC) при частоте 100 МГц.
Ключевые слова: КМОП; система на кристалле; идентификация объектов; подвижные объекты; обработка видеопотока; выделение движения; аппаратная реализация; графики зависимостей.

Development of a system for identifying moving objects using CMOS System on Chip technology

Mihaleva Z. V., Serdyukov V. V.
Kuban State University
149 Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia
lassa.vanter@yandex.ru

The development of a CMOS system-on-a-chip for identifying moving objects is presented. Architectural solutions for video stream processing and moving target detection are presented. Plots of accuracy versus threshold, power consumption versus frequency, and latency versus frame resolution are presented. Simulation results confirm the performance of the proposed SoC at a frequency of 100 MHz.
Keywords: CMOS; system-on-a-chip; object identification; moving objects; video stream processing; motion detection; hardware implementation; dependency plots.

Системы идентификации подвижных объектов находят широкое применение в видеонаблюдении, охранных комплексах и робототехнике. Ключевыми требованиями к таким системам является работа в реальном времени при минимальном энергопотреблении и малой длительности обработки информации. Наиболее эффективным решением является реализация специализированной системы на кристалле (SoC) по КМОП-технологии на кристалле [1].

Была разработана архитектура КМОП SoC для идентификации подвижных объектов по технологии 180 нм с обеспечением обработки видеопотока стандартного разрешения.

Разработанная SoC построена по типовой архитектуре и включает следующие функциональные блоки.

Процессорное ядро, память, блок выделения движения, блок идентификации, управляющий контроллер, аналоговый интерфейс сенсора, АЦП и ЦАП,

интерфейсы ввода-вывода, таймеры и счетчики, регуляторы напряжения и управление питанием, источник опорной частоты — кварцевый резонатор и ФАПЧ.

Технологический процесс — 180 нм КМОП[2]. Структурная схема показана на рис. 1.

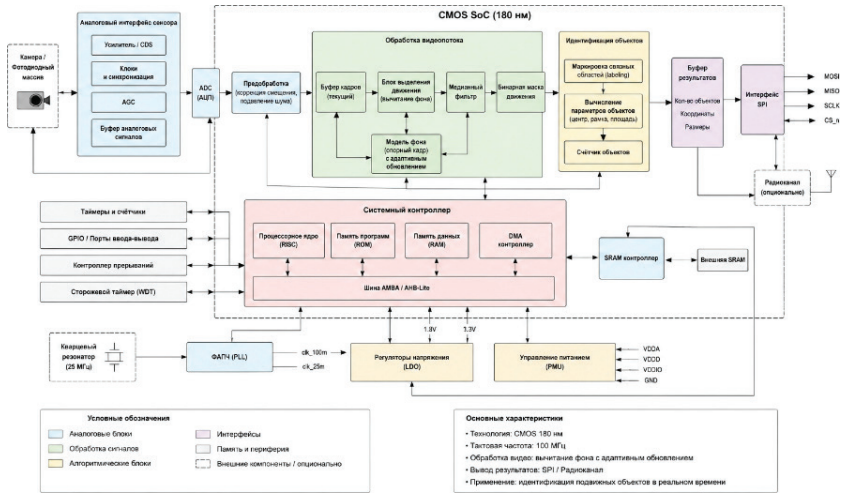


Рис. 1. Структурная схема CMOS SoC системы для идентификации подвижных объектов

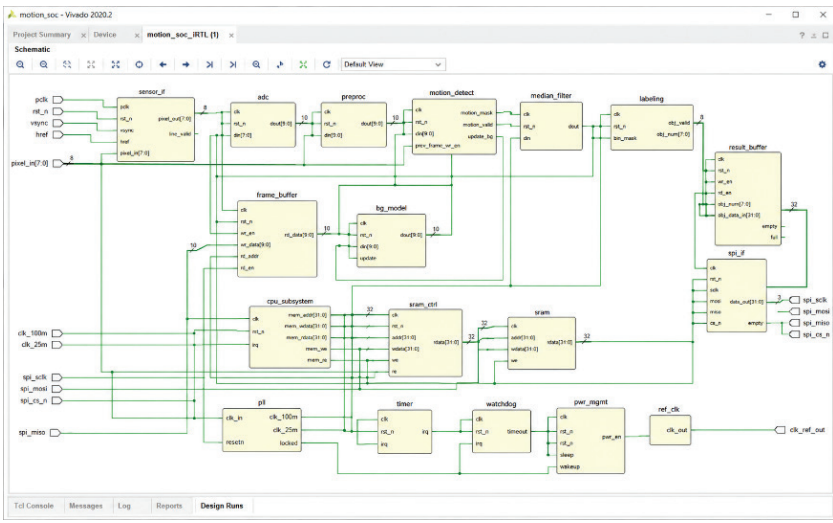


Рис. 2. RTL-код CMOS SoC системы для идентификации подвижных объектов

На данный момент созданы архитектурная модель и RTL-код основных блоков (проектирование топологии и изготовление кристалла не проводились). Фрагмент реализованного RTL-кода приведен на рис. 2.

Принцип работы основан на аппаратной реализации метода вычитания фона с адаптивным обновлением опорного кадра[1]. Видеопоток поступает через аналоговый интерфейс, преобразуется в цифровое полутоновое изображение. Блок выделения движения попиксельно вычисляет разность между текущим и опорным кадрами. Пиксели, превысившие порог, считаются принадлежащими движущемуся объекту.

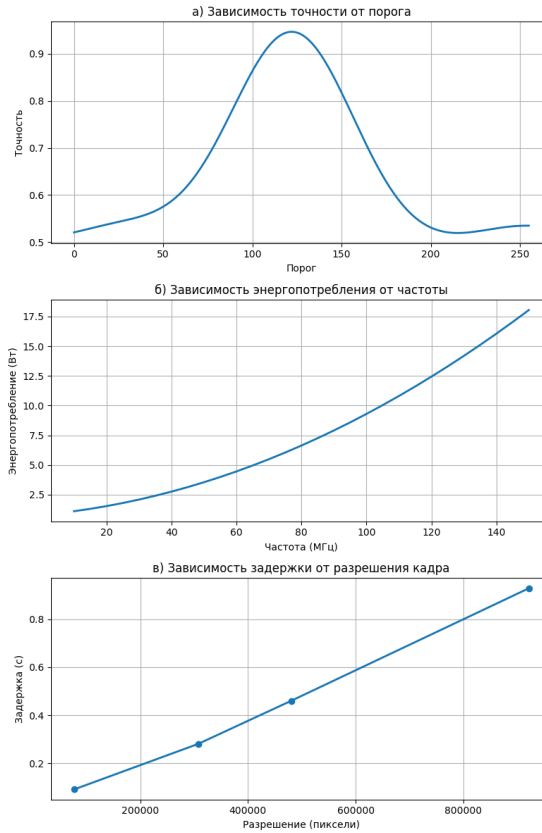


Рис. 3. Зависимости точности идентификации, энергопотребления и задержки обработки в КМОП SoC

Верификация проводилась методом функционального моделирования в САПР Cadence Incisive. Тестовые видеопоследовательности (разрешение 640×480, 8 бит на пиксель) подавались на вход RTL-модели. Точность идентификации

оценивалась сравнением с эталонной разметкой (метрика F1). Энергопотребление оценивалось по данным библиотеки стандартных ячеек для 180 нм при разных частотах[2]. Задержка измерялась от момента приема последнего пикселя кадра до выдачи результата.

Выходные данные (число объектов, их координаты и размеры) могут передаваться по интерфейсу SPI на внешний микроконтроллер или по радиоканалу. Ключевые результаты функционального моделирования представлены на рис. 3.

График зависимости точности идентификации от порога показал, что максимальная точность системы достигается при значении порога около 120 уровней яркости и составляет приблизительно 0,95. При меньших значениях порога возрастает влияние шумов и количество ложных срабатываний, а при больших значениях часть пикселей движущихся объектов не выделяется, что приводит к снижению точности идентификации. График зависимости энергопотребления от тактовой частоты в диапазоне 10–150 МГц демонстрирует нелинейный рост мощности от примерно 1 Вт до 18 Вт вследствие увеличения динамического энергопотребления CMOS логики[2]. График зависимости задержки обработки от разрешения кадра показывает рост времени обработки при увеличении числа пикселей: для разрешения 640×480 задержка составляет около 0,28 с, а при разрешении 1280×720 достигает приблизительно 0,93 с, что соответствует особенностям аппаратной обработки видеопотока в разработанной CMOS SoC системе[1, 2].

Литература

1. Стемпковский А., Шилин В. КМОП-фотодиодные СБИС. Перспективная элементная база однокристальных систем приема и обработки информации // Электроника: наука, технология, бизнес, 2003. — № 2. — С. 14–21.
2. Бибило П. Н. и др. Система логического проектирования функциональных блоков заказных КМОП СБИС с пониженным энергопотреблением // Микроэлектроника, 2018. — Т. 47. — № 1. — С. 72–88.

УДК 621.396.42

Изучение и модульное создание программно-определяемого радио на базе ПЛИС и АЦП с использованием цифрового смесителя

Литвиненко Т. И., Сердюков В. В., Голан А. В.
Кубанский государственный университет
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149
gooko43@gmail.com

Разработана модульная архитектура программно-определяемого радио (SDR) на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) семейства Xilinx Zynq SP2 и высокоскоростных АЦП с частотой дискретизации 50 МГц. Приведены технические характеристики узлов цифровой обработки сигналов и описание реализованного в ПЛИС цифрового смесителя.
Ключевые слова: программно-определяемое радио (SDR); ПЛИС; АЦП; цифровой смеситель; цифровая обработка сигналов.

Research and Modular Design of an FPGA-based Software-Defined Radio with ADC and Digital Mixer

Litvinenko T. I., Serdyukov V. V., Golan A. V.
Kuban State University
149 Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia
gooko43@gmail.com

A modular architecture of a software-defined radio (SDR) based on Xilinx Zynq SP2 field-programmable gate arrays (FPGAs) and high-speed ADCs with a sampling rate of 50 MHz has been developed. The technical characteristics of the digital signal processing units and the implemented FPGA-based digital mixer are presented.
Keywords: software-defined radio (SDR); FPGA; ADC; digital mixer; digital signal processing.

На сегодняшний день одним из наиболее перспективных способов построения систем радиосвязи и радиолокации является использование технологии программно-определяемого радио (SDR) [1]. Системы, построенные на базе SDR с применением ПЛИС, обладают следующими преимуществами:

- высокая гибкость за счет возможности программной перестройки параметров радиошлейфа;
- высокая скорость параллельной обработки сигналов в реальном времени;
- снижение массогабаритных характеристик за счет исключения громоздких компонентов;
- поддержка широкого диапазона рабочих частот.

Одним из факторов, сдерживающих активное внедрение высокопроизводительных SDR-систем, является сложность интеграции современных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с вычислительными узлами на базе ПЛИС [2]. В рамках работ по созданию модульного SDR-решения были разработаны:

- комплект программно-аппаратных модулей для цифровой обработки сигналов (ЦОС) [3], обеспечивающих перенос частоты и фильтрацию.
- универсальный модуль цифрового смесителя, реализованный в виде аппаратного IP-блока для ПЛИС семейства Xilinx Zynq SP2 [4];
- алгоритмы управления высокоскоростным интерфейсом захвата данных с АЦП с частотой дискретизации 50 МГц;

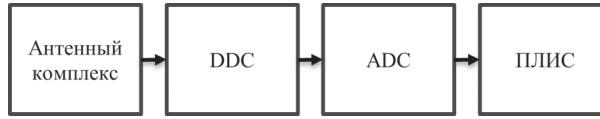


Рис. 1. Схема подключения модулей

В состав системы входят три основных компонента. Первый — блок сопряжения с высокоскоростным АЦП, обеспечивающий корректный захват сигналов. Второй компонент — цифровой вычислительный модуль на ПЛИС, выполняющий функции цифрового смесителя (DDC). Третий компонент — интерфейсный контроллер, предназначенный для передачи обработанной информации на верхний уровень для дальнейшего анализа.

Разработан цифровой понижающий преобразователь (DDC) на базе ПЛИС Xilinx Zynq-7020 в виде параметризируемого IP-модуля на языке Verilog HDL. Включающий 32-битный численно-управляемый генератор (NCO) и фильтр нижних частот. DDC обеспечивает перенос спектра оцифрованных сигналов на нулевую частоту с формированием квадратурных составляющих I и Q.

Экспериментально подтверждена работоспособность разработанного программно-определяемого радио на базе ПЛИС и АЦП с использованием цифрового смесителя при частоте дискретизации 50 МГц в одно- и двухканальном режимах. С помощью встроенного логического анализатора ILA и внешнего осциллографа зафиксирована стабильная оцифровка сигналов с двух антенн без существенных искажений. Погрешность измерения фазового сдвига по экспериментальным данным не превышает 5°. Потребляемые ресурсы ПЛИС составляют 18% LUT, 12% DSP, 9% RAM.

Литература

1. Галкин В. А. Основы программно-конфигурируемого радио. — М.: Горячая линия — Телеком, 2013. — 372 с. — ISBN 978-5-9912-0305-0.
2. Соловьев В. В. Проектирование цифровых систем на ПЛИС. — М.: Горячая линия — Телеком, 2011.
3. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учебное пособие. 3-е изд. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 768 с. — ISBN 978-5-9775-0606-9.
4. Потехин Д. С., Тарасов И. Е. Разработка систем цифровой обработки сигналов на базе ПЛИС. 2-е изд., стер. — М.: Горячая линия — Телеком, 2017. — 248 с. — ISBN 978-5-9912-0673-0.

УДК 621.382.3

Разработка интегральной микросхемы аналого-цифрового преобразователя программно-определяемого радио

Касьянова К. Д., Сердюков В. В., д. т. н. Коротков К. С.
Кубанский государственный университет
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149

Исследована возможность разработки интегральной микросхемы аналого-цифрового преобразователя для применения в составе программно-определяемого радио. Рассмотрены основные архитектуры аналого-цифровых преобразователей, проведен их сравнительный анализ по критериям быстродействия, энергопотребления, разрешающей способности и степени интеграции. Для разрабатываемого АЦП определены целевые характеристики: разрядность 12 бит, частота дискретизации до 12,5 Мвыб/с, эффективная разрядность не менее 10,5 бит и ориентировочная потребляемая мощность не более 350 мВт. В качестве базового выбран КМОП-техпроцесс 180 нм, обеспечивающий приемлемый компромисс между быстродействием, стоимостью разработки, доступностью производства и возможностью интеграции аналоговых и цифровых блоков на одном кристалле. Выполнено сравнение с зарубежными аналогами и определены конкурентные преимущества разрабатываемого решения для отечественных программно-определяемых радиосистем.
Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь; программно-определяемое радио; интегральная микросхема; система на кристалле; цифровая обработка сигналов.

Development of an Integrated Circuit of an Analog-to-Digital Converter for Software- Defined Radio

Kasyanova K. D., Serdyukov V. V., Sc.D Korotkov K. S.
Kuban State University
149 Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia

The possibility of developing an integrated circuit of an analog-to-digital converter for use in software-defined radio is investigated. The main architectures of analog-to-digital converters are considered, and their comparative analysis is carried out according to the criteria of speed, power consumption, resolution and degree of integration. The applicability of the selected architecture in domestic software-defined radio systems is evaluated.
Keywords: analog-to-digital converter; software-defined radio; integrated circuit; system on a chip; digital signal processing.

На сегодняшний день одним из наиболее актуальных направлений развития радиоэлектронной аппаратуры являются программно-определяемые радиосистемы, обеспечивающие высокую гибкость конфигурирования и возможность адаптации параметров работы без изменения аппаратной части устройства. Одним из ключевых узлов таких систем является аналого-цифровой преобразователь, который

определяет качество оцифровки входного радиосигнала, полосу обрабатываемых частот, динамический диапазон и точность последующей цифровой обработки.

Для современных систем программно-определяемого радио требуется создание АЦП, обеспечивающего сочетание высокого быстродействия, достаточной разрядности и умеренного энергопотребления.

В качестве целевых параметров разрабатываемой интегральной микросхемы АЦП приняты: разрядность 12 бит, максимальная частота дискретизации до 12,5 Мвыб/с, дифференциальный входной сигнал, эффективная разрядность не менее 10,5 бит в рабочей полосе частот, отношение сигнал/шум не ниже 42 дБ и динамический диапазон без паразитных составляющих не ниже 50 дБс. Предполагаемая потребляемая мощность должна составлять не более 350 мВт при реализации в составе однокристального решения. Указанные характеристики позволяют использовать преобразователь в приемных трактах программно-определяемого радио, работающих с широкополосными сигналами, а также в системах связи, измерительных комплексах и устройствах промышленного интернета вещей.

В качестве базового технологического маршрута выбран КМОП-техпроцесс 180 нм. Данный техпроцесс является достаточно зрелым для реализации смешанных аналого-цифровых интегральных схем, поддерживает формирование прецизионных пассивных элементов, включая конденсаторы и резисторы, и обеспечивает возможность интеграции аналогового ядра АЦП, цифровой коррекции, блоков управления и интерфейсных схем на одном кристалле. По сравнению с более крупными нормами проектирования он обеспечивает лучшее быстродействие и меньшую площадь кристалла, а по сравнению с более современными субмикронными техпроцессами характеризуется меньшей стоимостью разработки и более высокой устойчивостью аналоговых узлов к технологическим разбросам.

Особенно важной задачей является разработка интегральной микросхемы АЦП, пригодной для реализации в составе отечественной элементной базы. Создание подобного устройства позволит достичь ряда существенных преимуществ, таких как:

- независимость от импортной электронной компонентной базы;
- снижение стоимости конечных систем связи;
- повышение уровня интеграции аппаратуры программно-определяемого радио;
- возможность применения в перспективных системах связи и промышленного интернета вещей.

В работе рассмотрены основные архитектурные решения аналого-цифровых преобразователей, применяемых в радиотехнических системах, включая АЦП последовательного приближения, сигма-дельта АЦП, конвейерные и параллельные АЦП. Проведен сравнительный анализ указанных архитектур с точки зрения возможности их использования в программно-определяемом радио. Установлено, что для широкополосных радиосистем наибольший интерес представляют конвейерные и гибридные архитектуры, обеспечивающие компромисс между скоростью преобразования, точностью и сложностью реализации. Особое внимание уделено вопросам интеграции АЦП на одном кристалле с другими функциональными узлами радиотракта, включая генераторы тактовых сигналов, цифровые блоки управления и интерфейсы передачи данных. Рассмотрена возможность применения разработанной топологии в составе системы на кристалле для программно-определяемого

радио. Данные работы выполнялись специалистами физико-технического факультета ФГБОУ ВО «КубГУ».

Для оценки конкурентоспособности разрабатываемого АЦП проведено сравнение его целевых характеристик с параметрами ряда серийных микросхем, применяемых в радиотехнических и программно-определяемых системах. Сравнение приведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение разрабатываемого АЦП с аналогами

Микросхема / решение	**Разрядность**	**Частота дискретизации**	**Особенности**
Разрабатываемый АЦП	12 бит	до 12,5 Мвыб/с	КМОП 180 нм, ориентация на отечественную элементную базу, возможность интеграции в состав SoC для SDR
Analog Devices AD9230	12 бит	до 250 Мвыб/с	Высокоскоростной АЦП общего назначения, импортное исполнение
Analog Devices AD9648	14 бит	до 125 Мвыб/с	Более высокая разрядность, двухканальное исполнение, повышенные требования к стоимости и энергопотреблению
Linear Technology LTC2208	16 бит	до 130 Мвыб/с	Высокий динамический диапазон, но значительное энергопотребление и сложность применения
Analog Devices AD9361	12 бит	используется в составе SDR-трансивера	Высокая степень интеграции, но закрытая архитектура и зависимость от импортной компонентной базы

Как видно из сравнения, зарубежные аналоги обеспечивают высокие значения быстродействия и динамического диапазона, однако их применение в отечественных программно-определяемых радиосистемах связано с рядом ограничений, включая зависимость от импортных поставок, высокую стоимость, ограниченную доступность технической документации на внутреннюю структуру и невозможность адаптации архитектуры под специализированные требования.

В результате определены основные требования к интегральной микросхеме аналого-цифрового преобразователя для программно-определяемого радио, выбран перспективный вариант архитектурной реализации и сформированы подходы к дальнейшей разработке топологии интегральной схемы.

Литература

1. Коротков К. С. и др. Методы проектирования и исследования функциональных узлов радиоэлектронных устройств для систем связи.
2. Сердюков В. В., Касьянова К. Д., Коротков К. С. Исследование архитектур аналого-цифровых преобразователей для широкополосных радиосистем.

3. Свидетельство о государственной регистрации топологии микросхемы № 2025630201 Российская Федерация. Восьмиразрядный модуль управления синтезатором произвольных сигналов: заявл. 06.08.2025: опубл. 18.08.2025 / Е. В. Строганова, В. В. Сердюков, А. В. Голан; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет».

УДК 629.056.6

Автономное навигационное устройство на основе кластера MEMS-датчиков и гетерогенного нейроморфного наблюдателя системы

Кузнецов М. А.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
a.d.surkova@mail.ru

Предложена архитектура автономного встраиваемого навигационного устройства, функционирующего в условиях непостоянного ГНСС-сигнала. В отличие от традиционных подходов, рассматривающих датчики и алгоритмы раздельно, устройство объединяет кластер MEMS-датчиков, обеспечивающий избыточность и снижение случайных ошибок, и гетерогенный нейронаблюдатель, восстанавливающий математическую модель движения объекта в реальном времени. Такое решение позволяет формировать устойчивую оценку координат, скоростей и ориентации даже при полном отсутствии внешней коррекции, сохраняя малые габариты и пригодность для работы в реальном времени.
Ключевые слова: автономная навигация; MEMS-датчики; кластеризация датчиков; наблюдатель состояния; гетерогенный нейронаблюдатель; нелинейная математическая модель; встраиваемые навигационные системы; ГНСС; комплексирование измерений; отказоустойчивость.

Autonomous Navigation Device Based on a MEMS Sensor Cluster and a Heterogeneous Neuromorphic System Observer

Kuznetsov M. A.
Bauman MSTU
5 2nd Baumanskaya St., Bldg. 1, Moscow, 105005, Russia
a.d.surkova@mail.ru

An architecture of an autonomous embedded navigation device capable of operating under intermittent GNSS signals is proposed. Unlike traditional approaches that treat sensors and algorithms separately, the device integrates a MEMS sensor cluster, which provides redundancy and reduces random errors, and a heterogeneous neuro-observer that reconstructs the mathematical model of the object's motion in real time. This solution makes it possible to obtain a stable estimate of coordinates, velocity, and orientation even in the complete absence of external correction, while maintaining small size and suitability for real-time operation.
Keywords: autonomous navigation; MEMS sensors; sensor clustering; state observer; heterogeneous neuro-observer; nonlinear mathematical model; embedded navigation systems; GNSS; measurement fusion; fault tolerance.

Разработка автономных навигационных средств, сохраняющих работоспособность при отсутствии сигналов ГНСС, является важной задачей для современных встраиваемых систем. Для подвижных объектов требуется компактное бортовое

устройство, способное в реальном времени формировать устойчивую оценку навигационных параметров без постоянной внешней коррекции. Основное ограничение таких систем связано с тем, что доступные по массе, габаритам и стоимости МЭМС-датчики обладают заметными шумами, дрейфами и ограниченной точностью, из-за чего их прямое применение в автономной навигации затруднено.

В работе предлагается концепция единого встраиваемого навигационного устройства, в котором измерительная подсистема и подсистема оценивания состояния рассматриваются как единая архитектура. В отличие от подходов, где датчики, фильтры и вычислительные модули рассматриваются раздельно, в данном случае речь идет о построении законченного прибора, способного на борту выполнять сбор первичной информации, ее предварительное комплексирование, восстановление состояния объекта и выдачу итоговых навигационных параметров в управляющий контур.

Аппаратной основой устройства является кластер МЭМС-датчиков, в котором несколько чувствительных элементов параллельно измеряют одни и те же параметры движения. Такая архитектура позволяет уменьшить влияние случайных ошибок отдельных каналов, повысить устойчивость к отказам и сформировать более надежную первичную оценку по сравнению с одиночным датчиком. Проведенные ранее исследования показали, что применение алгоритмов комплексирования, включая невзвешенное суммирование, нечеткую логику и фильтр Калмана, позволяет повышать точность и надежность обработки сигналов МЭМС-кластеров, а также снижать требования к отдельному датчику при сохранении работоспособности системы в целом.

Ключевая особенность новой работы состоит в том, что кластерная измерительная схема дополняется наблюдателем состояния, предназначенным для восстановления нелинейной математической модели движения объекта и уточнения оценки его текущего состояния в реальном времени. Такой подход особенно важен в условиях неопределенностей, внешних возмущений и неполной априорной информации о динамике объекта. В качестве модельной основы рассматривается ранее разработанный подход гетерогенного нейронаблюдателя, в котором используются разнородные функции активации, встроенное численное интегрирование методом Эйлера и адаптивное упрощение структуры модели. Это позволяет не только аппроксимировать данные, но и формировать компактные интерпретируемые нелинейные дифференциальные уравнения, пригодные для встроенной реализации.

Таким образом, предлагается устройство, в котором кластер МЭМС обеспечивает измерительную избыточность и первичное повышение достоверности данных, а наблюдатель состояния обеспечивает модельную коррекцию и адаптацию к реальной динамике объекта. Совместное применение этих двух уровней должно обеспечить получение устойчивой оценки координат, скоростей и ориентации даже в условиях отсутствия спутниковой навигации.

Научная новизна работы заключается в предложении архитектуры единого автономного навигационного устройства без ГНСС, объединяющего кластеризацию МЭМС-датчиков и адаптивное нелинейное наблюдение состояния в рамках одного компактного и масштабируемого навигационного модуля для робототехнических, транспортных и других применений, где внешняя навигационная коррекция недоступна, подавлена или ненадежна.

Литература

1. Selezneva, M.S., Zhang L., Viktorovich P.A., Neusypin K.A. Adaptive estimation algorithm for correcting low-cost MEMS-SINS errors of unmanned vehicles under the conditions of abnormal measurements // Sensors, 2021. Vol. 21. № 2. P. 1–16. DOI: 10.3390/s21020623.
2. Selezneva, M.S., Zhang L., Neusypin K.A., Wang S. A new adaptive Kalman filter for navigation systems of carrier-based aircraft // Chinese Journal of Aeronautics, 2021. Vol. 34. № 1. P. 416–425. DOI: 10.1016/j.cja.2021.04.014.
3. Селезнева, М.С., Неусыпин К.А. Коррекция навигационной системы летательного аппарата с помощью адаптивных фильтров Калмана // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2022. — № 11. — С. 25–36. — DOI: 10.24412/2071-6168-2022-11-25-36.
4. Кузнецов Михаил Александрович. Использование кластеров микроэлектромеханических датчиков в навигационных системах // Наноиндустрия, 2025. — ISSN 1993-8578. — URL: http://elibrary.ru/item.asp?id=83211923.

УДК 621.3.049

Адаптивный скалярный алгоритм оценивания для коррекции инерциальных навигационных систем на микромеханических датчиках

Суркова А. Д.
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1
a.d.surkova@mail.ru

В работе исследуется задача повышения точности инерциальных навигационных систем (ИНС), выполненных на основе микромеханических (MEMS) чувствительных элементов. Подобные системы вследствие низкой стоимости и малых массогабаритных характеристик находят широкое применение в бортовом оборудовании беспилотных авиационных систем (БАС). Предложен адаптивный скалярный алгоритм оценивания (САО), обеспечивающий компенсацию погрешностей ИНС в реальном масштабе времени в условиях интенсивного маневрирования БАС. В основе алгоритма лежат разработанные численные критерии степени адаптивности переменных состояния модели погрешностей ИНС, позволяющие оперативно настраиваться на изменяющийся характер ошибок. Результаты математического моделирования подтверждают повышение точности коррекции на 6–8 % по сравнению с известными аналогами.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы; инерциальная навигационная система; MEMS-датчики; адаптивный скалярный фильтр; степень адаптивности; коррекция навигационной информации.

Adaptive Scalar Estimation Algorithm for Correction of Inertial Navigation Systems

Surkova A. D.
Bauman Moscow State Technical University
105005, Russia, Moscow, 2-ya Baumanskaya Street, Building 5-1
a.d.surkova@mail.ru

The paper addresses the problem of improving the accuracy of inertial navigation systems (INS) based on micromechanical (MEMS) sensors. Due to their low cost and small size and weight, such systems are widely used in onboard equipment of unmanned aerial systems (UAS). An adaptive scalar estimation algorithm (SEA) is proposed for real-time compensation of INS errors under intense maneuvering of the UAS. The algorithm employs developed numerical criteria for the degree of adaptability of the state variables of the INS error model, enabling rapid tuning to changing error characteristics. Results of mathematical modeling confirm a 6–8 % improvement in correction accuracy compared to known analogs.

Keywords: unmanned aerial systems; inertial navigation system; MEMS sensors; adaptive scalar filter; degree of adaptability; navigation information correction.

В настоящее время беспилотные авиационные системы (БАС) все чаще оснащаются инерциальными навигационными системами (ИНС) на основе микроэлектромеханических (MEMS) датчиков. Указанные системы обладают неоспоримыми преимуществами — низкой стоимостью, малыми массой и габаритами, что обуславливает их широкое применение в бортовой аппаратуре БАС. Вместе с тем, погрешности MEMS-ИНС (дрейф гироскопов, смещение нуля акселерометров) характеризуются значительной скоростью накопления во времени, а в режимах интенсивного маневрирования достигают величин, недопустимых для решения навигационных задач. В условиях жестких ограничений на вычислительные ресурсы бортового спецвычислителя наиболее целесообразным методом повышения точности является алгоритмическая коррекция.

Стандартная схема коррекции ИНС предполагает использование внешнего источника навигационной информации, в качестве которого чаще всего выступает глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС). В такой схеме сигналы ИНС и ГНСС поступают на блок сравнения, где формируется разностный сигнал, содержащий смесь погрешностей обеих систем. Эта информация подается на вход алгоритма оценивания — как правило, фильтра Калмана. Последний, используя априорную математическую модель погрешностей ИНС, выделяет оценку ошибок инерциальной системы, которая затем вычитается из выходного сигнала ИНС, обеспечивая компенсацию. Однако классический фильтр Калмана требует достоверной априорной информации о статистических характеристиках входного и измерительного шумов, что на практике не всегда выполнимо, особенно при интенсивном маневрировании БАС. Кроме того, его реализация в матричной форме предъявляет повышенные требования к вычислительным ресурсам.

В работе разработан адаптивный скалярный алгоритм оценивания (САО), представляющий собой модификацию фильтра Калмана, отличающуюся введением жесткой обратной связи по обновляемой последовательности. Ключевая особенность предложенного подхода — использование численных критериев степени адаптивности переменных состояния модели погрешностей ИНС. Указанные критерии представляют собой скалярные величины, вычисляемые на основе дисперсий приведенного измерительного шума, и позволяют выполнять ранжирование компонент вектора состояния по скорости реакции на изменение характера ошибок. При снижении степени адаптивности ниже заданного порога осуществляется переключение алгоритма на полную скалярную модель с дополнительными приведенными измерениями, что обеспечивает сокращение времени получения достоверных оценок.

Эффективность разработанного алгоритма подтверждена результатами математического моделирования, которое показало, что в условиях интенсивного маневрирования БАС применение адаптивного САО обеспечивает повышение точности коррекции погрешностей ИНС в среднем на 6–8 % относительно классического скалярного алгоритма оценивания. При этом требования к вычислительным ресурсам остаются минимальными, что критически важно для практической реализации на борту БАС.

Литература

1. Woffinden, D.C.; Geller, D.K. Observability criteria for angles-only navigation // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 2009, 45, 1194–1208.

2. Hou, B. Relevance of network characteristics to controllability degree // IEEE Trans. Autom. Control, 2021, 66, 5436–5443.
3. Hernandez, J.; Tsotsos, K.; Soatto, S. Observability, identifiability and sensitivity of vision-aided inertial navigation // Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, WA, USA, 26–30 May 2015; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2015; P. 2319–2325.
4. Grantham, W.J.; Vincent, T.L. A controllability minimum principle // J. Optim. Theory Appl. 1975, 17, 93–114.
5. Чжан, Л.; Неусыпин, К.А.; Селезнева, М.С. Новый метод определения степени управляемости переменных состояния для задачи LQR с использованием теоремы двойственности // Appl. Sci., 2020. — Т. 10. — № 15. — С. 5234. — DOI: 10.3390/app10155234.
6. Nebylov, A.V.; Panferov, A.I.; Brodsky, S.A. Mathematical models, designing, analysis and synthesis of control systems of the complex flexible objects // Proceedings of the 2005 International Conference on Physics and Control (PhysCon), St. Petersburg, Russia, 24–26 August 2005; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2005. P. 491–496.

УДК 534.8, 681.586

Разработка и исследование газового сенсора на основе волн в пластинах с полимерным чувствительным покрытием

Иванова Е. С., Смирнов А. В., к. ф.-м. н.
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
ivanova.es@phystech.edu, andre-smirnov-v@yandex.ru

Рассмотрены возможности создания газового сенсора на основе акустоэлектронной линии задержки на волнах в пластинах с чувствительным полимерным покрытием из полиметилметакрилата (ПММА). Исследовано влияние паров органических соединений (хлороформ, ацетон, этанол) на амплитудно- и фазо-частотные характеристики акустического сигнала для различных мод сенсора. Экспериментально установлено, что характер зависимостей параметров сенсора от концентрации газа существенно различается для каждого аналита, что подтверждает работоспособность устройства и его чувствительность к летучим органическим соединениям.
Ключевые слова: акустоэлектронный сенсор; волны в пластинах; полиметилметакрилат; линия задержки; летучие органические соединения; хлороформ; ацетон; этанол; ниобат лития; амплитудно- и фазо-частотные характеристики.

Development and research of a gas sensor based on waves in plates with a polymer sensitive coating

Ivanova E. S., Smirnov A. V., Ph.D
V. A. Kotelnikov IRE RAS
11 Mokhovaya St., Bldg. 7, Moscow, 125009
ivanova.es@phystech.edu, andre-smirnov-v@yandex.ru

The possibilities of creating a gas sensor based on an acousto-electronic delay line on waves in plates with a sensitive polymer coating of polymethylmethacrylate (PMMA) are considered. The effect of vapors of organic compounds (chloroform, acetone, and ethanol) on the amplitude and phase-frequency characteristics of an acoustic signal for various sensor modes has been studied. It has been experimentally established that the nature of the dependence of the sensor parameters on the gas concentration differs significantly for each analyte, which confirms the operability of the device and its sensitivity to volatile organic compounds.
Keywords: acousto-electronic sensor; waves in plates; polymethylmethacrylate; delay line; volatile organic compounds; chloroform; acetone; ethanol; lithium niobate; amplitude and phase-frequency characteristics.

Техническими характеристиками идеального газового датчика являются: высокая чувствительность, точность, селективность, длительный срок службы, компактность и низкая стоимость. Для их реализации ведется разработка различных газовых сенсоров, каждый из которых имеет те или иные недостатки. Особое место среди газовых сенсоров занимают акустоэлектронные, создаваемые на основе линий задержки и резонаторов. Они подразделяются на три основных типа: устройства

на объемных акустических волнах (ОАВ), поверхностных акустических волнах (ПАВ) и на акустических волнах в пластинах (АВП). Датчики на ОАВ чувствительны к изменениям адсорбированной массы, их основным параметром измерения является резонансная частота. Чувствительность таких устройств небольшая, так как рабочий диапазон частот варьируется от 5 до 50 МГц. Сенсоры на ПАВ обладают очень высокой чувствительностью не только к массе, но и к любым изменениям на поверхности, их рабочий диапазон частот — от 30 МГц до 15 ГГц [1]. Однако у них существует одно важное конструктивное ограничение: нанесение тонкой пленки может происходить лишь в области между электродами. Преимущество датчиков на волнах в пластинах, заключается в том, что чувствительное покрытие можно нанести на тыльную сторону пластины, используемой в устройстве. Таким образом, происходит полная изоляция электродов от исследуемых газов, и чувствительность сенсора остается высокой [2].

Данная работа посвящена исследованию возможности использования акустоэлектронной линии задержки на волнах в пластинах с чувствительным покрытием из ПММА в качестве сенсора летучих органических соединений, таких как хлороформ, ацетон и этанол.

Для осуществления исследования была создана акустоэлектронная линия задержки на волнах в пластинах, представляющая собой пьезоэлектрическую пластину YX-среза ниобата лития размерами 13,5×23×0,35 мм, с нанесенными на нее электродными структурами — встречно-штыревыми преобразователями (ВШП): длина волны $\lambda = 200$ мкм, расстояние между принимающим и излучающим ВШП $L = 10{,}2$ мм, апертура ВШП $A = 9050$ мкм, количество пар штырей $N = 20$, $h/\lambda = 1{,}75$. Между электродами линии задержки на тыльную поверхность пластины наносилось чувствительное покрытие из ПММА методом центрифугирования. Для проведения исследований с парами целевых газов была разработана специализированная измерительная камера, представляющая собой разборную конструкцию, состоящую из двух основных компонентов: основания в форме эллиптической камеры на опорных ножках и герметично закрывающей ее крышки. Был использован автоматизированный измерительный стенд, который выполняет регулируемую подачу воздуха и паров органического раствора в измерительную камеру и одновременно с этим обеспечивает непрерывную регистрацию параметров акустического сигнала в исследуемом датчике.

В ходе эксперимента были получены амплитудно- и фазо-частотные характеристики акустической волны сенсора с покрытием и без него. Было выявлено, что 7-ая мода сенсора демонстрирует наибольшую чувствительность к массовой нагрузке при нанесении покрытия, соответственно ниже приведены концентрационные зависимости изменения амплитуды и фазы для данной моды сенсора (рис. 1). А также приведены графики смещения резонансных пиков АЧХ и ФЧХ для данной моды в парах хлороформа, ввиду наибольшего отклика сенсора на данные пары (рис. 1). Сенсор с чувствительным покрытием на основе ПММА продемонстрировал высокий отклик на пары хлороформа, средний — на пары ацетона и слабый — на пары этанола. Полученные результаты были объяснены с позиции модели растворимости Хансена.

Проведенное исследование подтвердило работоспособность и чувствительность акустоэлектронного сенсора на волнах в пластинах с полимерным покрытием к парам органических соединений, продемонстрировав зависимость его

характеристик от типа и концентрации газа. Данный тип устройств является перспективным для дальнейшей разработки газоаналитических систем, однако для оптимизации конструкции сенсора и повышения его отклика на соответствующие пары, например, за счет изменения морфологии покрытий, требуются дополнительные исследования.

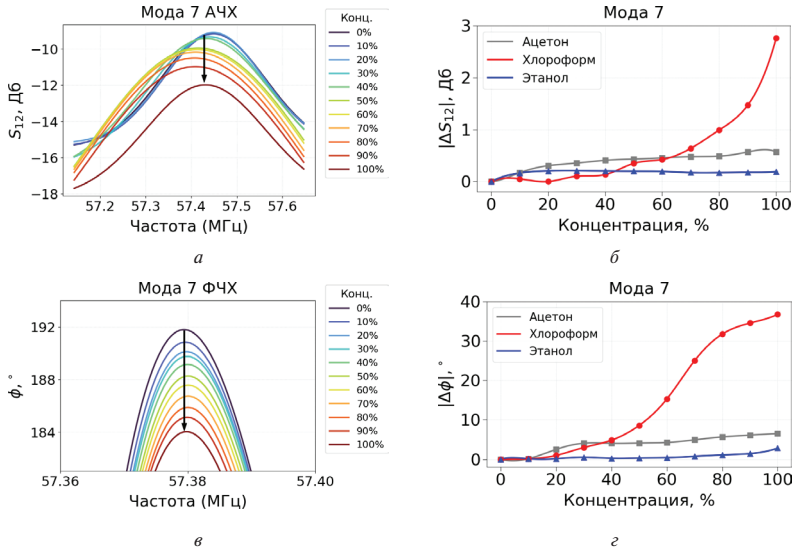


Рис. 1. Смещение резонансных пиков АЧХ моды 7 в парах хлороформа (*а*), зависимость изменения амплитуды от концентрации паров мода 7 (*б*); смещение резонансных пиков ФЧХ моды 7 в парах хлороформа (*в*), зависимость изменения фазы от концентрации паров мода 7 (*г*)

Литература

1. Lange K. Bulk and Surface Acoustic Wave Sensor Arrays for Multi-Analyte Detection: A Review // Sensors, 2019. Vol. 19(24): 5382.
2. Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. Акустические волны в тонких пьезоэлектрических пластинах. — М.: Радиотехника, 2018. — 240 с.

УДК 621.3.049

Исследование ресурсоемкости и быстродействия вариантов согласованного фильтра для систем связи с расширением спектра методом прямой последовательности

Аришин И. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
afafyfafa@yandex.ru

Проведено исследование ресурсоемкости и быстродействия различных архитектур согласованного фильтра для приемников прямого расширения спектра при реализации на ПЛИС. Приведены количественные оценки занимаемых логических ресурсов и максимальной тактовой частоты для классического трансверсального фильтра, последовательного коррелятора, параллельно-последовательных и сегментированных структур. Показаны варианты оптимизации согласованного фильтра в зависимости от требований к скорости обработки и доступным аппаратным ресурсам ПЛИС.
Ключевые слова: прямое расширение спектра; широкополосный сигнал; согласованный фильтр; система связи.

Research on resource consumption and computational speed of matched filter implementations for direct-sequence spread spectrum communication systems

Arishin I. V.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
afafyfafa@yandex.ru

The resource consumption and computational speed of various matched filter architectures for direct-sequence spread spectrum receivers implemented on FPGAs have been investigated. Quantitative estimates of logic resource utilization and maximum clock frequency are provided for the classical transversal filter, the serial correlator, parallel-serial structures, and segmented architectures. Optimization approaches for the matched filter are presented, depending on the requirements for processing speed and the available hardware resources of the FPGA.
Keywords: direct sequence spread spectrum; wideband signal; matched filter; communication system.

В докладе рассматривается проблема высокой ресурсоемкости согласованного фильтра в приемниках систем связи с расширением спектра методом прямой последовательности при реализации на ПЛИС. Показано, что классическая трансверсальная архитектура фильтра на основе многоразрядных умножителей-накопителей может занимать до 80–90% логических ресурсов и блоков Digital Signal Processing (DSP) целевой ПЛИС, что критично для малогабаритных устройств. Проведен сравнительный анализ альтернативных архитектур: последовательного коррелятора, параллельно-последовательных и сегментированных структур.

Для каждой архитектуры получены количественные оценки занимаемых ресурсов, которые представлены в табл. 1, а именно: Look-up Table (LUT), Flip-Flop (FF), Block Random Access Memory (BRAM), DSP и максимальной тактовой частоты при синтезе для ПЛИС семейств Kintex-7 и Artix-7.

Таблица 1. Оценка занимаемых ресурсов

	LUT	FF	BRAM	DSP	$t_{зад}$, нс	F_{max}, МГц
Трансверсальный фильтр	40032	71096	0	1024	5	180
Последовательная структура	19586	32097	0	0	600	251
Параллельно-последовательная структура	24104	41160	0	16	320	243
Сегментированная структура	9976	13568	32	0	480	280

Установлено, что последовательный коррелятор обеспечивает минимальное потребление ресурсов при длине последовательности 1024, но проигрывает по быстродействию.

Параллельно-последовательные архитектуры позволяют достичь компромисса между скоростью обработки и аппаратными затратами, обеспечивая тактовую частоту до 243 МГц при увеличении ресурсов не более чем на 30 % по сравнению с последовательным вариантом.

Сегментированная структура обеспечивает самую высокую максимальную тактовую частоту среди всех рассмотренных вариантов при минимальном использовании LUT и FF.

На основе полученных результатов сформулированы рекомендации по выбору оптимальной архитектуры согласованного фильтра для приемников с различными требованиями к занимаемым ресурсам и быстродействию.

Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. — 1104 с.
2. Якименко Л. Введение в цифровую фильтрацию. 1-е изд. — М.: МИР, 1976. — 217 с.
3. Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. — М.: Техносфера, 2013. –528 с.

УДК-546.302

Фоторезисты на основе металлоорганических и координационных соединений металлов для EB- и EUV-литографии

Кискин М.А.
Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН
119071, г. Москва, Ленинский пр-т 31
mkiskin@igic.ras.ru

Доклад представляет анализ работы по исследованию металлоорганических и координационных соединений металлов в качестве негативных фоторезистов для микроэлектроники. В докладе уделено внимание особенностям подбора исходных молекулярных соединений металлов, процессам получения пленок фоторезиста, механизмам разложения в условиях EB- и EUV-литографии и формированию наноструктур на подложках.
Ключевые слова: координационные соединения; негативный фоторезист; тонкие пленки; фотолиз; литография.

Photoresists based on metallorganic and metal coordination compounds for EB and EUV lithography

Kiskin M.A.
N.S. Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of RAS
31 Leninsky Ave., Moscow, 119071, Russia
mkiskin@igic.ras.ru

The report presents an analysis of research into metallorganic and metal coordination compounds as negative photoresists for microelectronics. The report focuses on the selection of initial molecular metal compounds, photoresist film production processes, degradation mechanisms under EB and EUV lithography conditions, and the formation of nanostructures on substrates.
Keywords: coordination compounds; negative photoresist; thin films; photolysis; lithography

Современная микроэлектроника тесно связана с развитием подходов к получению электронных компонент и сложных интегральных схем, получаемых методами фотолитографии и легирования. Бурное развитие электроники определило необходимость перехода интегральных схем устройств на наноуровень, а внедрение интегральных схем с высокой плотностью компонент способствует ускорению и совершенствованию электронных технологий. В фотолитографии миниатюризация схемы напрямую зависит от длины волны излучения, переход от видимого света к глубокому ультрафиолету (DUV) позволили разрабатывать интегральные схемы с топологией 100–200 нм, а внедрение экстремального ультрафиолета (EUV) приблизило получение технологических узлов размером 5 нм и менее. Переход на наноуровень предъявляет свои требования к методу, чистоте процесса и выбору фоторезиста — ключевого компонента в процессе литографии. Фоторезист представляет собой материал, который под воздействием света селективно формирует

заготовку-маску, на основе которой, методом обратной литографии (напыление, электроосаждение) формируют интегральную схему. В качестве компонент пленки могут быть использованы металлорганические или координационные соединения, способные разлагаться до оксидов в условиях DUV, EB и EUV, формируя полупроводниковый фоторезист. Перспективность использования этого подхода обусловлена более высоким сечением атомного фотопоглощения металлов в сравнении с элементами органических фоторезистов, для атомов цинка и меди оно превышает в разы, для олова и сурьмы — на порядок.

В данном обзорном докладе будут обсуждены особенности подбора исходных молекулярных соединений металлов, процесса получения пленок фоторезиста, механизмы разложения и формирования наноструктур на подложках.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 25-73-20065).

УДК 544.6.018.2. 620.22

Формирование и применение композиционных метаструктур на основе пористого анодного оксида алюминия

к. т. н. Муратова Е. Н.
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
sokolovaeknik@yandex.ru

Систематизирована технология формирование нанопористых мембран на основе оксида алюминия с заданными пор (20–220 нм). Предложена методика экспресс диагностики нанопористых мембран, основанная на анализе оптических спектров пропускания. Рассмотрены новые области применение композиционных метаструктур на основе оксида алюминия.
Ключевые слова: анодный оксид алюминия; нанопористые мембраны; метаструктуры; оптическая диагностика; экранирование ИК-излучения; каналирование ионов.

Fabrication and Applications of Composite Metastructures Based on Porous Anodic Aluminum Oxide

Ph.D, Muratova E. N.
SPbSETU "LETI"
5/F Professor Popov St., Saint Petersburg, 197022, Russia
sokolovaeknik@yandex.ru

The paper systematizes the technology for forming nanoporous alumina membranes with controlled pore diameters in the range of 20–220 nm. A method for rapid diagnostics of such membranes based on the analysis of optical transmission spectra is proposed. Promising applications of composite metastructures based on anodic aluminum oxide are discussed.
Keywords: anodic aluminum oxide; nanoporous membranes; metastructures; optical diagnostics; IR shielding; ion channeling.

На сегодняшний день наноструктурированные материалы находят применение в самых различных областях. Ключевым фактором научно-технологического прогресса в наномасштабе выступает проявление у материальных систем новых, ранее не наблюдавшихся свойств и функциональных возможностей при переходе к нанометровому уровню, что обусловлено особенностями протекания процессов переноса заряда, энергии, массы и информации в условиях наноструктурирования. Многие отличительные характеристики наноматериалов по сравнению с объемными аналогами того же химического состава связаны с существенным увеличением доли поверхности, приходящейся на нанозерна и нанокластеры [1]. Именно этим объясняется появление новых свойств у целого ряда структурных и неорганических наноматериалов.

Спектр применения наноструктур непрерывно расширяется. Разработка новых устройств требует создания материалов с атомарно гладкими границами раздела. В связи с этим в настоящей работе рассматриваются современные метаматериалы на основе оксида алюминия [1].

Цель доклада — охарактеризовать текущее состояние и перспективы развития конформной микро- и наноэлектроники, включающей широкий круг инновационных наноустройств и миниатюрных распределенных систем на базе пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) [1–3]. Проанализированы особенности формирования наноразмерных слоев и мембран, представляющих собой систему упорядоченных одноосно-ориентированных капилляров на основе оксида алюминия с диаметром пор от 20 нм и аспектным отношением до 500. Такие структуры получают методом электрохимического анодирования алюминиевой фольги толщиной в десятки микрон в электролитах, содержащих ортофосфорную, щавелевую или серную кислоту. Приведены результаты исследования ключевых структурно-морфологических характеристик, полученные с помощью атомно-силовой и растровой электронной микроскопии, спектроскопии резерфордовского обратного рассеяния и рентгеноспектрального микроанализа, а также кинетические и температурные зависимости.

Оптические свойства изучены фотометрическими методами, результаты представлены в виде спектральных зависимостей в широком интервале длин волн от 200 нм до 16 мкм [4]. На основе полученных данных предложен метод диагностики пористой структуры, базирующийся на анализе оптических спектров пропускания. Установлено, что разброс значений диаметра пор не превышает 15 %, а в спектре пропускания выделены области, позволяющие проводить экспресс-характеризацию мембраны по основным структурным и геометрическим параметрам.

Продемонстрирован ряд перспективных направлений использования структур на основе пористого оксида алюминия, в том числе в востребованных устройствах нового поколения [5–7]. Рассмотрены области биомедицины, такие как лаборатория на чипе и липосомальный экструдер, где ключевым элементом выступают мембраны из ПАОА. Кроме того, показано, что созданный нанопористый материал обеспечивает экранирование инфракрасного излучения в спектральном диапазоне 8–14 мкм, соответствующем области теплового излучения биологических объектов. Изготовленные на основе анодированной алюминиевой фольги наноразмерные капиллярные маски-мембраны позволяют осуществлять каналирование высокоэнергетического потока ионов гелия с энергией 1,5–2 МэВ; экспериментально подтвержденный коэффициент прохождения составляет более 60 %.

Литература

1. Lushpa N. V., Tai D. H., Chernyakova K. V. et al. Chapter 13 in book “New Materials: Preparation, Properties and Applications in the Aspect of Nanotechnology” / Ed. by Andrey G. Syrkov and Kirill L. Levine, Published by Nova Science Publishers, 2020. P. 125–132.
2. Shemukhin A. A., Muratova E. N. Technical Physics Letters, 2014. Vol. 40. № 3. P. 219–221.
3. Muratova E. N. et al. Metals, 2014. Vol. 14. P. 651.
4. Matyushkin L. B., Muratova E. N., Panov M. F. Micro & Nano Letters, 2017. Vol. 12. Is. 2. P. 100–103.
5. Muratova E. N., Maraeva E. V., Nalimova S. S., Permyakov N. V., Moshnikov V. A. Petroleum Chemistry, 2019. Vol. 59. № 8. P. 822–830.

6. Muratova E. et al. The 15th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics. META 2025, Malaga, Spain, July 22–25, 2025. P. 1110.
7. Muratova E. 2026 ElCon Conference of Young Researchers in Micro and Nanoelectronics, Electrical Engineering Materials, Plasmas and Fields, Photonics and Electro-Optics (2026 ElCon-MN) February 3-5, 2026, 26–29. DOI: 10.1109/ElCon-MN69838.2026.11417127.

УДК 548.3

Новые результаты в области исследования боратов переходных металлов с настраиваемыми свойствами для применений в прецизионной оптике и спинтронике

к. х. н. Бирюков Я. П., к. г.-м. н. Шаблинский А. П., к. г.-м. н. Авдонцева М. С., к. г.-м. н. Кржижановская М. Г., д. х. н. Бубнова Р. С., д. г.-м. н. Филатов С. К.
Филиал НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ-ИХС
199034, г. Санкт-Петербург, Макарова наб., 2
y.p.biryukov@gmail.com

Приводится обзор достижений в исследовании боратов ПМ, включая оригинальные авторские данные. Показано, что настраиваемость магнитных и термических свойств определяется особенностями кристаллической структуры. Результаты задают вектор для дизайна материалов для оптики и спинтроники.
Ключевые слова: Бораты; Минералоподобные соединения; Настраиваемые свойства; Магнетизм; Термическое расширение.

New Results in the Study of Transition Metal Borates with Tunable Properties for Applications in Precision Optics and Spintronics

Sc.D Biryukov Y. P., Sc.D Shablinskii A. P., Sc.D Avdonceva M. S., Sc.D Krzhizhanovskaya M. G., Prof. Bubnova R. S., Prof. Filatov S. K.
Branch of National Research Center "Kurchatov Institute" — PNPI-ISC
2 Makarova Emb., Saint Petersburg, 199034, Russia
y.p.biryukov@gmail.com

A review of advances in the study of transition metal borates is presented, including the authors' original data. It is shown that the tunability of magnetic and thermal properties is governed by crystal structure features. The results set a direction for the design of materials for optics and spintronics.
Keywords: Borates; Mineral-like compounds; Tunable properties; Magnetism; Thermal expansion.

Бораты, содержащие в своем составе переходные металлы (ПМ), в последнее десятилетие привлекают значительный интерес благодаря своей богатой кристаллохимии и разнообразным функциональным свойствам, таким как магнитные, резонансные, оптические, мультиферроидные и электрохимические. Особый интерес представляют обнаруженные в боратах ПМ экзотические явления: высокие температуры магнитного упорядочения, каскады магнитных переходов в независимых магнитных подсистемах, состояния спиновой жидкости, стекла и льда, геометрические фрустрации. Благодаря такому уникальному сочетанию свойств, данные соединения применяются в качестве коммерческих монохроматоров в ядерно-резонансных синхротроннных экспериментах, в электродах для металл-ионных аккумуляторов и в перспективных компонентах MRAM для спинтронных приложений [1–3].

В настоящей работе представлены результаты всесторонних исследований боратов ПМ. Разработан оригинальный подход к изучению магнитных и термических свойств комплексом *in situ* методов, главным образом, рентгендифракционных

в широком диапазоне низких и высоких температур с привлечением прямых методов исследования магнитного состояния и порядка (термомёссбауэровская спектроскопия, магнитометрия) [4]. Впервые подведены итоги авторских, а также известных исследовательских работ в области термокристаллохимии боратов ПМ. Показано, что анизотропия магнитных и термических свойств помимо химического состава в значительной степени обусловлена и особенностями кристаллического строения. Комплексное исследование таких соединений позволяет внести существенный вклад в основы кристаллохимического предсказания и конструирования перспективных оптических и магнитных материалов.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 25-73-00080).

Литература

1. The ^{57}Fe Synchrotron Mössbauer Source at the ESRF / Potapkin V., Chumakov A. I., Smirnov G. V., Celse J.-P., Rüffer R. et al. // Journal of Synchrotron Radiation, 2012. Vol. 19. № 4. P. 559–569.
2. Borates as promising electrode materials for rechargeable batteries / S.-H. Yang, H. Xue, S.-P. Guo // Coordination Chemistry Reviews, 2021. Vol. 427. P. 213551.
3. Low-temperature investigation of natural iron-rich oxoborates vonsenite and hulsite: thermal deformations of crystal structure, strong negative thermal expansion and cascades of magnetic transitions / Biryukov Y. P., Zinnatullin A. L., Cherosov M. A., Shablinskii A. P., Yusupov R. V. et al. // Acta Crystallographica Section B Structural Science, Crystal Engineering and Materials, 2021. Vol. 77. № 6. P. 1021–1034.
4. Термокристаллохимия магнитных материалов с управляемыми свойствами / Р. С. Бубнова, Я. П. Бирюков, С. К. Филатов // Журнал неорганической химии, 2024. — Т. 69. — № 3. — С. 335–349.

УДК 538.9

Оптические спектры коллективных возбужденных состояний в поверхностно-легированных коллоидных нанокристаллах CdS

Д. ф.-м. н. Ипатов А. Н.[1,2], Куприянов Г. А.[1]
[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
henryweis3@gmail.com
[2] Санкт-Петербургский национальный исследовательский
Академический университет Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А

Проведено исследование оптических спектров поверхностно-легированных нанокристаллов CdS. Установлено, что в спектрах имеются 2 доминирующие моды, чьи характер и положение определяются геометрическими размерами кристаллов, высотой потенциального барьера на границе и числом свободных носителей.
Ключевые слова: коллективные возбуждения; плазмоны; коллоидные нанокристаллы; легирование; дипольный плазмонный резонанс; сульфид кадмия.

Optical spectra of collective excited states in surface-doped colloidal CdS nanocrystals

Ph.D Ipatov A. N.[1,2], Kupriianov G. A.[1]
[1] Peter the Great Saint Petersburg state polytechnic university
29B Polytechnicheskaya St., Saint Petersburg, 195251, Russia
henryweis3@gmail.com
[2] Saint Petersburg national research academic university
of the Russian academy of sciences
8/3A Khlopin St., Saint Petersburg, 194021, Russia

A study of the optical spectra of surface-doped nanocrystals of CdS has been conducted. It was established that the spectra contain two dominant modes, the characteristics and positions of which are determined by the geometric sizes of the crystals, the height of the potential barrier at the interface, and the number of free carriers.
Keywords: collective excitations; plasmons; colloidal nanocrystals; doping; dipole plasmon resonance; cadmium sulfide.

В последние десятилетия активное развитие электроники вызвало существенный интерес к созданию новых материалов, чьи свойства принципиально отличаются от аналогичных объемных соединений. Большие перспективы представляют структуры на основе полупроводниковых коллоидных нанокристаллов, которые характеризуются наличием дипольных плазмонных резонансов в их оптических спектрах. При этом, за счет возможности управления рядом параметров, таких как количество свободных носителей, размеры нанокристалла, высота потенциального барьера на границе, свойства внешней среды и тип легирования, который может быть условно разделен на поверхностный и объемный, положение и характер данных резонансов может меняться.

В данном исследовании коллоидные нанокристаллы рассматривались как электронейтральная система взаимодействующих фермионов, находящихся во внешнем потенциале, имеющем вид потенциала равномерно заряженной сферы, что соответствует поверхностному типу легирования. При этом для нахождения спектра основного состояния решалась система самосогласованных уравнений Кона — Шэма. Спектры возбужденных состояний получены на основе приближения случайных фаз с локальным обменным взаимодействием (RPAX). При этом расчет производился как с учетом полного базиса одночастичных переходов, так и в двухуровневой модели, где учитываются переходы только между HOMO и LUMO орбиталями. В исследовании рассматривались нанокристаллы различных размеров, с различной высотой потенциального барьера на границе и с различным количеством свободных носителей.

В результате расчетов было выявлено, что в оптических спектрах рассмотренных систем преобладают две резонансные линии Ω_1 и Ω_2, определяемые вкладами одночастичных переходов $2p$-$3d$ и $2p$-$2s$ для числа свободных носителей $N = 8$ и $6h$-$7i$ и $6h$-$6g$ для $N = 72$, одна из которых существенно доминирует. Положение этих линий существенно зависит от размера системы и числа свободных носителей заряда. Так, для систем, обладающих меньшим геометрическим размером, а также с большим числом носителей, энергия резонансных мод оказалась выше. При этом увеличение высоты потенциального барьера на границе нанокристаллов также приводит к увеличению энергий дипольных резонансов. Было установлено, что при сравнительно малом размере системы и числе свободных носителей, рост высоты потенциального барьера приводит к смене доминирующей в спектре линии. В случае же достаточно больших нанокристаллов ($R = 6$ нм) и большого числа свободных носителей ($N = 72$) такой смены не наблюдается. Результаты расчетов в рамках приближения случайных фаз с полным базисом одночастичных переходов и в двухуровневой модели хорошо согласуются между собой для всех рассмотренных систем.

Также следует отметить, что доминирующая при больших высотах потенциального барьера линия является коллективной модой. При низком потенциальном барьере доминирующая линия соответствует коллективному возбужденному состоянию только для систем с малым радиусом и малым количеством свободных носителей, а также для систем, обладающих сравнительно большими геометрическими размерами и большим количеством носителей.

Кроме того, было установлено, что для кристаллов с малым радиусом и числом свободных носителей с ростом высоты потенциального барьера на границе происходит смена одночастичных каналов, определяющих спектральные линии Ω_1 и Ω_2, а также смена характера доминирующей моды с поверхностного плазмона трансляционного типа на вращательный плазмон. Для всех остальных систем доминирующая мода представляет собой вращательный плазмон для любых значений высоты потенциального барьера.

Таким образом, в оптических спектрах поверхностно-легированных нанокристаллов CdS имеются две доминирующие линии Ω_1 и Ω_2. При этом одна из этих мод доминирует и является коллективным возбуждением, в то время как другая является слабо коррелированной. Их положение можно регулировать такими параметрами как геометрический размер нанокристалла, высота потенциального барьера на границе и число свободных носителей.

Литература

1. Theory of quantum plasmon resonances in doped semiconductor nanocrystals / Zhang H., Kulkarni V., Prodan E., Nordlander P., Govorov A. O. // The Journal of Physical Chemistry C, 2014. Vol. 118. № 29. P. 16035–16042.
2. Charge-tunable quantum plasmons in colloidal semiconductor nanocrystals / Schimpf A. M., Thakkar N., Gunthardt C. E., Masiello D. J., Gamelin D. R. // ACS Nano (The American Chemical Society), 2014. Vol. 8. № 1. P. 1065–1072.

УДК 54.057

Реакторный синтез перспективных норборненсодержащих ФГК для DUV-литографии в микроэлектронике

Заморецков Д. С., Малков Г. В., Баймуратова Р. К., Аккуратов А. В.
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (ФИЦ ПХФ и МХ РАН)
142432, г. Черноголовка, пр-т Академика Семенова, 1

Фотогенераторы кислот на основе N-гидрокси-5-норборнен-2,3-дикарбоксимида (NBD), в частности NBD-Tf, перспективны для DUV-литографии. Разработан масштабируемый синтез с высокой воспроизводимостью и снижением побочных процессов, пригодный для полупромышленного производства.
Ключевые слова: химически усиленный фоторезист; DUV-литография; фоторезисты; масштабируемый синтез; фотогенераторы кислот.

Reactor-based synthesis of advanced norbornene-containing PAG for DUV lithography in microelectronics

Zamoretskov D. S., Malkov G. V., Baimuratova R. K., Akkuratov A. V.
Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry, Russian Academy of Sciences (FRC PCPMC RAS)
1 Akademika Semenova Ave., Chernogolovka, 142432, Russia

Acid generators based on N-hydroxy-5-norbornene-2.3-dicarboximide (NBD), particularly NBD-Tf, are promising for DUV lithography. A scalable synthesis with high reproducibility and reduced side reactions has been developed, suitable for pilot-scale production.
Keywords: chemically amplified photoresist; DUV lithography; photoresists; scalable synthesis; photoacid generators.

Фотогенераторы кислот (ФГК) на основе N-гидрокси-5-норборнен-2,3-дикарбоксимида (NBD) являются востребованными компонентами фоторезистов, используемых в DUV-литографии ($\lambda = 248$ нм) [1, 2]. Наибольший интерес представляют перфторалкилсульфонатные производные NBD, которые отличаются высоким квантовым выходом генерации кислоты, а также высокой термической устойчивостью и химической совместимостью с полимерными матрицами. Ключевым представителем данного класса ФГК является эндо-изомер 5-норборнен-2,3-дикарбоксимидил трифторметансульфоната (NBD-Tf). Особенность рецептур резистов заключается в высоком содержании NBD-Tf. Согласно патентной литературе, доля NBD-Tf достигает 6,1 мольной части на 100 мольных частей основного сополимера [3]. Это обуславливает высокий спрос на NBD-Tf и его структурные аналоги и, соответственно, повышенные требования к воспроизводимости, надежности и масштабируемости процессов их получения. В связи с этим разработка масштабируемого синтеза для перехода к полупромышленному производству ФГК крайне важна.

В данной работе предложен метод получения производных N-гидрокси-5-норборнен-2,3-дикарбоксимида, который учитывает специфику каждой стадии (тепловые эффекты, стабильность промежуточных соединений и требования безопасности) и позволяет воспроизводимо проводить синтетический процесс, выделение и очистку целевого продукта в пилотных реакторах. Важно отметить, что при увеличении загрузки реагентов протекание побочных процессов минимизировано, что обусловлено тщательным подбором режимов синтеза и конструкции реакторной линии.

В настоящее время на базе Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (г. Черноголовка) создается участок по выпуску литографических материалов, включая NBD-Tf. Разработанный способ рассматривается как основа для запуска производства ФГК с производительностью до 100 кг в год.

Литература

1. Feke GD, Grober RD, Pohlers G, Moore K, Cameron JF. On-wafer spectrofluorometric method for determination of relative quantum yields of photoacid generation in chemically amplified resists. Anal. Chem., 2001 Jul 15;73(14):3472-80.
2. Patent № 23911 — CROWELL & MORING LLP INTELLECTUAL PROPERTY GROUP P.O. BOX 14300 WASHINGTON, DC UNITED STATES. Sulfonic acid salt and derivative therefore, photoacid generator, and process for production of sulfonic acid salt: No. US8889888B2: application 2009-07-06: publ. 2014-11-18 / Masashi Nagamori Masaki, Fujiwara Kazunori, Mori Satoru Narizuka –36 p.
3. Sulfonic acid salt and derivative thereof, photo-acid generator, and process for production of sulfonic acid salt: пат. US 8889888 B2 / Allen R. D., Thackeray J. W., Muthiah C. et al. заявл. 30.07.2010; опубл. 18.11.2014.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-91-28002.

УДК 547.5: 66.095.1

Оптимизация синтеза и методов очистки норборнансодержащего мономера для фотолитографических полимеров

Смирнов А. С., Заправдина Д. М., Сидельцев М. Е., Кузнецов И. Е., Аккуратов А. В.
Федеральный исследовательский центр химической физики РАН
142432, г. Черноголовка, пр-т Академика Семенова, 1
aleksa-smr@mail.ru

Разработан метод синтеза и очистки 5-метакроилокси-2,6-норборнанокарболактона. Синтетический маршрут включает реакцию Дильса — Альдера и последующие стадии окисления, превращения функциональных групп и ацилирования. Получен целевой мономер с чистотой после очистки 99%.
Ключевые слова: Мономеры; Реакция Дильса — Альдера; 5-метакрилоилокси-2;6-норборнанокарболактон.

Optimization of synthesis and purification methods for a norbornene-based monomer for photolithographic polymers

Smirnov A. S., Zapravdina D. M., Sideltsev M. E., Kuznetsov I. E., Akkuratov A. V.
Federal Research Center of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences
1 Academic Semenov Ave., Chernogolovka, 142432, Russia

A method for the synthesis and purification of 5-methacryloyloxy-2.6-norbornanecarbolactone has been developed. The synthetic route includes a Diels–Alder reaction followed by oxidation, functional group transformations, and acylation steps. The target monomer was obtained with a purity of up to 99% after purification.
Keywords: monomers; Diels–Alder reaction; 5-methacryloyloxy-2;6-norbornanecarbolactone.

Одной из проблем развития отечественной микроэлектроники является отсутствие промышленного производства специализированных органических мономеров, таких как производные норборнанкарболактона. Эти соединения с жесткой каркасной структурой необходимы для обеспечения фоторезистам требуемых свойств — стойкости к плазменному травлению, термостабильности и др. Таким образом, задача разработки полного синтетического цикла и очистки мономера из доступного сырья является крайне актуальной в текущих условиях.

В рамках исследования была поставлена цель — разработать и оптимизировать доступный метод синтеза и очистки 5- метакроилокси-2,6-норборнанокарболактона. Основной акцент был сделан на поиске синтетического маршрута, который исключает использование дорогостоящих реагентов и катализаторов. В основе предложенного подхода лежит реакция Дильса — Альдера между циклопентадиеном и акриловой кислотой при пониженных температурах. Следующим шагом стало получение 5-гидроксинорборнан-2,6-карболактона. Данный этап связан с окислением 5-норборнан-2-карбоновой кислоты пероксидом водорода в присутствии муравьиной кислоты и сульфита натрия до 5,6-эпокси

норборнан-2-карбоновой кислоты, с последующей обработкой метанолом и карбонатом калия. Последняя стадия заключается в ацилировании полученного спирта с помощью метакрилоил хлорида и глубокой очистки целевого продукта перекристаллизацией из этилацетата. Очистка промежуточных продуктов осуществляется методами перекристаллизации и вакуумной перегонки, что является приемлемым для масштабирования производственного процесса.

В результате проведенной работы предложена схема синтеза норборнансодержащего мономера. Разработанный маршрут позволяет получать указанный мономер с выходом 40–50 % и чистотой после перекристаллизации 99 %, с использованием доступного сырья. Это является важным шагом на пути к импортозамещению в микроэлектронной промышленности.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-93-28005).

УДК 620.3

Влияние природы растворителя на спектральные свойства тонких пленок квантовых точек HgSe

Королева Т. В., Медведев А. Г.[1], Попов В. С.[1,2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия

В работе исследовано влияние природы растворителя на положение внутризонного пика поглощения коллоидных квантовых точек. Показан различный характер влияния растворителя на спектральные свойства тонких пленок в зависимости от используемого типа лигандной замены (донорный или акцепторный) и от протонности/апротонности используемого растворителя. Также исследована стабильность получаемых пленок во времени и степень замены лигандов в зависимости от используемого лиганда.
Ключевые слова: Коллоидные квантовые точки; ИК-Фурье; тонкие пленки; фотосенсорика.

Influence of solvent nature on the spectral properties of thin films of HgSe quantum dots

Koroleva T. V., Medvedev A. G.[1], Popov V. S.[1,2]
[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] Orion R&P Association Inc. Moscow, Russia

The influence of solvent nature on the position of the intraband absorption peak of colloidal quantum dots was investigated. A different character of the solvent effect on the spectral properties of thin films is shown, depending on the type of ligand exchange used (donor or acceptor) and the protic/aprotic nature of the solvent. The stability of the obtained films over time and the degree of ligand exchange depending on the ligand used were also investigated.
Keywords: Colloidal quantum dots; FTIR; thin films; photosensorics.

На сегодняшний день широко исследуются материалы, способные обеспечить эффективное фотодетектирование в инфракрасном диапазоне. Особый интерес представляет средний инфракрасный диапазон (MWIR), где фотодетектирование может осуществляться за счет поглощения собственного излучения тела без внешних источников света. Однако современные эпитаксиальные материалы, такие как HgCdTe, во-первых, дорогостоящи в производстве, а во-вторых, требуют постоянного охлаждения [1]. Альтернативой могут выступать коллоидные квантовые точки (ККТ). Жидкофазные методы синтеза и последующая обработка в растворе значительно снижают стоимость готового устройства, а гибкая настройка параметров синтеза позволяет контролировать поглощение получаемых ККТ за счет их размера. Особое внимание привлекают ККТ HgSe благодаря наличию внутризонного перехода 1Se–1Pe, который лежит в диапазоне 3–5 мкм, что соответствует MWIR-диапазону [2]. Для обеспечения лучшей

фотоэлектрической проводимости поверхность ККТ HgSe после синтеза обрабатывают раствором, содержащим лиганды. Хотя роль лигандной замены в фотоэлектрических свойствах ККТ HgSe хорошо известна, характер влияния растворителя при этом требует дополнительного исследования. В данной работе исследуется влияние лигандной замены на положение внутризонного пика поглощения ККТ HgSe в зависимости от протонной/апротонной природы растворителя.

ККТ HgSe были получены методом горячей инжекции. В раствор прекурсора ртути (ацетат рути) в инертной атмосфере в олеиламине быстро вводили прекурсор селена (триоктилфосфин-селен) при температуре 100 °C. Реакцию выдерживали в течение 6 минут и охлаждали на ледяной бане до комнатной температуры. Средний размер нанокристаллов был установлен с помощью просвечивающей электронной микроскопии и составил 5,6 нм, нанокристаллы обладали сферической формой. Изучение спектральных свойств проводили с использованием спектрометра Perkin Elmer 100. Тонкие пленки ККТ HgSe наносили на германиевую приставку многократного нарушенного полного внутреннего отражения.

В качестве лигандной замены были использованы растворы роданида аммония (SCN), цетилтриметиламмоний бромида (CTAB) и сульфида натрия (Na_2S) в изопропиловом спирте. Для исследования влияния природы растворителя тонкие пленки ККТ HgSe сначала обрабатывали раствором лигандной замены, а затем протонным или апротонным растворителем. Обнаружено, что сдвиг максимума внутризонного поглощения определяется прежде всего протонностью или апротонностью растворителя, а не величиной его диэлектрической проницаемости. Например, изопропанол (протонный растворитель, $\varepsilon = 18{,}3$) и ацетонитрил (апротонный растворитель, $\varepsilon = 37{,}5$) оказывают принципиально разное влияние на положение пика при одинаковых значениях $\varepsilon(0)$ для HgSe (25,6), которое находится между диэлектрическими проницаемостями этих двух растворителей. Характер сдвига также зависит от типа лиганда: для донорных лигандов (SCN^-) протонный растворитель усиливает синий сдвиг ($\Delta = 0{,}0022$ эВ) тогда как в апротонном растворителе аналогичного сдвига практически не наблюдается ($\Delta = 0{,}0005$ эВ). Для акцепторных лигандов (Br^-) аналогичный эффект вызывает только апротонный растворитель ($\Delta = 0{,}0016$ эВ при воздействии ацетонитрила). Наиболее выраженная чувствительность к природе растворителя наблюдается для сульфид-аниона (S^{2-}), образующего связь Hg–S с наименьшим дипольным моментом ($\Delta = 0{,}008$ эВ при воздействии ацетонитрила), тогда как тиоцианатный лиганд (SCN^-) демонстрирует уникальную устойчивость к воздействию ацетонитрила ($\Delta = 0{,}0005$ эВ).

Таким образом, комбинация «тип лиганда — природа растворителя» позволяет контролируемо настраивать оптические свойства тонких пленок HgSe, открывая возможности для создания чувствительных элементов ИК-фотодетекторов с заданными характеристиками.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации проекта № FSMG-2025-0024.

Литература

1. Пономаренко В., Попов В. Нульмерная сенсорика. Квантовые точки. — ЛитРес, 2026.
2. Chen M. et al. Mid-infrared intraband photodetector via high carrier mobility HgSe colloidal quantum dots // ACS nano, 2022. Vol. 16. № 7. P. 11027–11035.

УДК 538.911

Молекулярно-динамическое моделирование внедрения ионов Ar при распылении плавленого кварца

Назаров А. А., Юнин П. А., Михайленко М. С., Пестов А. Е.
Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», 603087, г. Нижний Новгород, ул. Академическая, 7
nazarov.artem@ipmras.ru

Методом молекулярной динамики исследована имплантация Ar в плавленый кварц. Показано, что бимодальный профиль распределения обусловлен коагуляцией атомов Ar в нанопузырьки. Результаты МД согласуются с данными рентгеновской рефлектометрии и объясняют механизм блистеринга.
Ключевые слова: структурные дефекты; кристаллическая структура; молекулярная динамика; ионное распыление; взаимодействие ионов с поверхностью; суперкомпьютерное моделирование.

Molecular Dynamics Simulation of Ar Ion Implantation during Fused Silica Sputtering

Nazarov A. A., Yunin P. A., Mikhailenko M. S., Pestov A. E.
Institute for Physics of Microstructures RAS
7 Academicheskaya St., Nizhny Novgorod, 603087, Russia
nazarov.artem@ipmras.ru

Molecular dynamics simulation of Ar implantation into fused silica was performed. It is shown that the bimodal depth profile is caused by the coagulation of Ar atoms into nanobubbles. The MD results are in agreement with X-ray reflectometry data and explain the blistering mechanism.
Keywords: structural defects; crystal structure; molecular dynamics; ion sputtering; ion-surface interaction; supercomputer modeling.

В технологии изготовления элементов рентгеновской оптики на основе монокристаллического кремния широко применяется финишная ионно-пучковая обработка низкоэнергетическими ионами инертных газов. Наряду с достижением требуемой точности формы и шероховатости, данный процесс сопровождается имплантацией рабочего газа в приповерхностный слой. При превышении предела растворимости внедренные атомы склонны к кластеризации с последующим формированием газонаполненных нанопузырьков. Наличие подобных дефектов оказывает критическое влияние на формирование итоговой поверхности после ионно-пучковой обработки. Что, в свою очередь, ведет к диффузионному рассеянию излучения и деградации оптических характеристик подложки. Для прогнозирования закономерностей зарождения и эволюции газовых пузырьков в зависимости от глубины залегания имплантированных ионов выполнено молекулярно-динамическое моделирование. В отличие от распространенного метода Монте-Карло, МД-подход позволяет в явном виде учесть коллективные атомные взаимодействия

и термодинамические условия нуклеации газовой фазы в кремниевой матрице, что особенно важно ввиду расхождения стандартных расчетных методик с экспериментальными наблюдениями.

В данной работе было проведено молекулярно-динамическое (МД) моделирование процесса распыления плавленого кварца SiO_2 ускоренными ионами аргона с энергией 1 кэВ. Расчеты выполнены с использованием программного кода LAMMPS [1]. Для описания взаимодействий атомов мишени использовался многочастичный потенциал Vashishta [2], для парного взаимодействия Si-Ar — универсальный потенциал ZBL [3], для описания взаимодействия Ar-Ar применялся потенциал Леннард — Джонса. Мишень представляла собой суперъячейку плавленого кварца размером 20×20×20 нм^3 с периодическими граничными условиями в плоскости X-Y и свободной поверхностью вдоль оси Z. Для набора статистики и сопоставления с экспериментальными флюенсами проводилось последовательное внедрение ~10^3 атомов Ar в мишень разупорядоченного SiO_2. Верификация построенной модели проводилась с использованием метода рентгеновской рефлектометрии (XRR), позволяющим по интерференционной картине отраженного излучения восстанавливать профиль распределения имплантированных атомов аргона по глубине.

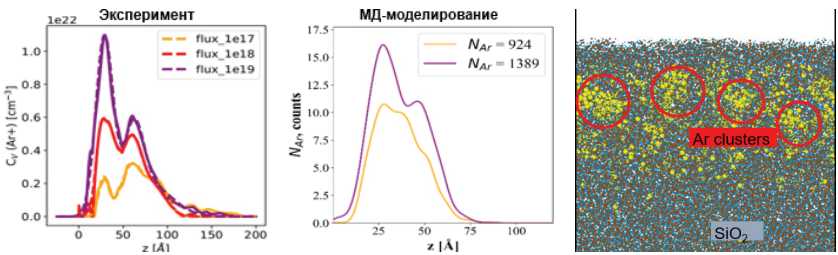


Рис. 1. Распределение атомов Ar по глубине, восстановленное из XRR, а также рассчитанное методом молекулярной динамики.

Анализ полученных данных демонстрирует качественное согласие расчетных и экспериментальных профилей распределения имплантированного аргона. Наблюдаемая форма профиля, а именно бимодальное распределение, обусловлена процессом коагуляции одиночно внедренных атомов Ar в термодинамически стабильные кластеры. Последующий рост этих кластеров приводит к формированию газонаполненных нанопузырьков, что является прямым механизмом развития хорошо известного экспериментального явления — блистеринга поверхности. Таким образом, молекулярно-динамическое моделирование позволило не только воспроизвести экспериментально наблюдаемый бимодальный профиль, но и вскрыть атомный механизм его формирования, обусловленный зарождением и ростом газовых пузырьков как прекурсоров блистеринга.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания Института физики микроструктур РАН (FFUF-2024-0042). Молекулярно-динамическое моделирование проведено с использованием ресурсов вычислительного кластера Суперкомпьютер «Лобачевский».

Литература

1. Thompson, A. P., Aktulga, H. M., Berger, R., Bolintineanu, D. S., Brown, W. M., Crozier, P. S., in 't Veld, P. J., Kohlmeyer, A., Moore, S. G., Nguyen, T. D., Shan, R., Stevens, M. J., Tranchida, J., Trott, C., & Plimpton, S. J. LAMMPS — a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales // Computer Physics Communications, 2022. Vol. 271. p. 108171.
2. Broughton, Jeremy Q. et al. Direct atomistic simulation of quartz crystal oscillators: Bulk properties and nanoscale devices // Physical Review B, 1997. Vol. 56. № 2. P. 611–618.
3. Ziegler, J. F. The stopping and range of ions in solids // Ion Implantation Science and Technology, 1988. P. 3–61.

УДК 539.213.2+51-72

Моделирование динамики свойств гибридных органосиликатных low-$\varkappa$ диэлектриков с бензольными мостиковыми группами

Кадыров А. Д.[1,2], Резник А. А.[1,2], Резванов А. А.[1,2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
akadyrov@niime.ru

Разработан подход для моделирования структур low-$\varkappa$ диэлектриков на основе оксида кремния с добавлением бензольных и метильных групп. Исследована динамика модуля Юнга и температурной стабильности от концентрации бензольных групп, а также подтверждена гипотеза резкого роста модуля Юнга от концентрации бензольных групп с переориентированием молекул бензола вдоль направления деформации структуры.
Ключевые слова: low-$\varkappa$ диэлектрик; молекулярная динамика; оксид кремния; модуль Юнга.

Modeling of dynamics of properties of hybrid organosilicate low-k dielectrics with benzene bridge groups

Kadyrov A. D.[1,2], Reznik A A.[1,2], Rezvanov A. A.[1,2]
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
akadyrov@niime.ru

An approach has been developed for modeling the structures of a low-k dielectric based on silicon oxide with the addition of benzene and methyl groups. The dynamics of the Young's modulus and temperature stability on the concentration of benzene groups are investigated. The hypothesis of a connection between a sharp increase in the Young's modulus from the concentration of benzene groups and the reorientation of benzene molecules along the direction of deformation of the structure is also confirmed.
Keywords: low-κ dielectric; molecular dynamic; silicon oxide; Young's module.

Low-κ диэлектрики или же диэлектрики с диэлектрической проницаемостью меньше, чем у оксида кремния, необходимы для увеличения быстродействия интегральных микросхем [1]. Однако не смотря на обилие подобных диэлектриков возникают проблемы с интеграцией их в существующие технологические процессы. Поэтому продолжаются исследования различных диэлектриков и их свойств.

В статье [2] представлен диэлектрик на основе оксида кремния с добавлением бензольных мостиков, позволяющие увеличить механическую прочность,

и терминальных метильных групп, которые улучшают гидрофобные свойства. При этом наблюдается значительный рост механических свойств от роста концентрации бензольных колец (рис. 1). Поэтому была построена модель на основе классической молекулярной динамики, которая подтвердила гипотезу связи резкого роста механических свойств от концентрации бензольных колец с переориентированием молекул бензола вдоль направления деформации, а также позволила исследовать динамику механических (рис. 1) и температурных свойств от концентрации бензольных колец, а именно, модель показала что температурная стабильность падает при увеличении концентрации метильных групп из-за того, что энергия связи молекул метила меньше, чем у молекул бензола. В связи с этим молекулы метила разрушаются быстрее, чем молекулы бензола при повышении температуры.

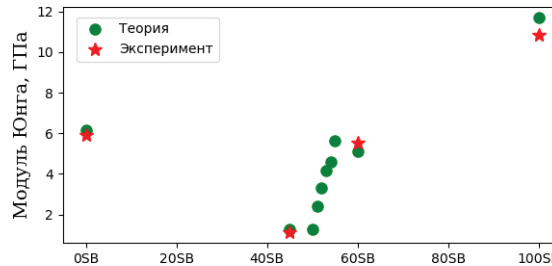


Рис. 1. Сравнение рассчитанной и экспериментальной зависимости модуля Юнга от соотношения концентраций бензольных и метильных групп. Экспериментальные точки взяты из работы [2]

Работа выполнялась с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления и большие данные» (ЦКП «Информатика») ФИЦ ИУ РАН (г. Москва).

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 23-79-30016, https://rscf.ru/project/23-79-30016.

Литература

1. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7–8. — С. 124–128.
2. Rezvanov A. A. et al. Benzene bridged hybrid organosilicate films with improved stiffness and small pore size // Materials Chemistry and Physics, 2022. Vol. 290:126571.

УДК 620.3

Получение двумерных материалов на основе фталоцианинов с различной проводимостью

Рыжкова Г. Г., Курочкин И. Ю., Руднева Т. Н., Корепанов В. И.
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН,
142432, г. Черноголовка, ул. Осипьяна, 6
gala.ryzhckova@yandex.ru

Предложен метод твердофазного синтеза двумерных материалов на основе фталоцианинов с различными электрофизическими свойствами. Показана возможность получения как полифталоцианинов с диэлектрическими свойствами, так и металлсодержащих графеноподобных материалов с полупроводниковой проводимостью и проявляющих мемристорный эффект. Разработана методика получения функциональных чернил на основе данных материалов для печати компонентов микроэлектроники.
Ключевые слова: полифталоцианины; двумерные полимеры; графеноподобные материалы; функциональные чернила.

Production of two-dimensional materials based on phthalocyanines with different conductivities.

Ryzhkova G. G., Kurochkin I. Yu., Rudneva T. N., Korepanov V. I.
Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials RAS
6 Akademika Ossipyana St., Chernogolovka, 142432, Russia
gala.ryzhckova@yandex.ru

A method for the solid-phase synthesis of two-dimensional phthalocyanine-based materials with various electrical properties is proposed. The possibility of producing both polyphthalocyanines with dielectric properties and metal-doped graphene materials with semiconductor conductivity and exhibiting a memristor effect is demonstrated. A method for producing functional inks based on these materials for printing microelectronic components has been developed.
Keywords: polyphthalocyanines; two-dimensional polymers; graphene-like materials; functional inks.

Двумерные материалы имеют огромный потенциал применения для нового поколения микроэлектроники благодаря своим уникальным свойствам, таким как атомарная толщина, гибкость, уникальные электрофизические свойства и другие [1]. Одними из наименее изученных 2D-материалов являются полифталоцианины (ПФЦ) [2]. Это металлорганические полимеры с полностью сопряженной π-электронной системой. Теоретически, они имеют энергию активации переноса заряда близкую к нулю, но на практике он значительно выше и зависит от метода получения пленок полимера. Кроме того, ПФЦ могут служить основой для синтеза металлсодержащих графеноподобных материалов (МГМ) с сильно отличающимися электрофизическим характеристиками.

В данном исследовании был разработан метод твердофазного синтеза, изменением условий которого можно получить как ПФЦ, так и МГМ (рис. 1). Из данных материалов были сделаны функциональные чернила, с помощью которых были нанесены пленки для исследования их проводимости.

Установлено, что при относительно мягких условиях (~400 °C) можно получить материал, обладающий перспективными диэлектрическими характеристиками, а добавление таких материалов в полиимид позволяет получить композит с диэлектрической проницаемостью на порядок выше, чем у чистого полиимида. В то же время, при более высокой температуре образуются МГМ (~600 °C) с полупроводниковой проводимостью. Было установлено, что для некоторых типов МГМ атомы металла в углеродной матрице могут располагаться с определенной периодичностью, при этом не образуется наночастиц металлов, как это происходит в других методах карбонизации ПФЦ [3]. Электрофизические измерения для вертикальной структуры Cu/МГМ/Cu показали возможность управления сопротивлением материала при помощи электрического сигнала [4]. Это делает МГМ перспективными материалами для мемристивных устройств.

Синтез МГМ с магнитными атомами (например Co) интересен для приложений, связанных со спинтроникой. Кроме того, изолированность атомов металла в графеноподобной матрице делает их уникальными материалами для электрокатализа и устройств накопления и преобразования энергии.

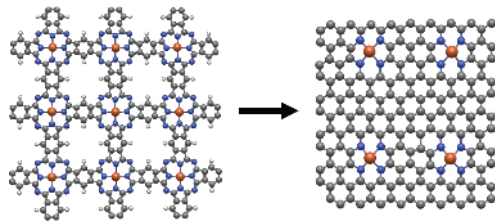


Рис. 1. Структура ПФЦ (слева) и МГМ (справа)

Литература

1. Chen Y., Fang F., Zhang N. Advance in additive manufacturing of 2D materials at the atomic and close-to-atomic scale // npj 2D Materials and Applications, 2024. Vol. 8. № 1. P. 17.
2. Korepanov V. I., Sedlovets D. M. Recent advances in 2D polymeric phthalocyanines: synthesis, characterization, applications and new challenges // Macroheterocycles, 2019. Vol. 12. № 3. P. 232.
3. Gao W. et al. Self-supported Ni nanoparticles embedded on nitrogen-doped carbon derived from nickel polyphthalocyanine for high-performance non-enzymatic glucose detection // Journal of Materials Chemistry B, 2018. Vol. 6. № 42. P. 6781–6787.
4. Ryzhkova G. G. et al. Preparation of conductive inks and memristive switching effect in graphene-like metal-carbon framework // 2D Mater., 2006. Vol. 13. P. 025003. DOI: 10.1088/2053-1583/ae4366.

УДК 621.3.049

Разработка и исследование керамического композита на основе SiOC армированного гексагональным нитридом бора

Русинов П. О., д. т. н., Тюрина С. А., к. т. н., Дальская Г. Ю., к. т. н., Гуминская Ж. А., Гусевская Д. Ю.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78
ruspiter5@mail.ru

В работе рассматривается разработка технологии плазменного искрового спекания для формирования керамических композитных материалов на основе SiOC, армированных частицами порошка hBN. Полученный новый композитный материал, демонстрирует полупроводниковое поведение p-типа с почти изотропным электрическим сопротивлением.
Ключевые слова: плазменное искровое спекание; композит; электронная проводимость; изоляция; полупроводники.

Development and Investigation of a SiOC-Based Ceramic Composite Reinforced with Hexagonal Boron Nitride

Rusinov P. O., Sc.D, Tyurina S. A., Ph.D, Dal'skaya G. Yu., Ph.D, Guminskaya Zh. A., Gusevskaya D. Yu.
MIREA — Russian Technological University
78 Vernadskogo Ave., Moscow, 119454, Russia
ruspiter5@mail.ru

This paper addresses the development of a spark plasma sintering technology for producing SiOC-based ceramic composite materials reinforced with hBN powder particles. The resulting novel composite material exhibits p-type semiconductor behavior with nearly isotropic electrical resistivity.
Keywords: spark plasma sintering; composite; electron conductivity; insulation; semiconductors.

В быстро развивающихся областях микроэлектроники, аэрокосмической отрасли и высокопроизводительных механических системах, потребность в полупроводниковых материалах на основе твердых смазочных материалов с низкой теплопроводностью имеет решающее значение для применения в экстремальных условиях эксплуатации [1–4]. Для исследования функциональных свойств керамики SiOC-hBN, были проведены измерения электропроводности и теплопроводности материалов. Электрические свойства SiOC-hBN демонстрируют полупроводниковое поведение с увеличением удельного сопротивления при понижении температуры до 2,5 K (рис. 1). Удельное сопротивление при комнатной температуре составляет 225 мОм·см, демонстрируя почти такие же значения и вне плоскости (250 мОм·см), что подтверждает почти изотропный характер материала. Модифицированный материал SiOC, полученный по предложенной технологии, представляет собой высокопроводящую керамику с удельным сопротивлением 10,8–11,6 мОм·см (рис. 1), тогда как гексагональный нитрид бора hBN является высокоизолирующим

материалом. Увеличение электрического сопротивления, наблюдаемое в керамике SiOC-hBN (по сравнению с более проводящим SiOC) при добавлении hBN, обусловлено присущей hBN изоляционной природой и его влиянием на микроструктуру композита. Высокоизолирующий hBN, не способствует электронной проводимости, а вместо этого действует как барьер для переноса заряда. Более того, h-BN может препятствовать перколяции проводящих углеродных фаз или сетей, что приводит к увеличению сопротивления. Кроме того, hBN может подавлять графитизацию свободного углерода на границе раздела, ограничивая образование путей переноса заряда. Изолирующие свойства hBN и его вмешательство в формирование проводящей сети в матрице SiOC являются основными причинами наблюдаемого увеличения удельного сопротивления в композитной керамике SiOC-BN. Примечательной особенностью является то, что увеличение удельного сопротивления до 2,5 K не является экспоненциально высоким, составляя всего ≈320 мОм·см (в плоскости) и ≈357 мОм·см (вне плоскости) при 2,5 K.

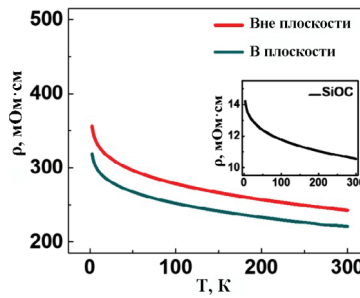


Рис. 1. Электропроводность SiOC-BN, зависимость удельного электрического сопротивления от температуры

В данной работе новыми являются следующие положения и результаты: разработана технология плазменного искрового спекания формирования керамического композита на основе SiOC армированного гексагональным нитридом бора. Выполнена оценка структуры и свойств полученных композитных материалов. Полученный новый композитный материал, при комнатной температуре, демонстрирует полупроводниковое поведение p-типа с почти изотропным электрическим сопротивлением и низкой поперечной теплопроводностью. А также, изменяет электропроводность, обеспечивает хорошую термостойкость/стойкость к окислению, химическую инертность, низкую теплопроводность и твердотельную смазку при трении, что делает полученный композит, несомненно, актуальным.

Литература

1. Prameela S. E., Pollock T. M., D. Raabe, Meyers M. A., A. Aitkaliyeva, K.-L. Chintersingh, Cordero Z. C., L. Graham-Brady. Materials for extreme environments // Nat. Rev. Mater., 2023. 8 (2). P. 81–88.
2. Peters, A.B., Zhang, D., Chen, S. et al. Materials design for hypersonics // Nat. Commun., 2024. 15, 3328.

3. H. A. Eivari, Z. Sohbatzadeh, P. Mele, M. H. N. Assadi. Low thermal conductivity: fundamentals and theoretical aspects in thermoelectric applications // Mater. Today Energy, 2021. 21, 100744.
4. Arden L. Moore, Li Shi. Emerging challenges and materials for thermal management of electronics. Materials Today, 2014. Vol. 17. Issue 4. P. 163–174.

УДК 620.22

Разработка и исследование новых полупроводниковых термоэлектрических материалов HfZrCoSb легированных Nb полученных плазменным искровым спеканием

Русинов П. О., д. т. н., Тюрина С. А., к. т. н., Дальская Г. Ю., к. т. н., Гуминская Ж. А., Гусевская Д. Ю.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78
ruspiter5@mail.ru

В работе рассматривается разработка технологии плазменного искрового спекания для формирования сплавов на основе n-типа HfZrCoSb легированных Nb, с высоким значением эффективности zT ≈ 1,0. Полученный новый материал, демонстрирует полупроводниковое поведение n-типа и обладает узкой непрямой запрещенной зоной и способны эффективно преобразовывать тепло в электроэнергию (термоэлектричество) в диапазоне средних и высоких температур.
Ключевые слова: плазменное искровое спекание; электронная проводимость; полупроводники; легирование; сопротивление.

Development and Investigation of New Nb-Doped HfZrCoSb Semiconductor Thermoelectric Materials Obtained by Spark Plasma Sintering

Rusinov P. O., Sc.D, Tyurina S. A., Ph.D, Dalskaya G. Yu., Ph.D, Guminskaya Zh. A., Gusevskaya D. Yu.
MIREA — Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia
ruspiter5@mail.ru

The paper addresses the development of spark plasma sintering technology for forming Nb-doped n-type HfZrCoSb-based alloys with a high thermoelectric figure of merit zT ≈ 1.0. The obtained new material demonstrates n-type semiconductor behavior, exhibits a narrow indirect band gap, and is capable of efficiently converting heat into electricity (thermoelectric conversion) in the medium- and high-temperature ranges.
Keywords: spark plasma sintering; electronic conductivity; semiconductors; doping; resistance.

Термоэлектрические материалы, способные преобразовывать тепло и электричество экологически безопасным способом, в последние десятилетия привлекли к себе внимание. Эффективность преобразования термоэлектрического устройства сильно зависит от безразмерного коэффициента качества материала zT. Разработка материалов с высоким значением zT является главной задачей для полупроводниковой промышленности [1–4].

В данной работе новыми являются следующие положения и результаты: рассмотрен механизм термоэлектрического переноса n-типа для сплава (Hf0,3Zr0,7)1–xNbxCoSb с широким содержанием легирующего элемента Nb (x = 0,02–0,3). Хотя как температурная, так и энергетическая зависимости переноса заряда напоминают

таковые при рассеянии ионизированных примесей, результаты работы показывают увеличение подвижности в зависимости от размера зерна, что указывает на то, что рассеяние на границах зерен, скорее всего, является доминирующим механизмом рассеяния вблизи комнатной температуры. Представленные результаты дают глубокое представление о механизмах рассеяния заряда и рекомендации по дальнейшей оптимизации свойств переноса электрического тока в полугейслер-сплавах и других термоэлектрических системах. Все образцы были получены методом искрового плазменного спекания. Изучены особенности микроструктуры сплавов (Hf0,3Zr0,7)0,84Nb0,16CoSb. Изображение на электронах обратного рассеяния на полированной поверхности типичного образца (Hf0,3Zr0,7)0,84Nb0,16CoSb, показывает хорошую однородность состава, иногда наблюдаются следы примесной фазы $NbCo_2$ и Hf/Zr, что может быть связано с потерей Sb во время левитационного плавления. Абсолютный коэффициент Зеебека (Hf0,3Zr0,7)1–xNbxCoSb монотонно уменьшается с увеличением содержания Nb, что согласуется с монотонным увеличением концентрации носителей с увеличением содержания Nb. Однако при данной температуре электропроводность сначала увеличивается, а затем уменьшается с увеличением содержания Nb, достигая максимальных значений при x = 0,16. Выполнена оценка структуры и свойств полученных материалов. Полученный новый материал, при комнатной температуре, демонстрирует полупроводниковое поведение p-типа с почти изотропным электрическим сопротивлением и низкой теплопроводностью.

Литература

1. J. He, T. M. Tritt. Advances in thermoelectric materials research: Looking back and moving forward // Science 357, eaak9997 (2017).
2. Tiejun Zhu, Yintu Liu, Chenguang Fu, Joseph P Heremans, Jeffrey G Snyder, Xinbing Zhao. Compromise and Synergy in High-Efficiency Thermoelectric Materials // Adv. Mater., 2017, 29(14).
3. A. F. Ioffe, Semiconductor Thermoelements, and Thermoelectric Cooling, Infosearch, London, UK 1957.
4. Zhang Z., Zhao, W., Zhu, W. et al. Preparation and Thermoelectric Performance of BaTiO3/Bi0.5Sb1.5Te3 Composite Materials. J. Electron. Mater. 49, 2794–2801 (2020).

УДК 678.744.3:544.022:[543.4+543.5]

Разработка новых толстослойных негативных резистов

Букреева К. С., Курбатов В. Г.
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, пр-т Академика Семёнова, 1
2307inori@inbox.ru

Получен набор сополимеров, которые могут быть использованы в качестве полимерной основы негативного толстослойного резиста. Изучено влияние условий синтеза на молекулярно-массовые характеристики сополимеров. Определены реологические свойства композиции, а также влияние условий на процесс формирование сетчатых структур на их основе.
Ключевые слова: (мет)акриловые сополимеры; толстослойные резисты; негативные резисты; 3D микроструктуры; MEMS.

Development of new thick-layer negative resists

Bukreeva K. S., Kurbatov V. G.
Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry RAS
1 Academician Semenov Ave., Chernogolovka, 142432, Russia
2307inori@inbox.ru

A set of copolymers has been synthesized that can be used as the polymer base for a negative thick-film resist. The effect of synthesis conditions on the molecular weight characteristics of the copolymers was studied. The rheological properties of the composition were determined, as well as the effect of these conditions on the formation of network structures based on them.
Keywords: (meth)acrylic copolymers; thick-film resists; negative resists; 3D microstructures; MEMS.

Современная микроэлектроника активно движется в направлении встроенных и монолитных 3D-структур. Это требует материалов, способных формировать сложные поверхности и объемы высотой от десятков до сотен микрометров с контролируемым профилем и геометрией. Толстослойные фоторезисты — прежде всего эпоксидные негативные резисты типа SU-8 и позитивные резисты семейства AZ и их аналогов — заняли заметное место в арсенале материалов для 3D корпусирования благодаря своей высокой сопротивляемости химическим средам, хорошей термостойкости, большой высоте слоя и возможности реализации многоуровневых или градуированных структур через литографию и постэкспозиционную обработку. Однако применение толстослойных резистов сопряжено с рядом технологических вызовов. Среди наиболее существенных — линейность экспозиции и повторяемость высот, трещины и усадка (при высотах, достигающих сотен микрометров), адгезия к различным подложкам (Si/SiO_2, стекло, керамика), термическая и химическая стойкость, а также некоторые другие.

В работе были синтезированы новые (мет)акриловые сополимеры, используемые в качестве основы толстослойных негативных резистов. Подобраны условия

синтеза, позволяющие в широком интервале регулировать молекулярно-массовые характеристики полимерной основы. Подобраны составы позволяющие регулировать набор физико-механических и теплофизических свойств формируемых пленок.

Изучены реологические свойства полученных сополимеров в различных реакционоспособных мономерах. Показано, что необходимо использовать смесь моно- и полифункциональных (мет)акриловых мономеров для получения необходимых реологических свойств композиции. Изучено влияние состава композиции толстослойного резиста на процесс формирования сетчатой структуры на его основе.

Работа выполнена по теме № FFSG-2024-0017 Государственного задания с использованием оборудования Аналитического центра коллективного пользования ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

УДК 621.383

Функционализация трисульфида титана благородными металлами для разработки высокоэффективных гибких фотодетекторов

Рымжина А. Р.[1,2], Ибрахим А. М. К. Ф. А.[2], Ph.D Шарма Прачи[1,3], к. т. н. Козлова И. Н.[1], к. х. н. Платонов В. И.[1], д. ф.-м. н. Павельев В. С.[1], Ph.D Трипати Нишант[1]

[1] Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
443086, г. Самара, Московское ш., 34
nishant.tripathi.11@gmail.com
[2] Самарский государственный медицинский университет Минздрава России
443099, г. Самара, ул. Чапаевская, 89
[3] Школа электроники (SENSE), Технологический институт Веллора (VIT)
Индия, Тамил Наду, Веллор

Проведено сравнительное исследование оптоэлектронных свойств гетероструктуры TiS_3/Au и чистого TiS_3. Для этого были синтезированы и исследованы фотодетекторы на основе трисульфида титана и гетероструктур между ним и Au.

Ключевые слова: TiS_3; Au; гетероструктура; оптоэлектроника; фотодетектор.

Titanium trisulfide functionalization with noble metals for the high-performance flexible photodetectors development

Rymzhina A. R.[1], Ibrahim A. M. K. F. A.[1,2], Ph.D Prachi Sharma[1,3], Ph.D Kozlova I. N.[1], Ph.D Platonov V. I.[1], Sc.D Pavelyev V. S.[1], Ph.D Tripathi N.[1]

[1] Samara National Research University
34 Moskovskoye Hwy., Samara, 443086, Russia
nishant.tripathi.11@gmail.com
[2] Samara State Medical University
89 Chapaevskaya St., Samara, 443099, Russia
[3] School of Electronics Engineering (SENSE), Vellore Institute of Technology (VIT)
India, Tamil Nadu, Vellore

A comparative study of the pure TiS_3 and TiS_3/Au heterostructure optoelectronic properties have been carried out. For this purpose, photodetectors based on TiS_3 and heterostructures between it and Au have been synthesized and investigated.

Keywords: TiS_3; Au; heterostructure; optoelectronics; photodetector.

Гибкие фотодетекторы ближнего инфракрасного (ИК) диапазона необходимы для разработки и создания элементов носимой оптоэлектроники. Достижение высокой чувствительности и быстрого отклика фотодетекторов в гибком исполнении является серьезной задачей [1]. В данной работе демонстрируются разработанные и изготовленные высокоэффективные фотодетекторы, в которых в качестве чувствительного элемента выступают гетероструктуры между нанолентами трисульфида титана (TiS_3) и золотом (Au), выполненные непосредственно на подложках

из полиэтилентерефталата (ПЭТ). Наноленты TiS_3 были осаждены между встречно-штыревыми хромовыми электродами методом диэлектрофореза, а затем было произведено контролируемое распыление Au в установке высокочастотного распыления. В случае с обнаружением излучения с длиной волны 1064 нм, функционализированный золотом фотодетектор показывает наилучшие результаты: чувствительность 0,93 А $Вт^{-1}$, обнаружительная способность $2{,}93 \cdot 10^8$ Джонс и время отклика/восстановления соответственно 120/231 мс. Улучшение характеристик по сравнению с фотодетекторами на основе чистых нанолент TiS_3 обусловлено усилением электромагнитного поля плазмонами и барьерами Шоттки [2]. Представленные результаты указывают на практичный и масштабируемый способ изготовления высокоэффективных гибких ИК-фотодетекторов для носимых ИК-датчиков следующего поколения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-23-00494, https://rscf.ru/project/25-23-00494.

Литература

1. Performance analysis of photodetectors based on 2D materials and heterostructures / N. Nandihalli // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2024. P. 1–87.
2. Design strategies toward plasmon-enhanced 2-dimensional material photodetectors / K.-H. Li, X. Chen, D. Su, Y. Sun, H. Zhou, Z.-G. Liu, P. Xia, X. Zhang // Advanced Devices & Instrumentation, 2023. Vol. 2. P. 1–20.

УДК 621.315.592

III-N наноструктуры на h-BN: особенности роста и физические свойства

Даутов А. М.[1–4], к. ф.-м. н. Алексеев П. А.[5], Попов М. Е.[5], к. ф.-м. н. Котляр К. П.[1–3], Лендяшова В. В.[1,2], Мельниченко И. А.[6], Шугабаев Т.[1,2], д. ф.-м. н. Дубровский В. Г.[1], д. ф.-м. н. Цырлин Г. Э.[1–3], к. ф.-м. н. Гридчин В. О.[1–3]

[1] СПБГУ, Физический факультет
198504, г. Санкт-Петербург, ул. Ульяновская, 3
[2] СПБАУ им. Ж. И. Алфёрова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А
[3] ИАП РАН
198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31–33, лит. А
[4] МФТИ, лаборатория функциональных наноматериалов
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[5] ФТИ им. Иоффе
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
[6] НИУ ВШЭ
194100, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, 3, корп. 1А
amdautov24@gmail.com

В данной работе приводятся первые экспериментальные результаты по росту нитевидных нанокристаллов AlN и квантовых точек InN методом молекулярно-пучковой эпитаксии на Ван-дер-Ваальсовых слоях h-BN. Установлено определяющее влияние топографии h-BN (ступени ~5 монослоев) и температуры на рост AlN наноструктур. Также определен режим роста КТ InN и влияние предварительной нитридизации поверхности h-BN на плотность и размер островков.

Ключевые слова: эпитаксия; нитридные полупроводники; двумерные материалы; нитевидные нанокристаллы; квантовые точи

III-N Nanostructures on h-BN: Growth Characteristics and Physical Properties

Dautov A. M.[1–4], Ph.D Alekseev P. A.[5], Popov M. E.[5], Ph.D Kotlyar K. P.[1–3], Lendyashova V. V.[1,2], Melnichenko I. A.[6], Shugabaev T.[1,2], Sc.D Dubrovskii V. G.[1], Sc.D Cirlin G. E.[1–3], Ph.D Gridchin V. O.[1–3]

[1] Faculty of Physics, Saint Petersburg State University
3 Ulyanovskaya St., Saint Petersburg, 198504, Russia
[2] Alferov Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences
8/3 Khlopina St., Bldg. A, Saint Petersburg, 194021, Russia
[3] Institute for Analytical Instrumentation, Russian Academy of Sciences (IAP RAS)
31–33 Ivana Chernykh St., Bldg. A, Saint Petersburg, 198095, Russia
[4] Laboratory of Functional Nanomaterials,
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

[5] *Ioffe Institute*
26 Politekhnicheskaya St., Saint Petersburg, 194021, Russia
[6] *National Research University Higher School of Economics (HSE University)*
3/1A Kantemirovskaya St., Saint Petersburg, 194100, Russia
amdautov24@gmail.com

In this work, we present the first experimental results on the growth of AlN nanowires and InN quantum dots (QDs) by molecular-beam epitaxy on van der Waals (vdW) layers of h-BN. The crucial influence of the h-BN surface topography (steps of ~5 monolayers) and temperature on the growth of AlN nanostructures is revealed. Furthermore, the growth regime for InN QDs is determined, and the effect of preliminary nitridation of the h-BN surface on the island density and size is established.
Keywords: epitaxy; nitride semiconductors; two-dimensional materials; nanowires; quantum dots.

Применение двумерных материалов, таких как h-BN, для Ван-дер-Ваальсовой эпитаксии III-N соединений (InN, GaN, AlN) позволяет обойти фундаментальное ограничение несоответствия кристаллических решёток, эффективно релаксировать упругие напряжения и интегрировать структуры с кремниевой платформой [1]. Благодаря прямой зонной структуре и возможности плавной перестройки ширины запрещенной зоны от 0,7 до 6 эВ, эти материалы востребованы в оптоэлектронике [2]. Особый интерес представляют объекты пониженной размерности — нитевидные нанокристаллы (ННК) AlN и квантовые точки (КТ) InN [3]. Однако процессы их зарождения и эволюции на поверхности h-BN изучены недостаточно. В частности, остаются неясными роль топографии h-BN (ступени, толщина флейков) и влияние предварительной нитридизации поверхности на плотность, размеры и морфологию наноструктур [4]. Решение этих вопросов необходимо для управляемого синтеза III-N наноструктур на двумерных материалах.

В настоящей работе представлены результаты первых экспериментальных исследований по выращиванию ННК AlN и КТ InN на слоях h-BN. Эксперименты проводились на установке молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота Riber Compact 12 с использованием подложек SiO_x/Si(111), на поверхность которых методом механической эксфолиации были перенесены флейки h-BN. В серии ростов для AlN структур на поверхности флейков посредством зондовой фрикционной литографии была сформирована искусственная топография в виде геометрических фигур. В зависимости от типа выращиваемых структур температура ростового процесса (по показаниям пирометра с учетом калибровки) составляла 810–850 °C для ННК AlN и 335 °C для островков InN. Рост осуществлялся в азот-обогащенных условиях: в течение двух часов для ННК AlN и в интервале от 15 до 120 секунд для островков InN. Морфология и кристаллическое качество полученных образцов исследовались методами растровой электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света.

На основе проведенных серий экспериментов была определена корреляция между морфологией формирующихся структур от температуры, для ННК AlN, и от времени, для КТ InN. Характерные геометрические параметры ННК AlN (высота h~200 нм, диаметр d~40 нм) варьируются в зависимости от температуры роста. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния установлено высокое

кристаллическое качество, о чем свидетельствует ширина на полувысоте E_2(high) на уровне 4,38 $см^{-1}$. Диаметр КТ InN с типичной высотой (h~5 нм) зависит от времени роста носит более нелинейный характер, в связи с чем d варьируется в широком диапазоне, от единиц до десятков нанометров. В ходе исследования полученных структур выявлена ключевая роль топографии поверхности h-BN в механизмах формирования III-N наноструктур. В частности, установлено, что при высоте ступеней h-BN порядка 5 монослоев наблюдается переключение режима роста от формирования отдельных ННК к наностенам, протяженность которых может достигать нескольких микрон. Также определено влияние предварительной нитридизации поверхности h-BN на плотность распределения островков, интенсивность зарождения InN по поверхности, а также их средний размер.

Полученные результаты существенно расширяют понимание фундаментальных процессов, протекающих при формировании III-N наноструктур на слоях гексагонального нитрида бора, а также способствуют развитию методов интеграции оптоэлектронных устройств на основе нитридов III группы с кремниевой платформой.

Авторы выражают благодарность Санкт-Петербургскому государственному университету за финансовую поддержку измерений методом сканирующей электронной микроскопии, предоставленную в рамках научного проекта (ID 129360164). Эксперименты по росту были выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSRM-2026-0004).

Литература

1. Heilmann, Martin et al. Vertically oriented growth of GaN nanorods on Si using graphene as an atomically thin buffer layer // Nano letters 16.6 (2016): 3524-3532.
2. Dautov, Albert M. et al. Topographically-guided van der Waals epitaxy: Selective growth of AlN nanowalls on h-BN step edges // Materials Science in Semiconductor Processing 204 (2026): 110293.
3. Wu, Yuanpeng et al. Van der Waals quantum dots on layered hexagonal boron nitride / Proceedings of the National Academy of Sciences 122.9 (2025): e2417859122.
4. Sundaram, Suresh et al. Large-Area van der Waals Epitaxial Growth of Vertical III-Nitride Nanodevice Structures on Layered Boron Nitride // Advanced Materials Interfaces 6.16 (2019): 1900207.

УДК 547.5: 66.095.1

Микротоннажный синтез 1-этилциклопентил метакрилата для полимерной основы фоторезиста

Муминов Р. Ш., Заморецков Д. С., Аккуратов А. В., к. х. н.
ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, пр-т Академика Семенова, 1
rmuminov23@gmail.com, davlad032200@gmail.com, akkuratow@yandex.ru

Разработан метод микротоннажного синтеза 1-этилциклопентил метакрилата. Рассмотрены проблемы, возникающие при масштабировании химических процессов. Предложена технологическая схема получения целевого мономера.
Ключевые слова: фоторезистивные материалы; метакрилатные мономеры; фотолитография; реакторный синтез; микротоннажная химия.

Micro-scale synthesis of 1-ethylcyclopentyl methacrylate for a photoresist polymer matrix

Muminov R. Sh., Zamoretskov D. S., Akkuratov A. V., Ph.D
Federal Research Center of Problems
of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS
1 Ac. Semenov Ave., Chernogolovka, 142432 Russia
rmuminov23@gmail.com, davlad032200@gmail.com, akkuratow@yandex.ru

A method for the micro-scale synthesis of 1-ethylcyclopentyl methacrylate has been developed. Challenges arising during the scale-up of chemical processes were considered. A process scheme for obtaining the target monomer has been proposed.
Keywords: photoresist materials; methacrylate monomers; photolithography; reactor synthesis; micro-scale chemistry.

Фотолитография лежит в основе производства большинства микропроцессоров и интегральных схем. Фоторезист, в состав которого входят полимер и фотогенератор кислоты, является одним их критически важных материалов в данном процессе. На территории РФ отсутствуют поставщики и производители, способные обеспечить стабильно высокое качество как полимерной основы фоторезистов, так и мономеров для ее получения. В связи с этим становится актуальной задача подбора и оптимизации масштабируемых методик синтеза мономеров — различных производных метакриловой кислоты и дальнейшая реализация их синтеза в микротоннажных количествах.

В данной работе рассмотрен метод получения 1-этилциклопентил метакрилата и дальнейшее масштабирование синтеза до килограммовых загрузок. Получение целевого мономера включает две стадии: на первой происходит получение 1-этилциклопентанола с применением реактива Гриньяра, а на второй — его функционализация, предполагающая О-ацилирование. В работе рассмотрены способы решения проблем, возникающих из-за природы проводимых химических превращений.

По предложенной в работе технологической схеме становится возможным получение целевого мономера с производительностью порядка сотен килограмм в год.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-93-28005.

УДК 538.958

Контролируемые фото- и термоиндуцированные сдвиги края поглощения в гибких нанокомпозитных пленках As2S3-Au

Зедоми Т. Э.[1], Котова Л. В.[1], к. ф.-м. н., Бурункова Ю. Э.[2], к. ф.-м. н., Тарасов В. Е.[2], Кочерешко В. П.[1], д. ф.-м. н.
[1] Физико-Технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт Петербург, ул. Политехническая, 26
t.zedomi@mail.ioffe.ru, kotova@mail.ioffe.r, vladimir.kochereshko@mail.ioffe.ru
[2] Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49, лит. А
yeburunkova@list.ru, vetarasov@itmo.ru
[2] ITMO University
49 Kronverksky Ave., Bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia

Разработаны гибкие нанокомпозитные пленки As_2S_3-Au в полимерной матрице, проявляющие контролируемые эффекты термозатемнения и фотопросветления. Обнаружены обратимые сдвиги края поглощения до 500 мэВ. Зависимость сдвига от дозы облучения и состава обеспечивает управление оптическими свойствами.
Ключевые слова: гибкая оптоэлектроника; халькогенидные стекла; нанокомпозиты; фотопросветление; термозатемнение; адаптивные материалы.

Tunable photo- and thermo-induced absorption edge shifts in flexible As_2S_3-Au nanocomposite films

Zedomi T. E.[1], Kotova L. V.[1], Ph.D, Burunkova Yu. E.[2], Ph.D, Tarasov V. E.[2], Kochereshko V. P.[1], Sc.D
[1] Ioffe Institute,
26 Polytekhnicheskaya St., Saint Petersburg, 194021, Russia
t.zedomi@mail.ioffe.ru, kotova@mail.ioffe.r, vladimir.kochereshko@mail.ioffe.ru
[2] ITMO University,
49A Kronverksky Ave., Saint Petersburg, 197101, Russia
yeburunkova@list.ru, vetarasov@itmo.ru

Flexible As_2S_3-Au nanocomposite films embedded in a polymer matrix, which exhibit tunable thermal darkening and photo-induced bleaching effects, have been developed. Reversible absorption edge shifts of up to 500 meV were observed. The dependence of the shift on the exposure dose and composition provides dynamic tunability of the optical properties.
Keywords: flexible optoelectronics; chalcogenide glasses; nanocomposites; phototransparency; thermodarkening; stimuli-responsive materials

Гибкая оптоэлектроника требует материалов, совмещающих механическую податливость с управляемыми оптическими свойствами, для использования в технологиях носимых устройств и дисплеев. Перспективными материалами являются халькогенидные стекла, в частности трисульфид мышьяка. Это соединение

обладает выраженной фоточувствительностью, проявляя эффекты фотоструктурного упорядочения, сдвиг края оптического поглощения и фотодиффузия.

В рамках данного исследования были разработаны и исследованы гибкие полимерные нанокомпозиты на основе частиц As_2S_3 и Au. Предполагалось, что взаимодействие между наночастицами As_2S_3 и Au, а также вариация состава композита позволят настраивать оптический отклик, а полимерная матрица обеспечит гибкость и технологичность. Пленки нанокомпозита получали путем растворения стекла As_2S_3 в смеси диэтиламина с низкомолекулярными гидроксиламинами с последующим добавлением наночастиц Au и жидких акриловых мономеров (2-феноксиэтилакрилат и диуретандиметакрилат). В качестве фотоинициатора полимеризации использовался Irgacure 784. Полученную однородную композицию отверждали под УФ-излучением [1].

Спектры пропускания образцов с различным содержанием Au и As_2S_3 исследовали в трех состояниях: исходном, после термического отжига (140 °C, 1 час) и после лазерного облучения ($\lambda = 532$ нм). Экспериментально были выявлены два противоположных эффекта: термозатемнение и фотопросветление.

Термический отжиг вызывает сдвиг края поглощения в длинноволновую область до 500 мэВ. Для анализа механизмов изменения свойств применено правило Урбаха [2] для оценки ширины хвоста неупорядоченных состояний. Было установлено, что размытие урбаховского края увеличивается после отжига и уменьшается после облучения. Вероятно, эффект термозатемнения обусловлен релаксацией нанокластеров As_2S_3 из метастабильных высокоэнергетических состояний в низкоэнергетические конфигурации.

Лазерное облучение приводит к обратному сдвигу края поглощения в коротковолновую область на 300 мэВ. Присутствие наночастиц Au модифицирует фотоотклик: в композитах с золотом фотопросветление практически полностью возвращает край поглощения к исходному положению (рис. 1*б*).

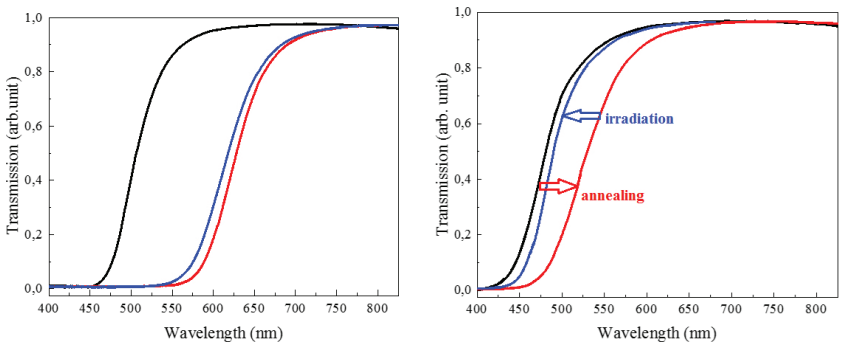


Рис. 1. Спектр пропускания, нормированный на максимум пропускания. Черная кривая — до облучения и нагрева; красная кривая — после 60 минут при температуре 140 °C; синяя кривая — после облучения (532 нм, 90 минут); *а*) композит только с частицами As_2S_3; *б*) композит с частицами As_2S_3 и Au

Механизм усиления фотоотклика в присутствии наночастиц Au может быть объяснен локальным усилением электромагнитного поля вблизи их поверхности (плазмонный эффект) и возможным образованием метастабильных состояний в системе $(As_2S_3)_{1-x}Au_x$, что увеличивает разнообразие возможных структурных перестроек. Важно отметить, что в исследованном диапазоне плотностей мощности (10–20 Вт/см^2) величина сдвига края поглощения зависит от дозы облучения, что открывает возможность контроля сдвига.

Нанокомпозиты As_2S_3-Au в полимерной матрице обладают большим потенциалом для создания адаптивных материалов. Их управляемые оптические свойства открывают перспективы для разработки перестраиваемой оптики, ячеек памяти, сенсоров и гибких дисплеев.

Работа Л. В.К. и Т.Э.З. выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-22-20074 и гранта Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с договором № 25-22-20074 от 05.06.2025.

Литература

1. Бурункова Ю. Э. и др. Жидкая композиция для фотополимеризационно-способной пленки для оптической записи, состав и способ получения // Патент России № 2747130C1. 28.04.2021 Бюл. № 13.
2. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. — М.: МИР, 1974. — 474 с.

УДК 541.65

Концепция молекулярного дизайна люминофоров с инвертированной синглет-триплетной щелью для высокоэффективных OLED

Хитров М. Д., д. х. н. Лупоносов Ю. Н.
Институт синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова Российской академии наук (ИСПМ РАН)
117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, 70
m.khitrov@ispm.ru

Предложена концепция молекулярного дизайна молекулярного дизайна люминофоров с инвертированной синглет-триплетной щелью. Эффективность подхода доказана квантовохимическим моделированием с использование двойного гибридного функционала.
Ключевые слова: OLED; IST люминофоры; гептазины; TD-DFT.

Molecular design concept of inverted singlet-triplet gap luminophores for highly efficient OLEDs

Khitrov M. D., Sc.D Luponosov Yu. N.
Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials Russian Academy of Sciences (ISPM RAS)
70 Profsoyuznaya St., Moscow, 117393, Russia
m.khitrov@ispm.ru

A concept for the molecular design of luminophores with an inverted singlet-triplet gap has been proposed. The effectiveness of this approach has been demonstrated by quantum chemical simulations using a double hybrid functional.
Keywords: OLED; IST luminophores; heptazines; TD-DFT.

Использование люминофоров с термически активируемой отложенной флуоресценцией (TADF) в качестве эмиссионных материалов для OLED зарекомендовало себя хорошей стратегией для достижения внутренней квантовой эффективности устройств вплоть до 100%. Вместе с этим их эффективность лимитируется обратной интеркомбинационной конверсией (rISC). В настоящее время особый интерес представляют инвертированные системы, для которых rISC ускоряется за счет инверсии синглет-триплетной щели ΔE_{ST} из-за динамической спиновой поляризации. Однако, ввиду высокой симметрии электронные переходы в инвертированных системах зачастую оказываются запрещенными, приводя к неэффективной люминесценции или полному ее отсутствию у таких соединений, что ограничивает их применение в качестве эмиттеров в OLED.

Среди инвертированных систем особое место занимают молекулы с триангуленовым мотивом, в частности — производные гептазина (**Hz**). Использование **Hz** в качестве фрагмента в D-π-A структурах (например **CzPHz**) позволяет получить TADF-люминофоры с квантовыми выходами люминесценции вплоть до 100% и выраженным CT-характером эмиссии, вместе с этим повышая значения ΔE_{ST} до положительных [1]. В своей работе мы предлагаем модификацию π-спейсерного

фрагмента для тонкой балансировки CT- и LE-характеров возбужденных состояний гептазиновых производных, в частности — посредством использования стерически нагруженных заместителей. Квантовохимическое моделирование на TD-SCS/SOS-ωB2PLYP/def2-TZVP//r2SCAN-3c уровне теории для **CzdmPHz** указывает на эффективность такого подхода, уменьшая величину ΔE_{ST} как относительно **CzPHz**, так и относительно самого **Hz**, сохраняя силу осциллятора на уровне D-π-A-люминофора (рис. 1).

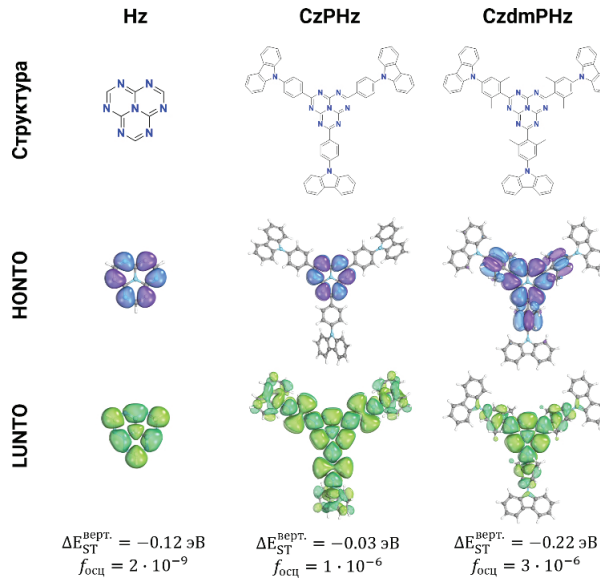


Рис. 1. Структуры, транзитные орбитали и рассчитанные параметры рассматриваемых соединений

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FFSM-2024-0003).

Литература

1. Impact of Donor Strength on Thermally Activated Delayed Fluorescence in Heptazine-Based Donor–Acceptor Emitters / P. Dad, A. N. Stuart, K. Bergmann, D. M. Mayder, Z. M. Hudson and G. Lakhwani // The Journal of Physical Chemistry C, 2025. Vol. 129. № 46. P. 20691–20696. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5c06356.

УДК 546.284-31:564.02/06

Получение суспензий на основе диоксида кремния для химико-механической планаризации барьерного слоя

Давыдова Е. С., Берестенко В. И., Лысков Н. В., Курбатов В. Е.
ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН

В работе исследуется влияние состава суспензии для химико-механической планаризации барьерного слоя на ее устойчивость. Показано, что частицы после плазмохимического синтеза необходимо дополнительно отмывать от избыточного содержания ионных соединений, снижающих устойчивость системы. Определена изоэлектрическая точка для частиц диоксида кремния, полученного плазмохимическим методом. Показано, что природа веществ, используемых для регулирования pH влияет на устойчивость системы. Установлено, что pH в значительной степени влияет на реологические свойства. Получен набор устойчивых суспензий для химико-механической планаризации барьерного слоя Ta/TaN.
Ключевые слова: суспензии; химико-механическая планаризация; диоксид кремния; устойчивость

Preparation of silicon dioxide-based suspensions for chemical-mechanical planarization of the barrier layer

Davydova E. S., Berestenko V. I., Lyskov N. V., Kurbatov V. E.
FIC Problems of Chemical Physics and Medical Chemistry RAS

The paper studies the effect of the composition of the suspension for the chemical-mechanical planarization of the barrier layer on its stability. It is shown that the particles after plasma-chemical synthesis need to be additionally washed to remove excess ionic compounds that reduce the stability of the system. The isoelectric point for silicon dioxide particles obtained by the plasma-chemical method has been determined. It is shown that the nature of the substances used to regulate the pH affects the stability of the system. It has been established that the pH has a significant impact on the rheological properties. A set of stable suspensions for the chemical-mechanical planarization of the Ta/TaN barrier layer has been obtained.
Keywords: suspensions; chemical-mechanical planarization; silicon dioxide; stability

С развитием отрасли интегральных микросхем и переходу к минимизации микросхем, потребовалась разработка процесса способного сделать рисунок однородным в плоской ориентации. Этим процессом стала химико-механическая планаризация. Химико-механическая планаризация (ХМП) — это технология выравнивания поверхности с помощью механических абразивных частиц и химического селективное удаление материалов. ХМП является ключевым технологическим процессом в производстве интегральных схем. Особую сложность представляет планаризация барьерных слоев (Ta, TaN), обладающих высокой химической стойкостью, что требует разработки эффективных и контролируемых полировальных суспензий. С развитием технологий производства полупроводниковых приборов, в которых используются различные материалы и структуры, наиболее предпочтительным

абразивом в суспензиях для CMP стали наночастицы SiO_2 (диоксида кремния). Поэтому изучение и разработка наночастиц диоксида кремния имеют решающее значение для повышения эффективности CMP, в том числе скорости удаления материала, селективности, уменьшения количества дефектов, а также обеспечения высокой однородности и плоскостности [1–3].

Данная работа посвящена получению устойчивых суспензий на основе диоксида кремния, полученного плазмохимическим методом.

Показано, что частицы полученные плазмохимическим способом содержат много остаточных ионных соединений. Это в свою очередь приводит к довольной быстрой потере как седиментационной, так и кинетической устойчивости водных дисперсий диоксида кремния. Удаление примесей из диоксида кремния осуществляли 2 путями. Выдержкой в вакууме при нагревании до 200 °С и отмывкой с помощью деионизованной воды при повышенной температуре, с последующим отделением частиц на центрифуге. Показано, что промывка водой приводит к более быстрому существенному снижению содержания примесей.

Показано влияние природы основания на устойчивость водных дисперсий диоксида кремния. Использование органических аминов для регулирования pH позволяет повысить устойчивость водных дисперсий диоксида кремния, полученного плазмохимическим методом.

Установлено влияние pH на реологические свойства дисперсий диоксида кремния. Определена изоэлектрическая точка диоксида кремния. Показано, что повышение pH приводит к снижению вязкости и размера частиц, а при определенной его величине наблюдается растворение частиц диоксида кремния с образованием силиката калия. Снижение размера частиц при увеличении pH, вероятно, обусловлено увеличением величины дзета-потенциала, что в свою очередь приводит к увеличению устойчивости суспензии.

Исследовано влияние добавки диэтиленгликоля, триэтиленгликоля и полиэтиленгликоля, а также их смесей на устойчивость водных дисперсий диоксида кремния. Наличие гликолей с различной молекулярной массой может влиять на селективность полученных суспензий.

Литература

1. Kim H. J. Abrasive for Chemical Mechanical Polishing // Chemical Mechanical Planarization of Semiconductor Materials. London: IntechOpen, 2018. 428 p.
2. Chemical mechanical planarization for microelectronics applications / P. B Zantye, A. Kumar, Sikder A. K. // A Review Journal, 2004. № 45. P. 89–220.
3. Tamboli D., Seal S., Desai V. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 2000. Vol. 566. P. 89.

УДК 620.187.3

Определение пористости поликристаллических наноразмерных слоев фотошаблонной заготовки на основе цифровой обработки электронно-микроскопических изображений

Решетняк А. Р., Волков Р. Л., к. ф.-м. н., Подорожний О. В., Боргардт Н. И., д. ф.-м. н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
reshaleksandra50602@mail.ru, r.l.volkov@org.miet.ru, podorozhniy_oleg@rambler.ru, borgardt@miee.ru

Для исследования хромсодержащих слоев получены их экспериментальные изображения от образца почти планарного сечения фотошаблонной заготовки методом просвечивающей растровой электронной микро-скопии. Анализ электронно-микроскопических микрофотографий, обработанных с помощью адаптивного порогового преобразования, позволил оценить размеры пор и их доли площади.
Ключевые слова: просвечивающая электронная микроскопия; цифровая обработка изображений; пористость; фазосдвигающая фотошаблонная заготовка.

Determination of the porosity of polycrystalline nanoscale layers in a phase-shifting photomask based on digital processing of electron microscopic images

Reshetnyak A. R., Volkov R. L., Ph.D, Podorozhniy O. V., Borgardt N. I., Sc.D
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
reshaleksandra50602@mail.ru, r.l.volkov@org.miet.ru, podorozhniy_oleg@rambler.ru, borgardt@miee.ru

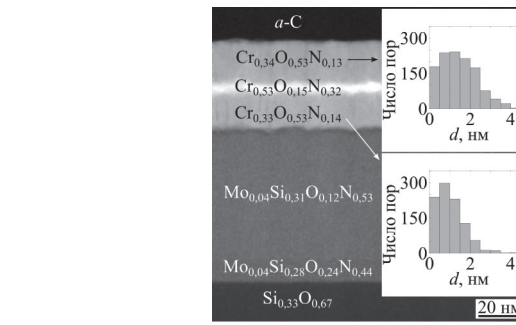
To study the chromium-containing layers, experimental images of them were obtained from the plan-view specimen of a photomask using scanning transmission electron microscopy. The analysis of electron microscopic micrographs processed using adaptive threshold transformation made it possible to estimate the pore sizes and their area fractions.
Keywords: phase-shifting photomask; transmission electron microscopy; digital image processing; porosity.

Многослойные гетерокомпозиции, состоящие из хромсодержащих слоев нанометровой толщины, благодаря их оптическим свойствам широко применяются для изготовления световых фильтров в оптике, солнечных элементов и отражающих покрытий фотошаблонных заготовок (ФШЗ) в микроэлектронике. В настоящей работе исследовались маскирующие хромсодержащие слои ФШЗ методами просвечивающей электронной микроскопии для определения их пористости.

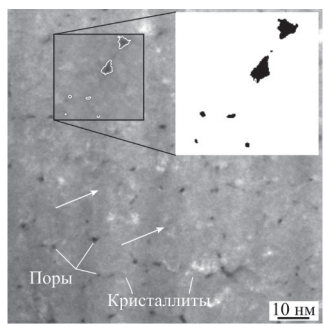
Тонкие фольги поперечного и почти планарного сечений ФШЗ приготавливались в растровом электронно-ионном микроскопе Helios NanoLab 650 методом

фокусированного ионного пучка (ФИП) согласно процедуре, описанной в [1]. Они исследовались методом просвечивающей растровой электронной микроскопии в приборе Titan Themis 200 при ускоряющем напряжении 200 кВ. Цифровая обработка электронно-микроскопических изображений выполнялась в среде Matlab с применением функций программного пакета Image Processing Toolbox.

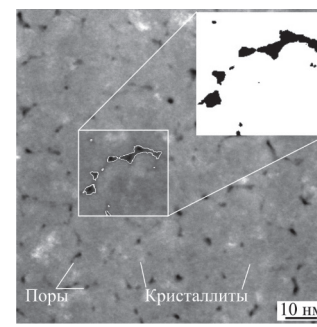
На рис. 1*а* проиллюстрирована микрофотография поперечного сечения образца, на которой выявляются слои, состав которых определялся с применением метода энергодисперсионного рентгеновского микроанализа. В молибденсодержащих слоях поры отсутствовали, а слой $Cr_{0,53}O_{0,15}N_{0,32}$ не анализировался из-за его малой толщины. На рис. 1*б* и 1*в* показаны ПРЭМ-изображения планарного сечения хромсодержащих слоев, на которых поры визуализированы как области с пониженной интенсивностью. Шумы на экспериментальных микрофотографиях сглаживались усредняющим фильтром, а четкость границ пор повышалась с помощью процедуры нерезкого маскирования.



а



б



в

Рис. 1. ПРЭМ-микрофотографии поперечного и почти планарного сечений образца ФШЗ (*а*–*в*). На вставках показаны гистограммы распределения эквивалентного диаметра d пор слоев $Cr_{0,33}O_{0,53}N_{0,14}$ и $Cr_{0,34}O_{0,53}N_{0,13}$ (*а*) и бинаризованные изображения (*б*, *в*). Белыми стрелками на *б* отмечены полосы, возникшие из-за эффекта «водопада»; белыми линиями на б и в показаны контуры пор, наложенные на исходные микрофотографии

Адаптивная пороговая обработка позволила корректно вычислить размеры пор, несмотря на области неравномерного распределения интенсивности, возникшие на ПРЭМ-микрофотографиях из-за эффекта «водопада» во время препарирования образца методом ФИП [2]. Она основана на сравнении интенсивности каждого *i*-го пикселя I_i с его локальным средним значением $\langle I_i \rangle$ в окрестности данного пикселя. Размер окрестности, определенный эмпирически, составил область размером примерно 36 нм. Если интенсивность I_i меньше вычисленного среднего значения $\langle I_i \rangle$ на 15 %, то пиксель изображения становился черным, в противном случае — белым. Полученные бинаризованные изображения, фрагменты которых показаны на вставках на рис. 1*б* и 1*в*, позволили определить геометрические параметры пор.

Для оценки размеров выявленных пор вычислялись эквивалентные диаметры *d* кругов равной площади. Их средние значения равны примерно 1,0 и 1,5 нм для слоев $Cr_{0,33}O_{0,53}N_{0,14}$ и $Cr_{0,34}O_{0,53}N_{0,13}$ соответственно. Пористость определялась как отношение суммарной площади пор к площади анализируемого ПРЭМ-изображения и составила около 1,4 и 3,2 %. На вставках рис. 1*а* показаны гистограммы распределения эквивалентного диаметра пор, имеющие асимметричный вид. Из их анализа следует, что для слоя $Cr_{0,33}O_{0,53}N_{0,14}$ около 78 % пор имеют размер меньше 1,5 нм, а для слоя $Cr_{0,34}O_{0,53}N_{0,13}$ — около 55 %. Отметим, что сравнение приведенных выше результатов с пороговой обработкой микрофотографий на основе итерационного алгоритма [1] находится в соответствии с вычисленными значениями латерального размера пор и их доли занимаемой площади.

Таким образом, в работе проведена цифровая обработка электронно-микроскопических изображений, которая позволила выявить, что пористость увеличивается почти в два раза при переходе от слоя $Cr_{0,33}O_{0,53}N_{0,14}$ к слою $Cr_{0,34}O_{0,53}N_{0,13}$.

Литература

1. Волков Р.Л. и др. Характеризация наноразмерных слоев гетерокомпозиций с применением цифровой обра-ботки данных просвечивающей электронной микроскопии // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2025. — Т. 50. — № 6. — С. 707–720.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2012. –1104 с.

УДК 620.22

Разработка материалов с якорной группой для пассивации дефектов межфазных слоев перовскитных солнечных элементов.

Сухорукова П. К.[1,2], Лучников Л. О.[2], Ильичева Е. А.[2], Саранин Д. С.[2], д. т. н., Лупоносов Ю. Н.[1], д. х. н.

[1] Институт синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова Российской академии наук
117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, 70
sukhorukova@ispm.ru, luponosov@ispm.ru
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1
luchnikov.lo@misis.ru, ilicheva.ea@misis.ru, saranin.ds@misis.ru

Для повышения стабильности перовскитных солнечных элементов исследованы интерфейсные самоорганизующиеся слои с вариациями концевых групп. Проведен синтез, изучены оптические, электрохимические, термические и поверхностные свойства. Выявлено влияние донорно-акцепторной природы заместителей. Достигнута эффективность >20 % и сохранение 80 % эффективности после 1200 ч непрерывной работы.
Ключевые слова: самоорганизация; перовскитные солнечные батареи; интерфейсная инженерия.

Development of materials with an anchor group for passivation of defects in interfacial layers of perovskite solar cells.

Sukhorukova P. K.[1,2], Luchnikov L. O.[2], Ilicheva E. A.[2], Saranin D. S.[2], Sc.D, Luponosov Yu. N.[1], Sc.D

[1]Institute of Synthetic Polymeric Materials named after. N.S. Enikolopov Russian Academy of Sciences, 117393, Moscow, Profsoyuznaya street, 70
sukhorukova@ispm.ru, luponosov@ispm.ru
[2] LASE — Laboratory of Advanced Solar Energy,
National University of Science and Technology "MISiS"
4 Leninsky Ave., Moscow, 119049, Russia
luchnikov.lo@misis.ru, ilicheva.ea@misis.ru, saranin.ds@misis.ru

In order to enhance the stability of perovskite solar cells, the study focused on interfacial self-assembling layers with variable end groups. Synthesis was performed, and the optical, electrochemical, thermal, and surface properties were thoroughly studied. The influence of the donor-acceptor nature of the substituents was identified. The efficiency of the system was found to be more than 20 % efficient, with 80 % of its effectiveness maintained after 1,200 hours of continuous operation.
Keywords: self-assembly; perovskite solar cells; interface engineering.

Перовскитные солнечные батареи (ПСБ) представляют собой быстро развивающуюся технологию, эффективность которой резко возросла с 3,8 % в 2009 году до более 26 % к 2026 году, что позволяет им конкурировать с традиционными кремниевыми

солнечными элементами и даже превосходить их по эффективности в лабораторных условиях [1]. Эти характеристики в сочетании с недорогими материалами и эргономичными методами производства сделали ПСБ многообещающей фотоэлектрической технологией. Основной проблемой, препятствующей коммерциализации и масштабированию ПСБ, является их низкая стабильность, а также деградация во время работы устройства. Решением этой проблемы является использование вспомогательных слоев в архитектуре ПСБ, так называемых интерфейсных слоев на основе органических полупроводниковых материалов (рис. 1). Особенностью, позволяющей таким материалам эффективно «устранять» дефекты в структуре перовскита, является наличие специальных функциональных групп (якорных групп), способных к специфическому взаимодействию с перовскитным материалом и другими слоями переноса заряда, а также к самосборке. Однако разнообразие возможных поверхностных и объемных дефектов в перовските приводит к необходимости поиска оптимальной структуры самоорганизующихся материалов. Важную роль в этих материалах играет концевая группа, которая обращена к слою перовскита и отвечает за специфические взаимодействия с активным слоем. Кроме того, концевая группа влияет на поверхностные свойства пленки, образуемой материалом; совокупность всех свойств, включая оптические, электрохимические и т.д., оказывает значительное влияние на эффективность и стабильность фотовольтаических систем на основе перовскита, как ПСБ, так и перовскитных солнечных модулей (ПСМ), как мы показали ранее [2–5]. Тем не менее, выбор структурных блоков для этой группы, а также поиск оптимальных заместителей в ней в настоящее время остаются неисследованной областью научного знания.

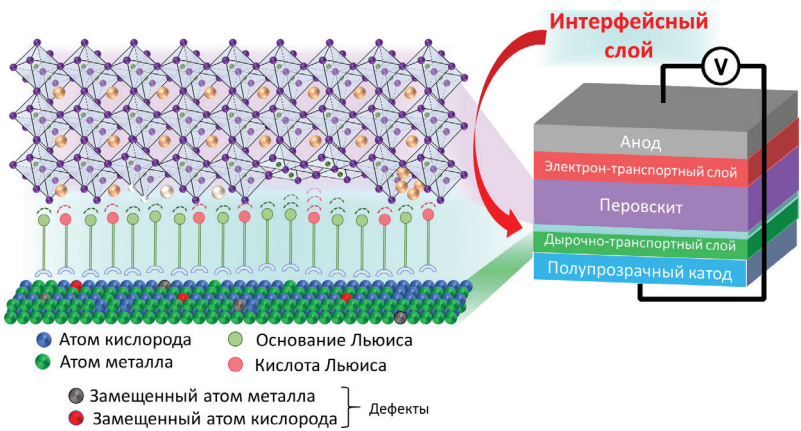


Рис. 1. Схематичное изображение строения перовскитного солнечного элемента с возможными поверхностными дефектами и с пассивирующим интерфейсным слоем.

В данной работе проведено комплексное исследование с целью выявления ряда закономерностей влияния заместителей в концевой группе на свойства соединений. С этой целью была разработана эффективная схема синтеза ряда соединений, различающихся по заместителю в концевой группе, а также изучен комплекс

их физико-химических свойств (таких как оптические и электрохимические свойства, термическая стабильность и фазовое поведение). Исследованы поверхностные свойства пленок, сформированных из этих материалов, выявлено влияние заместителей и их донорно-акцепторной природы на комплекс свойств полученных соединений. Оценена возможность использования этих материалов в ПСБ и ПСМ — для всех материалов достигнуты показатели эффективности более 20% и хорошая стабильность (потери 20% изначальной эффективности после более чем 1200 ч постоянной работы).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FFSM-2024-0003).

Литература

1. Kim G.-H., Kim D. S. Development of perovskite solar cells with >25% conversion efficiency // Joule, 2021. Vol. 5. №5. P. 1033–1035.
2. Sukhorukova P. K. et al. Triphenylamine-based interlayer with carboxyl anchoring group for tuning of charge collection interface in stabilized p-i-n perovskite solar cells and modules // Journal of Power Sources, 2024. Vol. 604. P. 234436.
3. Ilicheva E. A., Sukhorukova P. K. et al. Double-side integration of the fluorinated self-assembling monolayers for enhanced stability of inverted perovskite solar cells // Materials Today Energy, 2025. Vol. 47. P. 101741.
4. Le T. S., Chuyko I. A., Luchnikov L. O., Ilicheva E. A., Sukhorukova P. K. et al. Tailoring Wetting Properties of Organic Hole-Transport Interlayers for Slot-Die-Coated Perovskite Solar Modules // Solar RRL, 2024. Vol. 8. №22. P. 2400437.
5. Ilicheva E. A., Chuyko I. A., Luchnikov L. O., Sukhorukova P. K. et al. Enhanced Thermal Stability of Inverted Perovskite Solar Cells by Bulky Passivation With Pyridine-Functionalized Triphenylamine // Solar RRL, 2026. Vol. 10. №4. P. e202500840.

УДК 66.095.26-922.2

Синтез и исследование поверхностно-активного вещества для безметального проявителя

Огаркова И. В.[1], Тарасов А. Е.[1], к. х. н., Курбатов В. Г.[1], к. х. н., Пугачева Т. А.[1], Варламов Д. А.[2], Сенченко Н. С.[2], Бадамшина Э. Р.[1], д. х. н.
[1] Федеральный исследовательский центр
Проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, пр-т Академика Семенова, 1
Ogarkova.iv@icp.ac.ru, atarasov@icp.ac.ru, kurbatov@icp.ac.ru,
pugacheva@icp.ac.ru, badamsh@icp.ac.ru
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
dvarlamov@niime.ru, nsenchenko@niime.ru

Проведен синтез и исследование поверхностно-активного вещества на основе сополимера ОЭ и ОП. Исследовано влияние количества катализатора, инициатора, состава сополимера, а также скорости дозирования и температуры на свойства полученного сополимера.
Ключевые слова: поверхностно-активное вещество; безметальный проявитель; сополимер окиси этилена с окисью пропилена; катионная полимеризация

Synthesis and study of surfactant for metal-free developer

Ogarkova I. V.[1], Tarasov A. E.[1], Ph.D, Kurbatov V. G.[1], Ph.D, Pugacheva T. A.[1], Varlamov D. A.[2], Senchenko N. S.[2], Badamshina E. R.[1], Sc.D
[1] Federal Research Center for Problems of Chemical Physics
and Medicinal Chemistry, Russian Academy of Sciences
1 Academician Semenov Ave., Chernogolovka, 142432, Russia
Ogarkova.iv@icp.ac.ru, atarasov@icp.ac.ru, kurbatov@icp.ac.ru,
pugacheva@icp.ac.ru, badamsh@icp.ac.ru
[2] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
dvarlamov@niime.ru, nsenchenko@niime.ru

A surfactant based on an ethylene oxide/propylene oxide copolymer was synthesized and investigated. The effects of catalyst and initiator amounts, copolymer composition, dosing rate, and temperature on the properties of the resulting copolymer were studied.
Keywords: surfactant; metal-free developer; ethylene oxide–propylene oxide copolymer; cationic polymerization.

Производство чипов методом фотолитографии сталкивается с проблемой: при миниатюризации элементов ширина линий фоторезиста уменьшается, а высота остается прежней, чтобы выдержать травление. Из-за этого растет соотношение высоты к ширине, и структуры теряют прочность — они коллапсируют под действием капиллярных сил при сушке. Самый простой способ борьбы с этим явлением — добавление в проявитель ПАВ. Они снижают капиллярные силы, улучшают смачивание и качество рисунка. Катионные ПАВ хорошо работают, но их трудно очистить

от металлических примесей до уровня необходимого по требованиям современной микроэлектроники и составляющего 50 ppb. Поэтому предпочтительнее неионогенные ПАВ, например блоксополимеры окиси этилена (ОЭ) и пропилена (ОП). Однако те, что выпускаются сейчас, в том числе и в России, обладают недостаточной степенью чистоты, а значит, для микроэлектроники они непригодны.

Получение полипропиленгликоля (ППГ) и полиэтиленгликоля (ПЭГ) можно осуществить методом катионной полимеризации. Ее проводят с использованием кислотных катализаторов, и в зависимости от способа исполнения реакция может проходить по двум механизмам: активного конца цепи (АКЦ) и активированного мономера (АМ). В случае механизма АКЦ активный центр находится на конце растущей полимерной цепи, что может приводить к образованию циклических продуктов реакции, данный механизм осуществляется при единовременном внесении всех компонентов в реактор. В механизме АМ активный центр находится на молекуле мономера, поэтому образование побочных циклических продуктов в данном случае сведено к минимуму. Для осуществления этого механизма необходимо, чтобы концентрация мономера была постоянной на протяжении всего процесса, этого добиваются постепенным добавлением окиси в течение всего процесса полимеризации. Эти два механизма не являются взаимоисключающими и могут протекать параллельно, но один из них будет доминирующим. [1]

Было исследовано влияние эфирата трехфористого бора (ЭТБ) как катализатора катионной сополимеризации ПО и ЭО на свойства получаемого сополимера. При увеличении концентрации катализатора в 50 раз, с сохранением постоянной концентрации остальных реагентов, происходит снижение среднечисловой молекулярной массы полимера примерно в три раза. При этом также снижается количество ЭО, вошедшего в состав полимера. Вероятно, это связано с тем, что при изменении концентрации катализатора меняется также и его соотношение с инициатором, в качестве которого выступает 1,2-пропиленгликоль (ПГ), в результате чего существенный вклад начинает вносить механизм АКЦ, приводящий к образованию свободного полиэтиленгликоля. Таким образом, видно, что варьирование концентрации катализатора — это эффективный способ изменения молекулярной массы получаемого продукта.

Было изучено влияние концентрации ПГ на свойства получаемого сополимера. Было выяснено, что увеличение его концентрации на два порядка приводит к увеличению среднечисловой молекулярной массы примерно в 1,7 раза.

Также было изучено влияние температуры и скорости дозирования мономера на свойства сополимера. Эти параметры влияют на свойства только в незначительной степени. Однако они влияют на выходы реакции, поэтому наиболее целесообразно проводить реакцию при минимально возможной температуре и максимально возможной скорости дозирования.

Изменение количества ОЭ в составе влияет на гидрофильно-липофильный баланс, что в свою очередь сказывается на поверхностно-активных свойствах. Путем измерения статического и динамического поверхностного натяжения было выяснено, что увеличение содержания ОЭ ведет к снижению поверхностного натяжения растворов ПАВ.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-91-01015.

Литература

1. Saenger W. Cyclodextrin inclusion compounds in research and industry // Angewandte Chemie International Edition in English, 1980. Vol. 19. № 5. P. 344–362.

УДК 538.971

Угловая зависимость как инструмент дизайна наноструктурированной поверхности Si при облучении C60

Карасев К. П.[1,2], Стрижкин Д. А.[2], д. ф.-м. н. Карасев П. А.[2]
[1] Академический университет им. Ж. И. Алфёрова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3
kir.karasyov2017@yandex.ru
[2] Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

Методом МД моделирования исследовано влияние полярного и азимутального углов падения ионов C_{60} (E = 8 кэВ) на поверхность (001) кремния в широком диапазоне на модификацию рельефа и распыление. Полученные данные полезны для оптимизации режимов ионно-лучевой обработки материалов микро- и наноэлектроники.
Ключевые слова: ионно-пучковые технологии; фуллерен; кремний; МД моделирование; распыление.

Angular Dependence as a Tool for Designing Nanostructured Si Surfaces via C_{60} Irradiation

Karasev K. P.[1], Strizhkin D. A.[2], Sc.D Karasev P. A.[2]
[1] Alferov University
8 Khlopina St., Bldg. 3, St. Petersburg, 194021, Russia
kir.karasyov2017@yandex.ru
[2] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politekhnicheskaya St., Saint Petersburg, 195251, Russia

The influence of polar and azimuthal angle of incidence of 8 keV C_{60} ions on relief modification and sputtering of (001) silicon surface has been investigated using the MD simulation. The data obtained are useful for optimization of ion-beam processing in micro- and nanoelectronic materials production.
Keywords: Ion beam technology; fullerene; silicon; MD simulation; sputtering.

Ионные технологии широко применяются при производстве различных устройств и компонентов микроэлектроники для селективного легирования, формирования тонких пленок, образования нанорельефа и т. д.

Для облучения можно использовать атомарные частицы и кластеры, в зависимости от задачи. Особый интерес благодаря постоянной массе и химическим свойствам представляют фуллерены (C_{60}). Облучением ускоренными ионами C_{60} на поверхности можно создавать углеродные покрытия с высокой износостойкостью, низким трением и химической инертностью [1]. Облучением ионами C_{60} потенциально можно выполнять карбидизацию поверхности кремниевых подложек и одновременное формирование изолирующего слоя для последующего высококачественного бондинга с SiC в технологии производства силовых и высокочастотных приборов на его основе. Таким образом, можно решить проблему несовпадения

параметров решетки и удешевить карбидную технологию [2]. Поэтому необходимо понимание физических процессов на интерфейсе на ранних стадиях облучения.

Исследование на атомарном уровне быстрых процессов, протекающих при облучении поверхности (001) кремния ионами C_{60} с энергией 8 кэВ, было проведено методом МД моделирования. Цель работы заключалась в исследовании влияния геометрии ионного облучения (выбор полярного и азимутального углов) на структурные изменения в приповерхностном слое кремния и его распыление. Также, было проведено сравнение результатов, полученных с использованием двух видов потенциала взаимодействия Tersoff/ZBL и Stillinger-Weber/ZBL. Полученные результаты важны для выбора оптимальных режимов ионной модификации кремния, перспективных для применения в технологиях микро- и наноэлектроники.

Литература

1. Pukha V. et al. Formation of Functional Conductive Carbon Coating on Si by C60 Ion Beam // Springer Proceedings in Physics, 2020. Vol. 255. P. 131.
2. Szuyu Huang et al. Direct Bonding of 6-in. SiC/Si Wafer with Enhanced Thermal Interface // ACS Applied Materials & Interfaces, 2025. Vol. 17. P. 46409.

УДК 620.3

Коллоидные нанокристаллы для устройств оптоэлектроники и фотоники

Ушакова Е. В., Черевков С. А., Литвин А. П., Тимкина Ю. А., Ведерникова А. А., Клименко Д. И., Митрошин А. М.
Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49, лит. А
elena.ushakova@itmo.ru

В работе представлены результаты комплексного исследования методов поверхностной пассивации и управления энергетической структурой коллоидных наноматериалов для создания эффективных светоизлучающих диодов и фотодетекторов. Предложены универсальные стратегии инженерии поверхности наночастиц для формирования активных материалов, на основе которых были изготовлены устройства с улучшенными выходными характеристиками.
Ключевые слова: углеродные точки; перовскиты; двумерные гетероструктуры; поверхностная пассивация; светодиоды; квантовый выход; энергетические уровни.

Colloidal nanocrystals for optoelectronic and photonic devices

Ushakova E. V., Cherevkov S. A., Litvin A. P., Timkina Yu. A., Vedernikova A. A., Klimenko D. I., Mitroshin A. M.
ITMO University
49 Kronverksky Ave., Bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia
elena.ushakova@itmo.ru

This paper presents the results of a comprehensive study of surface passivation methods and energy structure control for colloidal nanomaterials to create efficient light-emitting diodes and photodetectors. Universal strategies for nanoparticle surface engineering to form active materials are proposed, which were used to fabricate devices with improved output characteristics.
Keywords: carbon dots; perovskites; 2D heterostructures; surface passivation; light-emitting diodes; quantum yield; energy levels.

Для двумерных гетероструктур PbSe/PbS (типа «ядро/оболочка» и «ядро/крылья») показано, что пассивация поверхности неорганическими перовскитами $CsPbX_3$ (X = I, Br, Cl) приводит к существенному улучшению кристалличности, о чем свидетельствует сужение линии LO-фонона PbSe в спектрах комбинационного рассеяния. Использование оболочки $CsPbI_3$ минимизирует спектральный сдвиг, снижает концентрацию поверхностных ловушек, увеличивает квантовый выход фотолюминесценции в 2,3–2,7 раза и продлевает время жизни возбужденного состояния. На основе модифицированных структур успешно изготовлены ИК-светодиоды с длиной волны излучения 1350–1600 нм.

В случае углеродных наночастиц (УНЧ) показано, что функционализация полиэтиленгликолем не изменяет положения полос поглощения и излучения, но существенно повышает квантовый выход (с 30% до 75% для гидрофильных точек

и с 20 до 25% для амфифильных) [1]. Ультрафиолетовая спектроскопия и циклическая вольт-амперометрия выявили зависимость уровней HOMO/LUMO от химического состава и размера наночастиц. В композитах УНЧ@поливинилкарбазол электролюминесценция формируется за счет рекомбинации носителей зарядов со смешанных энергетических состояниях матрицы и наночастицы. При этом яркость полученных светодиодов достигла 2600 кд·м$^{-2}$. УНЧ также могут быть использованы как дополнительный материал в светодиодах и солнечных элементах на основе метал-органических перовскитов. Для перовскитных светодиодов разработана методика комнатной-температурной кристаллизации квази-2D перовскитных слоев без термического отжига за счет введения промежуточного слоя из K^+-, карбоксилат- и аминогрупп-функционализированных углеродных точек. Данный слой выступает как «ионный мостик», снижая энергию образования перовскита и обеспечивая равномерный рост кристаллов. Оптимизированные светодиоды на основе разработанных композитов обладают внешней квантовой эффективностью 20,5% [2]. Внедрение УНЧ в метал-органический перовскит при изготовлении солнечных ячеек также приводит к увеличению размера доменов, увеличению кристалличности и подавляет ионную подвижность в слое перовскита. Благодаря этому снижается гистерезис выходных характеристик и повышается эффвективность преобразования энергии солнечной ячейки до 15% [3].

Полученные результаты подтверждают, что целенаправленная модификация поверхности и проектирование межфазных границ позволяют одновременно повышать квантовый выход излучения и оптимизировать морфологию пленок, тем самым улучшая выходные характеристики устройств оптоэлектроники и фотоники.

Литература

1. Miruschenko M. D. et al. Functionalization of Hydrophilic and Amphiphilic Carbon Dots with Polyethylene Glycol for Electroluminescent Devices // Small Structures, 2025. Vol. 6. № 3. P. 2400528.
2. Hua Y. et al. Carbon-Dot-Assisted Room-Temperature Crystallization of Quasi-Two-Dimensional Perovskite Emitting Layers for Annealing-Free Light-Emitting Diodes // Nano Letters, 2025. Vol. 25. № 25. P. 10063–10071.
3. Margaryan I. V. et al. Amphiphilic Carbon Dots Suppress Iodide Ion Migration in Perovskite Solar Cells // Energy & Fuels, 2025. Vol. 39. № 17. P. 8261–8272.

УДК 621.793.4:546.59:539.211

Влияние типа электролита на структуру и шероховатость золотых покрытий на подложках GaAs/TiAu

Вайсбеккер М. С.[1], Логинов Б. А.[2], Терехова А. С.[1], Шупенев А. А.[1]
[1] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40
mariya_vaisbekker@mail.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Методом АСМ проведено сравнительное исследование размера кристаллитов золотых покрытий толщиной 2 мкм на подложках GaAs/TiAu, электроосажденных из цианидного и сульфит-тиосульфатного электролитов при плотности тока 10 мА/см^2. Установлено, что покрытия, осажденные из цианидного электролита, характеризуются полимодальным распределением зерен с максимумами в диапазонах 10–16 нм и 110–220 нм, с долей крупной фракции около 30 %. Покрытия из сульфит-тиосульфатного электролита отличаются узким распределением с максимумом 32–36 нм, доля зерен с размером более 100 нм составляет менее 5 %.
Ключевые слова: электроосаждение золота; золотые покрытия; цианидный электролит; сульфит-тиосульфатный электролит; размер зерна; атомно-силовая микроскопия.

Effect of Electrolyte Composition on the Structural Properties and Surface Roughness of Gold Films Deposited on GaAs/TiAu Substrates

Vaisbekker M. S.[1], Loginov B. A.[2], Terekhova A. S.[1], Shupenev A. A.[1]
[1] Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia
mariya_vaisbekker@mail.ru
[2] National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

Using AFM, a comparative study of the crystallite size of 2 μm thick gold coatings on GaAs/TiAu substrates, electrodeposited from cyanide and sulfite-thiosulfate electrolytes at a current density of 10 mA/cm^2. It was found that coatings deposited from cyanide electrolyte are characterized by a polymodal grain size distribution with maxima in the ranges 10–16 nm and 110–220 nm, with the coarse fraction accounting for about 30 %. Coatings from sulfite-thiosulfate electrolyte show a narrow distribution with a maximum at 32–36 nm; the fraction of grains larger than 100 nm is less than 5 %.
Keywords: gold electrodeposition; gold coatings; cyanide electrolyte; sulfite-thiosulfate electrolyte; grain size; atomic force microscopy.

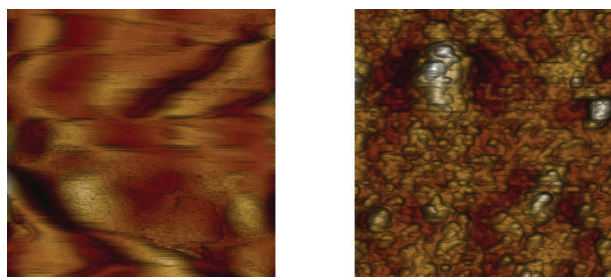
Золотые гальванические покрытия широко применяются в микроэлектронике для формирования омических контактов, столбиковых выводов и межсоединений.

Традиционно используемые цианидные электролиты имеют ряд существенных недостатков: высокую токсичность, несовместимость с фоторезистивными масками, а также склонность к формированию крупнозернистых покрытий с повышенной шероховатостью поверхности, что приводит к увеличению омических потерь в СВЧ-приборах. Бесцианидные сульфит-тиосульфатные электролиты лишены указанных недостатков, однако их влияние на зеренную структуру покрытий на подложках GaAs/TiAu остается недостаточно изученным. Целью настоящей работы является сравнительный анализ микроструктуры и морфологии золотых покрытий, осажденных из обоих типов электролитов, методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии.

Проведено сравнительное исследование влияния типа электролита на микроструктуру электроосажденных золотых покрытий толщиной 2 мкм, сформированных на подложках GaAs/TiAu. Осаждение осуществляли при плотности тока 10 мА/см^2 из двух электролитов: цианидного и сульфит-тиосульфатного [1].

Морфологию поверхности исследовали методом атомно-силовой микроскопии с использованием прибора SCB8001VEGA. Обработку изображений и статистический анализ размеров кристаллитов выполняли в программном обеспечении Nova PX. Среднеквадратичную шероховатость поверхности (Sq) определяли на участке сканирования размером 10×10 мкм.

Анализ данных о распределении размеров зерен выявил принципиальные различия в микроструктуре покрытий в зависимости от применяемого электролита (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. АСМ-изображения слоев золота толщиной 2 мкм, осажденных из цианидного (*а*) и сульфит-тиосульфатного (*б*) электролитов золочения при плотности тока 10 мА/см^2

В покрытиях из цианидного электролита распределение размеров кристаллитов носит полимодальный характер с выраженными максимумами в диапазонах 10–16 нм и 110–220 нм. Медианный диаметр зерна составляет порядка 16 нм, при этом значительная доля зерен — около 30 %, приходится на крупную фракцию с диаметром выше 100 нм. Широкий разброс размеров свидетельствует о неоднородном зародышеобразовании и неравномерном росте кристаллитов в ходе электроосаждения из цианидного электролита.

В покрытиях из сульфит-тиосульфатного электролита распределение зерен значительно более узкое и сосредоточено преимущественно в диапазоне 15–50 нм с максимумом в диапазоне 32–36 нм (11,3 %). Доля крупных зерен, с диаметром

более 100 нм, не превышает 5%, что указывает на более равномерный и контролируемый рост кристаллической структуры. Общий размерный диапазон охватывает значения от 3 до 750 нм, однако статистически значимые доли сосредоточены в нанометровой области (менее 100 нм).

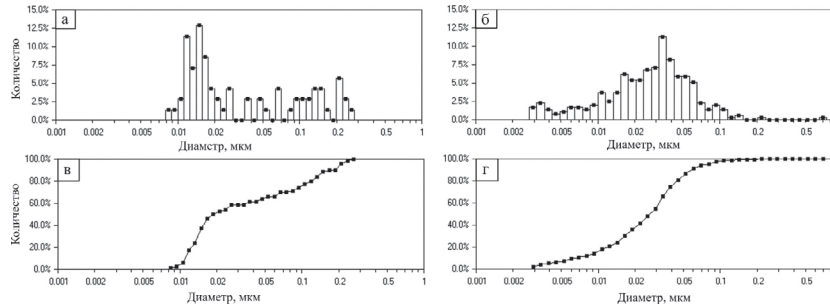


Рис. 2. Дифференциальные (*а*, *б*) и интегральные (*в*, *г*) кривые распределения размера кристаллитов в слоях золота, осажденных из цианидного (*а*, *в*) и сульфит-тиосульфатного (*б*, *г*) электролитов золочения

Сравнительный анализ зеренной структуры золотых покрытий, электроосажденных на подложки GaAs/TiAu при плотности тока 10 мА/см^2, показал, что применение сульфит-тиосульфатного электролита обеспечивает формирование более однородного мелкозернистого покрытия с узким распределением размеров зерен в диапазоне 15–50 нм. Цианидный электролит приводит к полимодальному распределению с медианным диаметром 16 нм и значительной долей зерен крупнее 100 нм (30%), что свидетельствует о неоднородном зародышеобразовании и неравномерном росте кристаллитов, и, как следствие, о более высокой шероховатости поверхности и увеличению потерь в СВЧ-приборах.

Результаты получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2024-0008).

Литература

1. Вайсбеккер М. С., Бекезина Т. П., Останина Т. Н., Барбин Е. В., Кулинич И. В., Таловская А. В. Осаждение золота на TiAu из сульфит-тиосульфатного электролита: влияние условий электрохимического процесса на свойства золотых слоев // Гальванотехника и обработка поверхности, 2022. — Т. 30. — № 3. — С. 35–45. DOI: 10.47188/0869-5326_2022_30_3_35.

УДК 678.046

Разработка измерительной оснастки для контроля электропроводности суспензий углеродных нанотрубок в фотополимерной смоле

Крюков М. Д.[1], Буренков Н. С.[1], Демин В. Л.[2], к. т. н., Тюрина С. А.[1] к. т. н.
[1] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78
kryukov_md@mirea.ru, burenkov@mirea.ru, tyurina_s@mirea.ru
[2] Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, 31, корп. 4
basoid@inbox.ru

Разработана лабораторная измерительная ячейка для экспресс-оценки электропроводности жидких суспензий углеродных нанотрубок в фотополимерной смоле. Установлена корреляция между омическим сопротивлением суспензии и качеством диспергирования, подтвержденная измерениями параллельной емкостной составляющей, связанной с двойным электрическим слоем на электродах. Показано, что минимальное сопротивление достигается при 18 мин ультразвуковой обработки, что соответствует оптимальному распределению нанотрубок.
Ключевые слова: измерительная оснастка; углеродные нанотрубки; фотополимерная смола; электропроводность; двойной электрический слой; ультразвуковое диспергирование.

Development of a measuring tool for express control of the electrical conductivity of carbon nanotube suspensions in a photocurable resin

Kryukov M. D.[1], Burenkov N. S.[1], Demin V. L.[2], Tyurina S. A.[1]
[1] MIREA — Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia
[2] A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences
31/4 Leninsky Ave., Moscow, 119071, Russia

A laboratory measuring cell for rapid assessment of the electrical conductivity of liquid suspensions of carbon nanotubes in a photocurable resin has been developed. A correlation between the ohmic resistance of the suspension and the dispersion quality is established, supported by measurements of the parallel capacitance component related to the electric double layer at the electrodes. It is shown that the minimum resistance is achieved after 18 min of ultrasonic treatment, corresponding to the optimal distribution of nanotubes.
Keywords: measuring tool; carbon nanotubes; photocurable resin; electrical conductivity; electric double layer; ultrasonic dispersion.

Для создания токопроводящих композитов на основе углеродных нанотрубок (УНТ) и фотополимерных смол (ФС), предназначенных для LCD-печати, критическое значение имеет контроль качества диспергирования УНТ [1, 2]. Агломерация

нанотрубок приводит к неоднородности свойств, снижению электропроводности и образованию дефектов [3]. Существующие методы (СЭМ, ОМ) затруднены для непроводящих фотополимерных матриц подобных композитов. Цель работы — разработка простой и воспроизводимой измерительной оснастки для экспресс-оценки электропроводности жидких суспензий УНТ в ФС, позволяющей косвенно судить о качестве диспергирования и оптимизировать режимы ультразвуковой обработки.

Объекты и методы

В качестве матрицы использовали коммерческую фотополимерную смолу, наполнитель — ОУНТ марки TUBALL (0,2 масс.%). Диспергирование проводили ультразвуковым гомогенизатором (20 кГц, импульсный режим) в течение 2–26 мин.

Для измерений разработана ячейка на основе 3D-печатного корпуса с двумя параллельными медными электродами (диаметр 1,3 мм, расстояние 5 мм). Их концы касаются дна пробирки, обеспечивая постоянство погруженной площади и объема жидкости. Измерения выполняли LCR-метром (Jinko JK2830) на частоте 1 кГц в режиме последовательной схемы, регистрируя активное сопротивление (DCR) и параллельную емкость (c_p), чувствительную к поляризации на границе электрод–жидкость. Применение четырехпроводной схемы и медных электродов исключает влияние сопротивления соединительных проводов и площади их контакта на результаты.

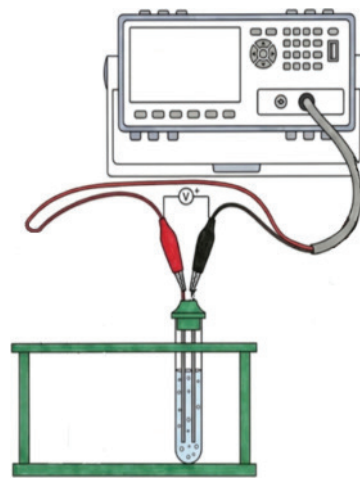


Рис. 1. Схема лабораторного стенда для измерения электропроводности суспензии

Результаты и обсуждение

В ходе экспериментов получена зависимость активного сопротивления (Rdc) суспензии от времени ультразвуковой обработки (табл. 1). С увеличением времени обработки от 2 до 18 мин сопротивление снижается с 5381 до 203 Ом, что объясняется разрушением агломератов ОУНТ и формированием проводящей сетки в объеме

жидкости. При дальнейшем увеличении времени до 26 мин наблюдается рост сопротивления до 286 Ом, вероятно, вследствие деструкции отдельных нанотрубок (укорочение, повреждение стенок) под действием интенсивного ультразвука, что уменьшает эффективную длину проводящих путей [3, 5].

Таблица 1. Зависимость сопротивления суспензии (Rdc) от времени ультразвуковой обработки (20 кГц, 0,2 % ОУНТ без диспергатора)

Время УЗ-обработки, мин	2	4	6	8	10	12	14	18	26
Среднее Rdc, Ом	5381	4923	1159	1151	1143	1772	1159	203	286
Среднее Cp, nF	1	104	258	310	380	435	521	588	533

Параллельно с Rdc измеряли емкостную составляющую c_p. При снижении DCR до минимума c_p возрастает за счет формирования двойного электрического слоя (ДЭС) на медных электродах. Суспензия УНТ в ФС — слабый электролит благодаря полярным группам смолы и заряженным функциям на поверхности трубок. Ёмкость ДЭС пропорциональна эффективной площади поляризующихся частиц: чем лучше диспергированы ОУНТ, тем больше индивидуальных частиц/мелких агрегатов, выше общая поверхность и вклад в c_p. Поэтому c_p дает дополнительную информацию о степени дезагрегации, а совместный анализ с DCR надежнее оценки диспергирования, чем одно омическое сопротивление.

Корреляция позволяет предположить, что суспензии с низким RDC и высоким c_p дадут более проводящие отвержденные образцы после LCD-печати [4]. Данная гипотеза сейчас проверяется на серии напечатанных образцов, результаты будут представлены позднее.

Заключение

Разработана простая и воспроизводимая измерительная ячейка для экспресс-контроля электропроводности суспензий УНТ в фотополимерной смоле. Показано, что активное сопротивление суспензии коррелирует со степенью диспергирования нанотрубок, а измерение параллельной емкости позволяет дополнительно оценивать эффективную площадь поверхности частиц через двойной электрический слой. Оптимальный режим ультразвуковой обработки для исследуемой системы — 18 мин (R_{DC} = 203 Ом). Предложенный метод рекомендован для оперативной настройки параметров приготовления суспензий при 3D-печати токопроводящих композитов.

Работа выполнена без привлечения внешнего финансирования.

Литература

1. Coleman J. N., Khan U., Blau W. J., Gun'ko Y.K. Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites // Carbon, 2006. Vol. 44. № 9. P. 1624–1652.
2. Bauhofer W., Kovacs J. Z. A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites // Composites Science and Technology, 2009. Vol. 69. № 10. P. 1486–1498.
3. Huang Y. Y., Terentjev E. M. Dispersion of carbon nanotubes: mixing, sonication, stabilization, and composite properties // Polymers, 2012. Vol. 4. № 1. P. 275–295.

4. Tilve-Martinez D., Neri W., Vukadinovic N. et al. Electrical anisotropy and its mitigation in conductive polymers printed by vat photopolymerization // Additive Manufacturing, 2024. Vol. 86. P. 104210.
5. Сухорукова Е. В., Калмыков А. В., Шустов М. В. Влияние ультразвуковой обработки на структуру и свойства полимерных нанокомпозитов // Перспективные материалы, 2021. — № 3. — С. 34–42.

УДК 538.958

Перспективы использования алмазов с NV-дефектами в качестве матриц самосветящихся материалов

к. ф.-м. н. Гусев Г. А., д. г.-м. н. Бураков Б. Е., к. ф.-м. н. Кравец В. А., к. ф.-м. н. Орехова К. Н., Токарев М. В., к. ф.-м. н. Дементьева Е. В., Дементьев П. А., д. ф.-м. н. Заморянская М. В.
ФТИ им. А. Ф. Иоффе
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Оценена перспективность использования алмазов с NV-дефектами, излучающими в красном диапазоне спектра, в качестве основы для создания самосветящегося материала. Были исследованы спектры люминесценции и поглощения в зависимости от содержания примесей в различных секторах роста.
Ключевые слова: алмаз; самосветящийся материал; NV-дефект; люминесценция; элемент оптопары.

Prospects of using diamonds with NV centers as matrices for self-glowing materials

Ph.D Gusev G. A., Ph.D Burakov B. E., Ph.D Kravets V. A., Ph.D Orekhova K. N., Tokarev M. V., Ph.D Dementeva E. V., Dementev P. A., Ph.D Zamoryanskaya M. V.
Ioffe Institute
26 Politekhnicheskaya St., Saint Petersburg, 194021, Russia

The prospects of using diamonds with NV centers emitting in the red spectral range as a basis for creating a self-glowing material have been assessed. The luminescence and absorption spectra were studied as functions of impurity content in different growth sectors.
Keywords: diamond; self-glowing material; NV center; luminescence; optocoupler element

Альтернативой захоронению некоторых видов радиоактивных отходов является извлечение актиноидов (например, Pu, Am) или других долгоживущих радионуклидов (например, ^{14}C) из отходов и их безопасное длительное использование. Одним из способов применения этих элементов является их добавление в устойчивые диэлектрические матрицы, содержащие эффективные центры люминесценции, для создания самосветящихся кристаллов. При этом высокоэнергетическое излучение, появляющееся в результате радиоактивного распада, будет преобразовываться в излучение видимого диапазона непосредственно внутри вещества. Подобные материалы можно широко использовать для создания источников малого тока (при совмещении с фотовольтаическим преобразователем), элементов оптопар и датчиков содержания газов в среде. При этом, благодаря низкому содержанию радиоактивных веществ и их непосредственному включению в структуру кристаллов-матриц, такие приборы безопасны в использовании.

Возможность создания самосветящихся материалов на основе монокристаллов $YPO_4:Eu^{3+},^{238}Pu$, $ZrSiO_4:Tb^{3+},^{238}Pu$ и керамик $ZrO_2:Eu^{3+},^{238}Pu$ впервые показана в работе [1]. Также перспективными матрицами для создания самосветящихся кристаллов

являются искусственные алмазы. Они отличаются высокими сцинтилляционными свойствами, характеризуются яркой красной люминесценцией, а также обладают значительной устойчивостью (химической, механической и радиационной). Ранее был создан алмаз с добавлением ^{14}C и бора, обладающий самосвечением [2], создан макет источника малого тока на его основе [3]. Однако существует проблема относительно невысокого выхода люминесценции в полученном материале, что ограничивает его применимость. Решением может стать использование иных дефектов-центров люминесценции. При поиске альтернатив необходимо учитывать яркость люминесценции, собственное поглощение выходящего излучения, а также проводить сравнение характеристик алмазов с различными типами дефектов. Целью настоящей работы являлось такое исследование на алмазах без добавления ^{14}C. Возбуждение люминесценции проводилось пучком электронов средних энергий (~20 кэВ). Были подробно исследованы спектры люминесценции (в диапазоне 350–750 нм) и оптического поглощения (450–750 нм) в зависимости от содержания примесей в различных секторах роста алмазов, полученных методом HPHT (High Pressure High Temperature) с последующим облучением электронами (3 МэВ) и отжигом при 1200 °C. Исследованные алмазы показали стабильное красное свечение под действием высокоэнергетического возбуждения. Согласно полученным данным, NV-центры демонстрируют высокую интенсивность катодолюминесценции, существенно превышающую типичные значения для большинства других дефектов в алмазе. Оценена перспективность использования NV-дефектов в качестве основных центров люминесценции для создания самосветящихся кристаллов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-19-00562, https://rscf.ru/project/26-19-00562.

Литература

1. Self-glowing crystals –radioactive decay energy converters into optical emission / M. Zamoryanskaya, E. Dementeva, K. Orekhova, V. Kravets, A. Trofimov, G. Gusev, I. Ipatova, B. Burakov // Mater. Res. Bull. 2021. 142. № 111431.
2. Self-glowing single crystal diamond activated with carbon-14: First synthesis and characterization / S. N. Bocharov, B. E Burakov, A.I. Isakov, K.N. Orekhova, E. V. Dementeva, M. V. Zamoryanskaya, P. A. Dementev, B. Y. Ber, D. Yu. Kasantsev, M. V. Tokarev, Yu. Yu. Petrov // Diam. Relat. Mat., 2024. 141. № 110650
3. Photovoltaic nuclear electric battery based on single-crystal diamond core activated with carbon-14 / B. E. Burakov, S. N. Bocharov, V. S. Kalinovskii, E. V. Kontrosh, K. N. Orekhova, G. A. Gusev, P. A. Dementev, A. N. Trofimov, V. A. Kravets, I. A. Tolkachev, K. K. Prudchenko, E. V. Dementeva, M. V. Zamoryanskaya // Applied Physics Letters, 2025. 127. № 263903.

УДК 538.953

Исследование продуктов горения многослойных термитных структур Al/CuO с внедренным слоем Ag для применения в спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света

Новосельцев А. И., Кружалина М. Д., Новиков Д. В., Дубков С. В., к. т. н., Лебедев Е. А., к. т. н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
aleks.novoselcev1999@gmail.com

Разработан способ экспресс формирования массивов наночастиц для исследований малого количества вещества методом спектроскопии гигантского комбинационного рассеивания света. Определено влияние геометрических характеристик слоя Ag на характеристики, продукты и режимы процесса горения многослойных термитных структур на основе Al/CuO и величину ГКР-эффекта в самосформированных наночастицах.
Ключевые слова: спектроскопия ГКРС; плазмонный резонанс; термитные материалы; магнетронное распыление; ГКР-активные подложки.

Investigation of combustion products of multilayer thermite structures Al/CuO with embedded layer Ag for use in Raman spectroscopy

Novoselcev A. I., Kruzhalina M. D., Novikov D. V., Dubkov S. V., Ph.D, Lebedev E. A., Ph.D
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
aleks.novoselcev1999@gmail.com

A method has been developed for the rapid formation of nanoparticle arrays for studying small amounts of matter using for SERS. The influence of the geometric characteristics of the Ag layer on the characteristics, products and modes of the combustion process of multilayer thermite structures based on Al/CuO and the magnitude of the GCR effect in self-formed nanoparticles is determined.
Keywords: SERS; plasmon resonance; multilayer thermite structure; magnetron sputtering; SERS-substrate.

В настоящее время одним из перспективных методов анализа малых количеств вещества является спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКРС), позволяющая детектировать химические соединения при их концентрации порядка единиц наномолей на литр. К числу достоинств данного метода относятся:

- Высокая чувствительность. Контроль концентрации от 10^{-10}–10^{-15} М/л;
- Структурная информативность. ГКРС позволяет определять не только вещество, но и тип его химической связи;
- Неразрушающий характер анализа;
- Возможность анализа малых объемов веществ.

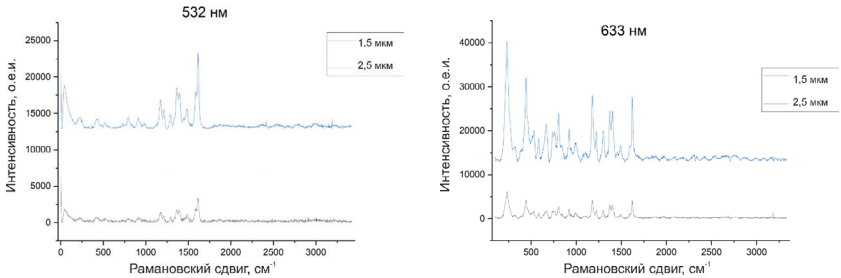
Для успешной реализации спектроскопии ГКРС необходимо применение ГКР-активных подложек, представляющих собой наноструктурированные поверхности, содержащие упорядоченные массивы элементов из благородных металлов и/или диэлектриков. Однако подложки, полученные традиционными методами, обладают существенным недостатком [1]. Вследствие высокой химической активности поверхности, такие подложки адсорбируют загрязнения из окружающей среды в течение короткого промежутка времени, что приводит к необратимой утрате их аналитических свойств.

Устранить указанный недостаток позволяет применение метода экспресс-формирования массивов плазмонных наночастиц в результате горения многослойных термитных структур (МТС) [2]. В данном методе ГКР-активный материал в первоначальном виде представляет собой внедренную сплошную пленку в составе термитной структуры. В такой «спящей» форме материал находится в составе МТС, что изолирует и защищает его от воздействия окружающей среды. Непосредственно перед проведением аналитических измерений на МТС оказывается локальное энергетическое воздействие, которое приводит к протеканию в ней самораспространяющейся высокотемпературной экзотермической реакции (СВЭР). Энергии от СВЭР достаточно для самоформирования массива наночастиц, происходящего в результате плавления, фрагментации и последующей коалесценции исходной внедренной пленки ГКР-активного материала [3].

Целью исследования являлось определение влияния толщины внедренного слоя Ag на характеристики, продукты и режимы протекания самораспространяющейся высокотемпературной экзотермической реакции в МТС, а также на ГКР-эффект в самосформированных наночастицах. Для решения поставленной задачи методом магнетронного распыления на поверхность ситалловой подложки наносилась многослойная термитная структура Al/CuO, общей толщиной от 1 до 3 мкм и с толщиной отдельных слоев 50 нм. Внедренный слой Ag формировался аналогичным методом и входил в состав МТС, его толщина варьировалась от 100 до 300 нм. Особенности процесса горения, продукты и геометрические параметры поверхности после СВЭР исследовались с помощью высокоскоростной видеосъемки и растровой электронной микроскопии. Исследование ГКР-эффекта проводилось при помощи рамановской спектроскопии на длинах волн 532 и 633 нм, в качестве аналитического вещества применялся раствор малахитового зеленого с концентрацией 10 мкМ на 3 мл.

В ходе работ была подготовлена серия образцов с различной общей толщиной МТС и внедренного слоя на основе Al/CuO-Ag. Исследование особенностей процесса горения установило, что при добавлении внедренного слоя в МТС, скорость распространения фронта реакции снижается в среднем на 15,5%, а наибольшая скорость горения Al/CuO-Ag достигается при общей толщине структуры 3 мкм, толщине слоя Ag 250 нм и составляет 26 м/с. Анализ продуктов и геометрических параметров после протекания СВЭР позволил изучить морфологию самосформированных наночастиц и продемонстрировал, что при увеличении общей толщины МТС концентрация Ag в продуктах горения увеличивается с 0,53 до 3,15 ат.%. Исследование ГКР-эффекта показало, что структуры с толщиной Al/CuO 1,5 мкм и толщиной внедренного слоя Ag 250 нм обладают наибольшим коэффициентом усиления — $5 \cdot 10^4$ раз, который в среднем на 72% больше, чем в образцах

с аналогичной толщиной Ag, но с большей общей толщиной многослойной термитной структуры, результаты исследования представлены на рис. 1.



а *б*

Рис. 1. ГКР-спектры полученные с образцов с различной толщиной МТС: исследование с помощью зеленого лазера (*а*); исследование с помощью красного лазера (*б*)

Полученные данные позволяют углубить понимание механизма самоформирования наночастиц в результате горения структуры Al/CuO с внедренным слоем Ag, а также прогнозировать их характеристики в процессе создания. Результаты данной работы в перспективе будут использованы в разработке ГКР-сенсора, пригодного для эксплуатации в полевых условиях.

Работа выполнена в рамках задания 2024-2026 FSMR-2024-0012.

Литература

1. Новосельцев А. И. Исследование процесса самоформирования наночастиц металлов в результате горения многослойных термитных материалов Al/CuO / Новосельцев А. И., Лебедев Е. А., Рязанов Р. М., Сыса А. В. // Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения, 2024.
2. Novoseltsev A. Al-CuOx multilayer nanostructures: formation features and thermal properties of new type of local heat source / A I Novoseltsev, L. I. Sorokina, A. V. Sysa, R. M. Ryazanov, E. A. Lebedev // Journal of Physics: Conference Series, 2021. Vol. 2086. № 1. P. 012213.
3. Патент RU 2806842 C1. Способ изготовления подложки с экспрессным самоформированием наночастиц для получения спектров гигантского комбинационного рассеяния света: пат. 2806842 Рос. Федерация 2023111794; заявл. 05.05.23, опубл., Бюл. № 31.

УДК 658.5

Новые материалы для финишной очистки технологических газов в микроэлектронике

Черепанов Д. С., Сажнев С. В., к. т. н., Попенко В. Ф., к. х. н., Дубков С. В., к. т. н., Воловликова О. В., к. т. н., Василевская Ю. О.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Институт ПМТ
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
amt.miet@yandex.ru

При проектировании и эксплуатации современных производств микроэлектроники одним из ключевых моментов является инженерии обеспечения производства высокочистыми материалами, включая специальные технологические и магистральные газы. Рассмотрены требования к системам газоснабжения, особенностям очистки газов и основные направления по развитию регенерируемых финишных очистителей на основе отечественных сорбционных материалов и катализаторов.
Ключевые слова: системы технологического газоснабжения; микроэлектронная индустрия; чистота производства.

New materials for final purification of process gases in microelectronics

Cherepanov D. S., Sazhnev S. V., Ph.D, Popenko V. F., Ph.D, Dubkov S. V., Ph.D, Volovlikova O. V., Ph.D, Vasilevskaya Yu. O.
National Research University of Electronic Technology (MIET),
Institute of Advanced Materials and Technologies
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
amt.miet@yandex.ru

When designing and operating modern microelectronics production facilities, one of the key aspects is the engineering of high-purity materials, including specialized process and pipeline gases. This article examines the requirements for gas supply systems, gas purification features, and key development trends for regenerable final purifiers based on domestically produced sorption materials and catalysts.
Keywords: industrial gas supply systems; microelectronic industry; clean production.

Одним из ключевых факторов при планировании микроэлектронного производства является определение основных изделий и технологий, формирование листа оборудования и всей инфраструктурной системы обеспечения этого производства. При этом обеспечение высокого качества и стабильности функционирования готовых изделий с достижением требуемого и экономически целесообразного максимального выхода годных налагает особые требования к проектированию и эксплуатации безопасного производства. Выпуск качественных изделий с высокой воспроизводимостью характеристик и их надежности при эксплуатации в различных условиях требует непрерывного обеспечение оперативного контроля качества потребляемых технологических сред и контроля чистоты производства на всех операционных и постоперационных переделах, формирования требований

по сертификации каждой линии, каждого процесса и детальное решение общего газового менеджмента производства в целом [1].

Для обеспечения воспроизводимости процессов и высокого выхода годных на каждой операции должно быть предусмотрено размещение финишных очистителей непосредственно в линиях технологических газов, газовых панелях и шкафах для специальных технологических газов, в точках подачи газов в технологическое оборудование. Особое внимание уделяется правильному подбору очистителей, монтируемых в газовых шкафах и выбору установок очистки магистральных газов.

Представлены экспериментальные данные по разработке и подбору новых отечественных сорбентов и катализаторов для создания отечественной базы очистителей магистральных газов.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц // Издательство стандартов, 2017. — С. 4.

УДК 539.23:535.34

Исследование влияния обработки электромагнитным излучением ГКР-подложек на основе системы Mo-Ag

Тарасов А. М., Гаврилов С. А., Дубков С. В., Кондратьева С. А., Байгузина А. Г., Громов Д. Г.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
tarasov@4309.ru

В работе предложен подход к созданию ГКР-подложек на основе систем взаимно нерастворимых компонентов (Ag и окси-нитридов Nb/Mo), позволяющий формировать плазмонные наночастицы непосредственно перед анализом и избежать сульфидизации поверхности серебра. Экспериментально исследованы тонкие пленки Mo-Ag, полученные ионно-плазменным напылением, и сравнена ГКР-активность массивов наночастиц, сформированных термическим, оптическим воздействием и их комбинацией.
Ключевые слова: гигантское комбинационное рассеяние света; ионно-плазменное распыление; спектрофотометрия; плазмонный резонанс; наночастицы металлов.

Study of the influence of electromagnetic radiation treatment of SERS substrates based on the Mo-Ag system

Tarasov A. M., Sc.D Gavrilov S. A., Ph.D Dubkov S. V., Kondratyeva S. A., Bayguzina A. G., Sc.D Gromov D. G.
National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
tarasov@4309.ru

This paper proposes an approach to creating SERS substrates based on systems of mutually insoluble components (Ag and Nb/Mo oxynitrides). This approach allows for the formation of plasmonic nanoparticles immediately prior to analysis, thereby avoiding sulfidization of the silver surface. Thin Mo-Ag films obtained by ion-plasma sputtering are experimentally studied, and the SERS activity of nanoparticle arrays formed by thermal, optical, and a combination of both is compared.
Keywords: SERS; ion-plasma sputtering; spectrophotometry; plasmon resonance; metal nanoparticles.

Плазмонные наночастицы металлов находят свое применение во многих областях. Одним из таких применений является использование массивов плазмонных наночастиц в спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР). Благодаря ГКР-структурам возможно обнаружение сверхмалых концентраций веществ, вплоть до единичных молекул, что особенно привлекательно для аналитических исследований.

Традиционные ГКР-подложки представляют собой диэлектрический слой, на котором располагается массив наночастиц плазмонного металла. Наибольшим коэффициентом усиления рассеяния света обладают структуры на основе массивов

наночастиц Ag. Однако такие структуры обладают существенным недостатком. Из-за высокой поверхностной энергии Ag взаимодействует с атмосферным воздухом, что приводит к сульфидизации поверхности. Это существенно снижает усиление сигнала комбинационного рассеяния.

Одним из путей решения данной проблемы являются системы, в которых процесс формирования плазмонных наночастиц металлов производится непосредственно перед проведением аналитического исследования. Примером таких структур могут выступать системы взаимно нерастворимых компонентов. В таких структурах плазмонный компонент (Ag) не образует устойчивые химические соединения с материалом матрицы. В качестве матрицы могут выступать окси-нитридные соединения Nb и Mo. Формирование таких структур производится путем распыления мозаичной мишени Ag и Nb/Mo. В результате энергетического воздействия на сформированный слой происходит выделение плазмонного металла на поверхность пленки в виде массива наночастиц. В качестве энергетического воздействия могут выступать: пропускание электрического тока через подложку, термическая обработка, микроволновое излучение и плазмонный нагрев. Плазмонный нагрев, возникающий в результате облучения таких наночастиц электромагнитным излучением, также приводит к выделению наночастиц на поверхность пленки. Применение данного метода возможно только при оптической прозрачности формируемой тонкой пленки. Такой пленкой может выступать MoO_3 (рис. 1).

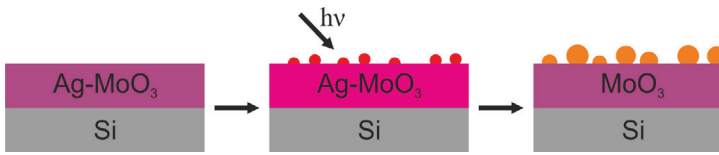


Рис. 1. Схематическое изображение процесса формирования плазмонных наночастиц Ag падающим электромагнитным излучением

В данной работе представлены результаты влияния условий формирования ГКР-активного слоя на характеристики массива плазмонных наночастиц Ag на поверхности тонкой пленки Mo-Ag, напыленной ионно-плазменным методом. В первую очередь исследовалось влияние содержания O_2 на состав и физические свойства пленки при ионно-плазменном распылении Mo мишени. С увеличением содержания O_2 в газовой смеси увеличивается ширина запрещенной зоны (ШЗЗ) тонкой пленки. При поступлении в камеру смеси $Ar:O_2 = 2:1$ ШЗЗ составляет около 4 эВ, и данные образцы имеют наибольший коэффициент пропускания в области длин волн от 300 до 1100 нм. На собственном КР-спектре данного образца видны пики Si и SiO_2, что также свидетельствует о прозрачности формируемой пленки. После термической обработки в муфельной печи на воздухе в течение 10 минут при 400 °C, на собственном КР-спектре образца наблюдаются пики характерные для MoO_3. В других газовых средах формируются тонкие пленки, содержащие несколько фаз оксида молибдена, в частности видны пики MoO_2, MoO_3, Mo_4O_{11}. При распылении мишени Mo-Ag с соотношением компонентов 80:20 соответственно в газовой среде $Ar:O_2 = 2:1$ формируется прозрачная тонкая пленка оксида молибдена, содержащая Ag, о чем говорят пики плазмонного резонанса на спектрах пропускания.

Коэффициент усиления ГКР-структуры после воздействия электромагнитным излучением ксеноновой лампы возрастает в 3–4 раза по сравнению со структурой после отжига в муфельной печи.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2026-2028 FSMR-2026-0005. Формирование и исследование ГКР-активности проводилось в научно-исследовательской лаборатории «Фотонная сенсорика и плазмонные материалы» в рамках государственного задания 2024-2026 FSMR-2024-0012.

УДК 54.05

Производные триазатруксена для устройств гибридной электроники: дырочно-транспортные слои в перовскитных фотопреобразователях

Пушкарева Е. А., Аккуратов А. В., к. х. н.
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, пр-т Академика Семенова, 1
pushkareva.elizaveta@mail.ru, akkuratow@yandex.ru

Синтезирована новая малая молекула на основе триазатруксена, содержащая три 3,4,5-метоксифенильные группы. Структура данного соединения подтверждена и охарактеризована набором физико-химических методов исследования. Определены энергетические уровни граничных орбиталей полученной сопряженной молекулы, а также проведены исследования данного материала в качестве дырочно-транспортного слоя в составе перовскитных солнечных элементов.
Ключевые слова: триазатруксены; дырочно-транспортные материалы; реакции кросс-сочетания; перовскитные солнечные элементы.

Triazatruxene derivatives for hybrid electronics devices: hole-transport layers in perovskite photoconverters

Pushkareva E. A., Akkuratov A. V., Ph.D
Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry of the Russian Academy of Sciences
1 Academician Semenov Ave., Chernogolovka, 142432, Russia
pushkareva.elizaveta@mail.ru, akkuratow@yandex.ru

A new small molecule based on triazatruxene containing three 3,4,5-methoxyphenyl groups was synthesized. The structure of this confirmed compound was characterized using a range of physicochemical methods. The energy levels of the frontier orbitals of the resulting bound molecule were determined, and this material was studied as a hole-transport layer in perovskite solar cells.
Keywords: triazatruxenes; hole-transport materials; cross-coupling reactions; perovskite solar cells.

Перспективным блоком для создания соединений, использующихся в качестве дырочно-транспортных материалов в перовскитных солнечных элементах, является триазатруксен. Наличие планарной структуры обеспечивает эффективную упаковку молекул и высокую подвижность носителей зарядов, а большое количество реакционноспособных положений открывает широкие возможности для структурной модификации триазатруксена [1].

Реакции кросс-сочетания служат удобным инструментом для построения молекул с сопряженной системой связей. Так, на основе ядра триазатруксена по реакции Сузуки была синтезирована новая сопряженная малая молекула, содержащая три 3,4,5-метоксифенильные группы. Введение данных фрагментов

в структуру соединения позволяет уменьшить потенциал ионизации — повысить энергию ВЗМО, значение которой было установлено методом циклической вольтамперометрии (−5,1 эВ), что обеспечивает энергетическое выравнивание с валентной зоной перовскита и эффективную экстракцию дырок из активного слоя, а также позволяет считать соединение перспективным дырочно-транспортным материалом для перовскитных солнечных элементов.

Таким образом, в ходе работы была получена новая сопряженная малая молекула, которая открывает доступ к новым функциональным материалам на основе триазатруксена и может найти широкое применение в качестве дырочно-транспортных материалов для перовскитной фотовольтаики.

Литература

1. Ferrocenyl-Substituted Triazatruxenes: Synthesis, Electronic Properties, and the Impact of Ferrocenyl Residues on Directional On-Surface Switching on Ag(111) / L. Vogelsang, T. Birk, F. Paschke, A. Bauer, V. Enenkel, L. M. Holz, M. Fonin, R. F. Winter // Inorg. Chem., 2023. Vol. 62. P. 16236–16249.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках гранта 125032604426-5.

УДК 620.3

Формирование пленок восстановленного оксида графена на ПЭТ подложках для устройств гибкой электроники

Раянова К. А.[1], Бабенко С. И.[1], Брылева А. С.[1], Канаев К. В.[1], Рыкунова А. О.[1], Сталева С. Д.[1], Хлопотова А. С.[1], Чугайнова В. А.[1], Комаров И. А.[2], к. ф.-м. н.
[1] Московский политехнический университет
107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38
raanovakamilla@gmail.com, sofi.bb@yandex.ru, master_kom@mail.ru, kir-kv2005@mail.ru, rykunova2006@inbox.ru, alena-hlop@mail.ru
[2] ФНИЦ ПХФМХ РАН
142432, г. Черноголовка, пр-т. Академика Семенова, 1А
master_kom@mail.ru

Исследовано влияние состава многокомпонентных суспензий оксида графена на смачивание гибких ПЭТ-подложек и морфологию формируемых пленок. Определены оптимальные концентрации и состав дисперсионной среды для получения равномерных покрытий. Показана возможность управляемого термического восстановления полученных пленок оксида графена при кратковременном нагреве в вакуумной камере.
Ключевые слова: оксид графена; тонкие пленки; смачиваемость; термическое восстановление.

Formation and morphology of thin graphene oxide films from multicomponent suspensions on flexible PET substrates

Rayanova K. A.[1], Babenko S. I.[1], Bryleva A. S.[1], Kanaev K. V.[1], Rykunova A. O.[1], Staleva S. D.[1], Khlopotova A. S.[1], Chugainova V. A.[1], Komarov I. A.[2], Ph.D
[1] Moscow Polytechnic University
38 Bolshaya Semenovskaya St., Moscow, 107023, Russia
[2] Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS
1A Akademika Semenova Ave., Chernogolovka, 142432, Russia

The influence of the composition of multicomponent graphene oxide suspensions on the wetting of flexible PET substrates and the morphology of the formed films was studied. Optimal concentrations and composition of the dispersion medium for obtaining uniform coatings were determined. The possibility of controlled thermal reduction of the obtained graphene oxide films by short-term heating in a vacuum chamber was demonstrated.
Keywords: graphene oxide; thin films; spin-coating; wettability; thermal reduction; flexible electronics.

Развитие гибкой электроники требует создания материалов, сочетающих механическую гибкость с управляемыми электрическими характеристиками. Среди них особое место занимают оксид графена (ОГ) и восстановленный оксид графена (ВОГ) [1]. ОГ — полупроводник с кислородсодержащими группами, что позволяет формировать стабильные дисперсии в воде и органических растворителях.

Это дает возможность наносить тонкие пленки простыми жидкостными методами (центрифугирование, спрей-пиролиз, струйная печать) [2]. Последующее восстановление (химическое, термическое, лазерное) удаляет функциональные группы, восстанавливает sp^2-сетку и создает электропроводность [3, 4], а варьируя степень восстановления, можно управлять шириной запрещенной зоны, что перспективно для гибких транзисторов, хеморезисторов и биосенсоров [5]. Ключевая проблема — низкая смачиваемость гидрофобных ПЭТ-подложек водными суспензиями ОГ, что ведет к дефектным покрытиям и низкой воспроизводимости [6]. Эффективный подход — модификация дисперсионной среды органическими сорастворителями, подобранными по параметру Гильдебрандта ($\delta T \approx 25{,}4$ МПа$^{1/2}$ для ОГ и ≈ 22 МПа$^{1/2}$ для ВОГ) [7, 8]. В настоящей работе разработана методика управляемого формирования равномерных крупноразмерных пленок ОГ на ПЭТ путем оптимизации состава многокомпонентных суспензий, исследована их морфология и возможность термического восстановления в вакууме. Определены оптимальный тип и концентрация органической добавки, изучено влияние концентрации ОГ на морфологию и толщину пленок.

Экспериментальная часть: исследование смачиваемости многокомпонентных суспензий

В работе использовалась водная суспензия оксида графена, синтезированная модифицированным методом Хаммерса (ООО «МИП Графен»), с исходной концентрацией 3,11 мг/мл. Для модификации дисперсионной среды применялись органические растворители, подобранные по близости к параметру Гильдебрандта к ОГ ($\delta T = 25{,}4$ МПа$^{1/2}$) или восстановленного оксида графена (22 МПа$^{1/2}$): N-метилпирролидон (н-МП), диметилацетамид (ДМА) и разбавитель для эмалевых красок (ЭР, основной компонент — этиленгликоль ($\delta T = 33$ МПа$^{1/2}$) с дополнительными компонентами) и аналогичный разбавитель с входящим в его состав замедлителем высыхания — ретардером (ЭРр). Суспензии готовились в соотношениях от 1:9 до 5:5 (концентрации ОГ 0,31–1,87 мг/мл). Краевой угол смачивания определялся методом лежащей капли на ПЭТ-подложках толщиной 125 мкм. Анализ смачиваемости показал, что добавление органических компонентов позволяет снизить краевой угол и улучшить растекание суспензии. Наилучшие технологические характеристики (время высыхания до 400 с, стабильность суспензии) были достигнуты при использовании разбавителя ЭР (рис. 1).

Формирование пленок оксида графена методом центрифугирования

Формирование пленок осуществлялось методом центрифугирования (spin-coating) на установке EZ4 (500 об/мин — 30 с, 3000 об/мин — 120 с) с последующей сушкой при 110 °C. Морфологию исследовали СЭМ, АСМ и оптической микроскопией, толщину определяли по ступеньке на границе пленка–подложка. На рис. 2 показана зависимость толщины от концентрации. По данным СЭМ и АСМ (рис. 3), при концентрациях ОГ 0,31–0,62 мг/мл формируются островковые структуры, тогда как в диапазоне 0,93–1,24 мг/мл достигается образование сплошных, равномерных пленок толщиной 40–65 нм. Дальнейшее увеличение концентрации ведет к росту шероховатости.

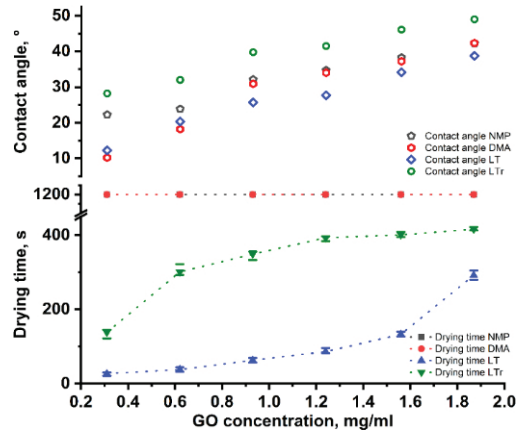


Рис. 1. Зависимость угла смачивания и времени высыхания от соотношения компонентов суспензии оксида графена

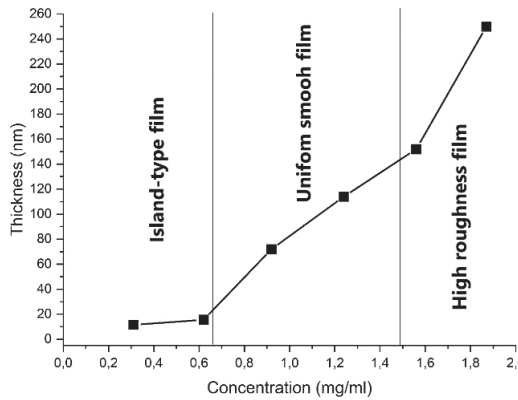
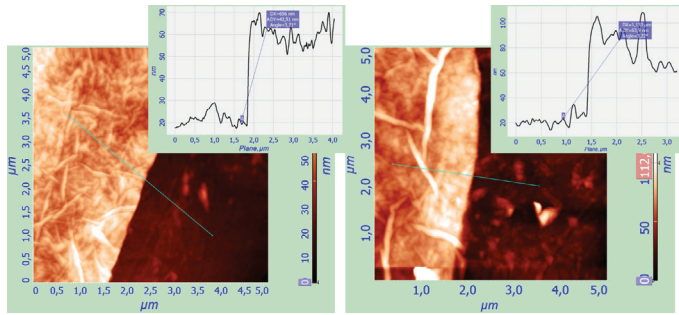


Рис. 2. Зависимость толщины пленок на поверхности ПЭТ подложки от концентрации ОГ в многокомпонентных суспензиях

Термическое восстановление пленок

Для восстановления оксида графена и придания пленкам электропроводности образцы подвергались низковакуумной термической обработке в термошкафу при температуре 200 °C в течение 30 минут. Визуально цвет менялся от светло-коричневого характерного для ОГ, до темно-коричневого и черного, что является качественным признаком протекания процесса восстановления (рис. 4).



а *б*

Рис. 3. АСМ-топография и сечение (вставки) пленок ОГ, сформированных из суспензий ОГ:ЭР 3:7 (толщина 42,51 нм) и 4:6 (толщина 63,90 нм).



Рис. 4. Термически восстановленные пленки ОГ.

Выводы

Таким образом, в работе показана возможность управления характеристиками смачивания ПЭТ подложек за счет варьирования состава суспензии путем добавления органических растворителей с параметром Гильдебрандта близким или превышающим таковой для оксида графена.

Продемонстрирована возможность формирования пленок оксида графена методом центрифугирования из многокомпонентных суспензий ОГ. Показано, что до концентрации ОГ ~0,7–0,8 мг/мл происходит формирование островковых пленок, тогда как начиная с концентрации ~1 мг/мл формируемая пленка становится сплошной. При концентрациях более 1,5 мг/мл получены пленки ОГ с существенным рельефом. Для задач электроники и сенсорной техники оптимальным следует считать пленки, сформированные из суспензий с концентрациями 1–1,5 мг/мл.

Показана возможность управляемого термического восстановления сформированных пленок в условиях низкого вакуума при температуре 200 °C.

Полученные материалы перспективны для использования в качестве активных слоев гибкой электроники и сенсоров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-23-01416, https://rscf.ru/project/25-23-01416.

Литература

1. Buga C. S., Viana J. C. A Review on Materials and Technologies for Organic Large-Area Electronics // Advanced Materials Technologies, 2021. Vol. 6. P. 2001016.
2. Kumar S., Dmitrieva V. A., Meng G. et al. Structured Graphene Oxide/Reduced Graphene Oxide Interfaces for Improved NO2 Sensing // ACS Applied Nano Materials, 2023. Vol. 6. P. 14083–14093.
3. Paredes J. I., Villar-Rodil S., Martinez-Alonso A., Tascon J. M. D. Graphene Oxide Dispersions in Organic Solvents // Langmuir, 2008. Vol. 24. P. 10560–10564.
4. Khan M., Shakoor A., Khan G., Zia S. A. A Study of Stable Graphene Oxide Dispersions in Various Solvents // Journal of the Chemical Society of Pakistan, 2015. Vol. 37. P. 62–67.
5. Bei-Bei F., Zhao-Hui W., Wen-Hua S. et al. Performance of graphene dispersion by using mixed surfactants // Materials Research Express, 2020. Vol. 7. P. 095009.
6. Konios D., Stylianakis M. M., Stratakis E., Kymakis E. Measurements of the contact angle of nanofluids and development of a new correlation // Journal of Colloid and Interface Science, 2014. № 430. P. 108–112.
7. Vafaei S., Borca-Tasciuc T., Podowski M. Z. et al. Effect of nanoparticles on sessile droplet contact angle // Nanotechnology, 2006. Vol. 17. P. 2523–2527.
8. Chinnam J., Das D., Vajjha R., Satti J. Measurements of the contact angle of nanofluids and development of a new correlation // International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015. Vol. 62. P. 1–12.

УДК 621.315.592.4

Свойства ультратонкого подзатворного диэлектрика, сформированного методом двухстадийного радикального окисления

Филалова Э. М.[1,2], Черняев М. В.[1], Горохов С. А.[1,2], к. ф.-м. н., Патюков С. И.[1], к. т. н., Резванов А. А.[1,2], к. ф.-м. н.
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
mchernyaev@niime.ru, sgorohov@niime.ru, spatyukov@niime.ru, arezvanov@niime.ru
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
filalova.em@phystech.edu

В работе исследованы свойства ультратонкого подзатворного диэлектрика, полученного методом двухстадийного радикального (ISSG, англ. *in situ* steam-generation) окисления кремния, включающего низкотемпературную (НРО) и высокотемпературную (ВРО) стадии. Показано, что предварительное формирование самоограниченного оксидного слоя на стадии НРО позволяет существенно снизить толщину подзатворного диэлектрика, улучшить его однородность по пластине и повысить воспроизводимость процесса.
Ключевые слова: ультратонкий оксид; подзатворный диэлектрик; радикальное окисление кремния; ISSG; кинетика окисления.

Properties of an ultrathin gate dielectric formed by a two-stage radical oxidation process

Filalova E. M.[1,2], Chernyaev M. V.[1], Gorokhov S. A.[1,2], Ph.D, Patyukov S. I.[1], Ph.D, Rezvanov A. A.[1,2], Ph.D
[1] Molecular Electronics Research Institute JSC
6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia
mchernyaev@niime.ru, sgorohov@niime.ru, spatyukov@niime.ru, arezvanov@niime.ru
[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia
filalova.em@phystech.edu

The properties of an ultrathin gate dielectric formed by a two-stage radical (ISSG, *in situ* steam-generation) oxidation of silicon, comprising low-temperature (LTRO) and high-temperature (HTRO) stages, were investigated. It is shown that the preliminary formation of a self-limiting oxide layer during the LTRO stage enables a significant reduction in the gate dielectric thickness, improves its within-wafer uniformity, and enhances process reproducibility.
Keywords: ultrathin oxide; gate dielectric; silicon radical oxidation; ISSG; oxidation kinetics.

Одним из важных аспектов современного развития МОП-транзисторов является формирование ультратонкого подзатворного диэлектрика с высокой однородностью и низкими токами утечки. При попытке достижения толщины оксида кремния SiO_2 ~2–3 нм проявляются эффекты квантового туннелирования и деградации электрических характеристик. С точки зрения улучшения характеристик подзатворного диэлектрика одним из перспективных подходов к его формированию является ISSG-окисление, с внедрением низкотемпературной стадии перед стандартным высокотемпературным режимом.

В работе рассмотрены различия в свойствах и морфологии ультратонких слоев оксида кремния, полученных в одностадийном и двухстадийном процессах радикального окисления, включающего низкотемпературную (НРО) и последующую высокотемпературную (ВРО) стадии. ВРО осуществляется с параметрами: температура 900 °С, соотношение потоков O_2/H_2 = 500/1, давление 12 Торр. Для двухстадийного процесса установлено давление 12 Торр и температурный профиль, представленный на рис. 1. На начальной стадии реализуется низкотемпературный этап при температуре 400–500 °С.

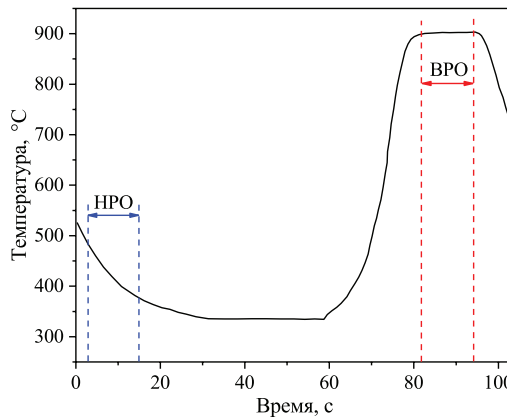


Рис. 1. Изменение температуры пластины на всех шагах двухстадийного радикального окисления

Толщину оксида измеряли непосредственно после формирования диэлектрика с использованием спектрального эллипсометра KLA-Tencor Thermwave OP-7341 XP в 23 точках каждой мониторной пластины с последующим расчетом среднего значения и неоднородности по пластине (WiW — within-wafer). Изменяемым параметром процесса являлся расход кислорода на стадии НРО. Для оценки воспроизводимости (повторяемости) процесса в каждом режиме использовали по три мониторные пластины с последующим расчетом разброса средних значений (WtW — wafer-to-wafer).

Показано, что самоограниченный слой выполняет пассивирующую функцию и переводит процесс на стадии ВРО в режим замедленного роста. Такой подход обеспечивает уменьшение толщины оксида на 4–11 Å, снижение неоднородности

по пластине в 3–5 раз и повышение воспроизводимости процесса примерно на 30 % по сравнению со стандартным режимом. В табл. 1 приведены экспериментальные данные по толщине подзатворного оксида, сформированного при использовании стандартного высокотемпературного режима ISSG (ВРО, ВКМ) и предложенного двухстадийного процесса радикального окисления.

Таблица 1. Толщины тонкого подзатворного оксида кремния, сформированного при различных режимах РО

№	Способ окисления	Расход O_2 на шаге НРО, л/мин	Средняя толщина, Å	WiW, Å	WtW, Å
1	ВРО (ВКМ)	-	21,28	1,48	0,35
2	НРО+ВРО	3	10,28	0,33	0,21
3	НРО+ВРО	5	10,40	0,44	0,25
4	НРО+ВРО	6,5	11,20	0,35	0,22
5	НРО+ВРО	8	13,84	0,45	0,27
6	НРО+ВРО	10	15,62	0,49	0,20
7	НРО+ВРО	11	17,03	0,54	0,24

Для полученных образцов были проведены исследования на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL, JSM-700F. Исследованы РЭМ-снимки с поверхностей и сколов пластин 200 мм с тонким слоем диэлектрика, полученных методами: ВРО, НРО+ВРО, естественным окислом. Подтверждено, что на стадии НРО формируется тонкий самоограниченный слой оксида, с наименьшим числом дефектов и примесей в составе структуры. Также в этом случае наблюдается четкая граница раздела фаз, в отличие от диэлектрических слоев, полученных с помощью только ВРО, и тем более естественным окислением, где происходит обеднение области поликремния у границы раздела поликремний/SiO_2, что увеличивает электрическую толщину окисла и нарушает стабильность работы прибора.

Таким образом, ультратонкий подзатворный диэлектрик, формируемый двухстадийным радикальным окислением, имеет более качественные характеристики, а технология может быть эффективно использована в технологиях СБИС.

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов. В 2-х частях. Часть 1. — М.: Техносфера, 2002. — С. 416.
2. Pan T. M. Electrical characterization of 13 Å in situ steam-generated oxynitride gate dielectrics // Electrochemical and solid-state letters, 2005. Vol. 9. № 2. P. G66.
3. Xu Y., Huang Y. Influence of ISSG tunnel oxide with decoupled plasma nitridation on erase characteristic of NOR-type floating-gate flash memories // Microelectronics Reliability, 2015. Vol. 55. № 7. P. 1126–1129.
4. Seshan K., Schepis D. (ed.). Handbook of thin film deposition. –William Andrew, 2018.

5. Storbeck O., Pethe W., Hayn R. A Growth Kinetics Model for the Radical Oxidation of Silicon // Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2008. Vol. 573. P. 147–152.
6. Черняев М. В., Горохов С. А., Патюков С. И., Резванов А. А. Кинетика радикального окисления кремния // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 3 (187). — С. 31–44.
7. Черняев М. В., Горохов С. А., Патюков С. И., Резванов А. А. Низкотемпературное радикальное ISSG окисление кремния // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2023. — № 2 (190). — С. 62–68.

УДК 54.057:547.5

Технологии микротоннажного производства компонентов DUV-фоторезистов на базе ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Муминов Р. Ш., Смирнов А. С., Заправдина Д. М., Заморецков Д. С., Сидельцев М. Е., Иваненко Д. А., Скорлуханова А. В., Терещенко М. Д., Кузнецов И. Е., Аккуратов А. В.
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (ФИЦ ПХФ и МХ РАН)
142432, г. Черноголовка, пр-т Академика Семенова, 1
akkuratow@yandex.ru

В работе обобщены успехи лаборатории фоточувствительных и электроактивных материалов ФИЦ ПХФ и МХ РАН в разработке востребованных материалов для изготовления фоторезистов, применяемых в фотолитографии (193 и 248 нм). Обозначены перспективы создания производственных участков, способных обеспечить выпуск продукции, покрывающей спрос основных российских потребителей. Разрабатываемые технологические решения обеспечивают получение целевых продуктов с высокой чистотой и воспроизводимостью и применимы для организации малотоннажного производства.
Ключевые слова: DUV-литография; фоторезисты; фотогенераторы кислот; мономеры; масштабируемый синтез; реакторный синтез; импортозамещение.

Technologies for small-scale production of DUV photoresist components at FRC PCPMC RAS

Muminov R. Sh., Smirnov A. S., Zapravdina D. M., Zamoretskov D. S., Sidel M. E.'tsev, Ivanenko D. A., Skorlukhanova A. V., Tereshchenko M. D., Kuznetsov I. E., Akkuratov A. V.
Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry, Russian Academy of Sciences (FRC PCPMC RAS)
1 Akademika Semenova Ave., Chernogolovka, 142432, Russia

This work summarizes the achievements of the Laboratory of Photosensitive and Electroactive Materials at the Federal Research Center for Chemical Physics and Medical Chemistry of the Russian Academy of Sciences in developing advanced materials for the fabrication of photoresists used in photolithography at 193 and 248 nm. It outlines the prospects for establishing production sites capable of supplying products that meet the demand of major Russian customers. The technological solutions under development ensure the manufacture of target products with high purity and reproducibility and are suitable for organizing small-scale (low-tonnage) production.
Keywords: DUV lithography; photoresists; acid photogenerators; monomers; scalable synthesis; reactor synthesis; import substitution.

Производство отечественной микроэлектроники требует создания собственной базы литографических материалов. Фоторезисты, применяемые в DUV-литографии, содержат полимерную основу, фотогенератор кислоты (ФГК) и ряд вспомогательных компонентов. Настоящая работа посвящена разработке в ФИЦ ПХФ и МХ РАН (г. Черноголовка) технологий масштабируемого синтеза ключевых

компонентов DUV-фоторезистов: ФГК на основе сульфониевых и йодониевых солей, производного норборнена, а также мономеров для полимеров на основе алициклических, лактонсодержащих эфиров метакриловой кислоты.

На первом этапе были опробованы и оптимизированы методы получения целевых соединений в небольших количествах. Затем аналогичная работа по упрощению процессов была проведена в пилотных реакторах с увеличенными загрузками реагентов. Для сульфониевых и йодониевых ФГК, а также 1,3-диоксогексагидро-2H-4,7-метаноизоиндол-2-ил трифторметансульфоната (эндо-изомер) разработаны методы, учитывающие специфику тепловых эффектов реакций, стабильность промежуточных соединений и требования по безопасности. Полученные продукты отвечают требованиям, предъявляемым к ФГК индустриальными партнерами: содержание основного вещества >98 %, хорошая растворимость в полярных растворителях, совместимость с полимерной основой и квантовый выход генерации кислоты более 20 %. В области синтеза функциональных мономеров разработан метод получения 1-этилциклопентилметакрилата, включающий две стадии: получение 1-этилциклопентанола с применением этилмагнийбромида и его последующее О-ацилирование хлорангидридом метакриловой кислоты. Предложена технологическая схема, позволяющая получать мономер с производительностью порядка ста килограммов в год. Для синтеза 5-метакрилоилокси-2,6-норборнанокарболактона разработан маршрут на основе реакции Дильса — Альдера между циклопентадиеном и акриловой кислотой при пониженных температурах с последующими стадиями окисления, превращения функциональных групп и ацилирования. Очистка промежуточных продуктов осуществляется методами перекристаллизации и вакуумной перегонки. Целевой мономер получен с выходом 40–50 % и чистотой 99 % после рекристаллизации. Экспериментальные образцы девяти материалов переданы Заказчикам в АО «НИИМЭ» и ООО «Поликетон» для оценки качества и применимости материалов для изготовления фоторезистов с химическим усилением.

В настоящее время в ФИЦ ПХФ и МХ РАН создаются участки с пилотными реакторными линиями по выпуску литографических материалов. Разработанные методы рассматриваются как основа для запуска производства ФГК и мономеров с общей производительностью от десятков до ста килограммов в год, что является важным шагом на пути к импортозамещению в электронной промышленности.

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ № 25-91-28001, № 25-91-28002, № 25-93-28005, а также Министерства науки и высшего образования (1250326044426-5 (FFSG-2025-0003)).

УДК 621.3.049.77

Учет неоднородности электрического поля в приборно-технологическом моделировании структур с заглубленными шинами питания для КМОП-технологии

Лосев В. В., д. т. н., Крупкина Т. Ю., д. т. н., Рыжова Д. И., к. т. н., Родионов Д. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Институт интегральной электроники
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
darrrlight@gmail.com

Проведен анализ, технологическое и приборное электрофизическое моделирование структур заглубленных шин питания в среде Synopsys Sentaurus TCAD. Получены распределения электрических полей для этих структур. Предложены варианты решения проблемы высокой напряженности электрического поля в области заглубленных шин питания.
Ключевые слова: заглубленные шины питания; напряженность электрического поля; узкощелевая изоляция; приборно-технологическое моделирование.

Electric field non-uniformity in process and technological simulation of buried power rails for CMOS technology

Losev V. V., Sc.D, Krupkina T. Yu., Sc.D, Ryzhova D. I., Ph.D, Rodionov D. V.
National Research University of Electronic Technology (MIET), Institute of Integrated Electronics
1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
darrrlight@gmail.com

We conducted analysis, process and technological electrophysical simulation of buried power rails in the Synopsys Sentaurus TCAD. Electric field distributions for these structures were obtained. Solutions to the problem of high electric field strength associated with buried power rails were proposed.
Keywords: buried power rails (BPR); electric field strength; shallow trench isolation (STI); process and technological simulation.

В данной работе проведено исследование кремниевых полупроводниковых структур и сформированных металлических линий межсоединений в нескольких вариантах. Моделирование полупроводниковых приборов проведено в рамках базового КМОП-технологического маршрута в среде Synopsys Sentaurus Process. Для формирования многоуровневой металлизации [1] и структур заглубленных шин питания (BPR) [2] было проведено технологическое моделирование. Согласно технологии, шины питания и земли были полностью отделены от всей остальной металлизации, находящейся над поверхностью пластины. Ожидаемые проблемы неравномерного распределения напряженности электрического поля и усугубление краевых эффектов в области сформированных структур была подтверждена результатами приборного моделирования полученных структур с помощью среды Synopsys Sentaurus Device.

Анализ полученных результатов приборного моделирования показывает, что такие технологические решения, как узкощелевая изоляция (STI) и замена острых углов на радиусные переходы, являются одними из наиболее эффективных и технологически отлаженных методов решения проблемы неоднородности электрического поля в структурах BPR. Дальнейшее направление работ связано с количественной оценкой снижения напряженности поля при оптимизации геометрии BPR, подбором оптимальных геометрических параметров BPR для разных технологических норм и оценкой долгосрочной надежности структур BPR с оптимизированной геометрией.

Исследование выполнено специалистами Института ИнЭл НИУ МИЭТ и молодежной лаборатории «Перспективные САПР СБИС» НИУ МИЭТ в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, шифр 460 ГЗ-НИЛ ПСС (FSMR-2024-0009), соглашение № 075-03-2026-239/1 от 01.04.2026 г.

Литература

1. Reliability study on cobalt and ruthenium as alternative metals for advanced interconnects / Pedreira O.V., Croes K., Lesniewska A., Wu C., Veen M. et al. // IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), 2017. P. 6B-2.1-6B-2.8. DOI: 10.1109/IRPS.2017.7936340.
2. Buried Power Rail Integration with FinFETs for Ultimate CMOS Scaling / A. Gupta, G. Arutchelvan, H. Zahedmanesh, K. Devriendt et al. // IEEE Transaction on Electron Devices, 2020. Vol. 67. № 12. P. 5349–5354. DOI: 10.1109/TED.2020.3033510.

УДК 621.315.592

Роль тонких GaN, SiN покрытий гетероструктуры AlN/GaN в формировании двумерного электронного газа

Ляпустин И. Н.[1,2], Майдэбура Я. Е.[2], к. ф.-м. н., Малин Т. В.[2], к. т. н., Мансуров В. Г.[2], к. ф.-м. н., Голяшов В. А.[2], к. ф.-м. н., Милахин Д. С.[2], к. ф.-м. н.

[1] Новосибирский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[2] Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 13

Методами Холла, ДРЛ, АСМ и РФЭС изучено влияние *in situ* покрытий SiN_x и GaN на формирование двумерного электронного газа в ГЭС AlN/GaN, синтезированных в аммиачной МЛЭ. Показана разница в форме окисления слоя AlN и высокая эффективность покрытия SiN_x для предотвращения деградации параметров ГЭС.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия; нитридные гетероэпитаксиальные структуры; двумерный электронный газ.

The role of thin GaN and SiN capping layers in two-dimensional electron gas formation in AlN/GaN heterostructures

Liapustin I. N.[1,2], Maidebura Y. E.[2], Ph.D, Malin T. V.[2], Ph.D, Mansurov V. G.[2], Ph.D, Golyashov V. A.[2], Ph.D, Milakhin D. S.[2], Ph.D

[1] Novosibirsk State University
Novosibirsk, 630090, Russia
[2] Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, 630090, Russia

The effects of *in situ* SiN_x and GaN capping layers on the formation of a two-dimensional electron gas in AlN/GaN heterostructures grown by ammonia molecular beam epitaxy were investigated using Hall-effect measurements, XRD, AFM, and XPS. Differences in the oxidation behavior of the AlN layer were revealed, along with high effectiveness of SiN_x capping in preventing degradation of the heterostructure properties.

Keywords: molecular beam epitaxy; nitride heteroepitaxial structures; two-dimensional electron gas.

Транзисторы на основе GaN нашли широкое применение в силовой и СВЧ-электронике. Это обусловлено формированием двумерного электронного газа (ДЭГ) на границе гетероперехода Al(Ga)N/GaN. Данный проводящий канал характеризуется высокой подвижностью электронов (вплоть до 2000 $см^2/В{\cdot}с$) и значительной концентрацией (~10^{13} $см^{-2}$), и в совокупности с широкой запрещенной зоной нитридов третьей группы, позволяющей существенно увеличить рабочие напряжения, обеспечивает устройствам повышенную выходную мощность на высоких частотах.

Перспективными являются гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) AlN/GaN с тонким (1–5 нм) бинарным барьерным слоем AlN [1]. За счет минимального расстояния между затвором и проводящим каналом такая структура позволяет эффективнее управлять ДЭГ. Также она способна обеспечить более высокую концентрацию носителей заряда (до $5 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$) по сравнению с классическими структурами AlGaN/GaN.

Одной из главных проблем подобных гетероэпитаксиальных структур с тонким слоем AlN является окисление барьера при контакте с атмосферой, что ведет к деградации параметров ДЭГ. В рамках представленной работы исследовались способы защиты барьерного слоя AlN от окислительных процессов. Для пассивации применялись *in situ* покрытия SiN_x и GaN, выращенные методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии (NH3-МЛЭ). Все тестируемые ГЭС AlN/GaN изготавливались при одинаковых ростовых условиях и отличались только типом покрывающего слоя.

Измерения концентрации и подвижности носителей в ДЭГ проводились с использованием эффекта Холла в геометрии Ван дер Пау. Были выявлены существенные различия в электрофизических свойствах двумерного канала. Наилучшие характеристики продемонстрировали гетероструктуры с защитным покрытием SiNx (концентрация составила $1{,}4 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ при подвижности 1250 см^2/В·с).

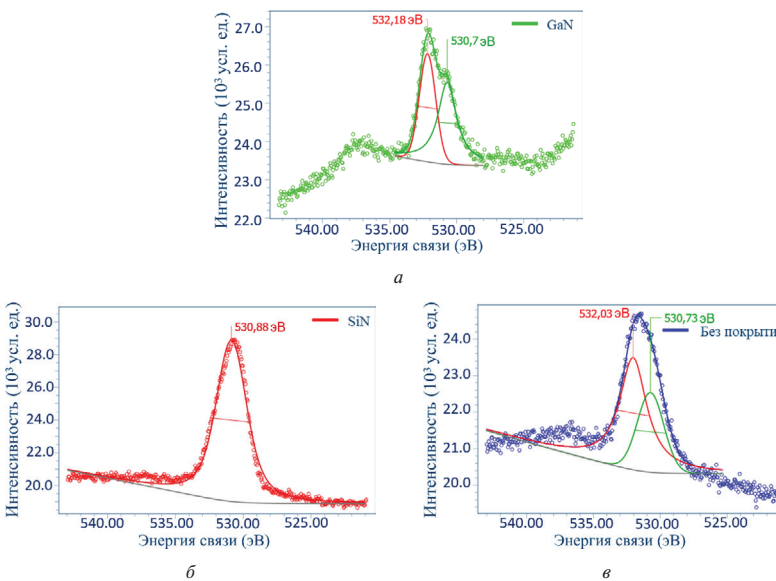


Рис. 1. РФЭС спектры пиков O 1s для образцов с различным типом покрытия

Для выяснения причин полученных результатов, ГЭС со слоями SiN, GaN и без них были исследованы методами ДБЭО, ДРЛ, АСМ, РФЭС, УФЭС. Проведенная характеризация ГЭС демонстрирует одинаково высокое кристаллическое качество

эпитаксиальных слоев и сопоставимую морфологию поверхностей. Химическое состояние поверхностей и барьера AlN изучалось методами РФЭС и УФЭС. На полученных спектрах обнаружены отличия форм окисления барьерного слоя AlN образцов с покрытием SiN_x (низко-координированный Al-O) от образцов с GaN и без покрытия (высоко-координированный, связь типа Al-O-Al). Предложено объяснение связи изменения параметров ДЭГ с химическим состоянием поверхности и барьерного слоя AlN.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания FWGW-2025-0025 «Наногетероэпитаксиальные структуры на основе нитрида галлия для твердотельной микроволновой и силовой электроники».

Литература

1. Li H. et al. High performance AlN/GaN HEMT for millimeter-wave low-voltage applications fabricated using low-damage etching // IEEE Electron Device Letters, 2024. Vol. 45. № 12. P. 2327–2330.

УДК 537.226.4; 621.382; 54.05; 539.2

Разработка технологических основ формирования и модификации сегнетоэлектрических полимерных пленок на основе ПВДФ для микроэлектронных применений

Макеев М. О., Осипков А. С., Бурьянская Е. Л., Кондрашов С. В., Киркин В. С., Рыженко Д. С.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1
m.makeev@bmstu.ru

Разработана технология получения сегнетоэлектрических полимерных материалов на основе поливинилиденфторида и его сополимеров из отечественного сырья. Исследован процесс поляризации пленок в плазме тлеющего разряда и экспериментально подтверждена его эффективность для методом пленок, полученных из отечественного сырья. На основе сегнетоэлектрической пленки поливинилиденфторида разработано устройство для снятия сейсмокардиограммы человека.
Ключевые слова: сегнетоэлектрики; новые материалы; гибкая электроника; сенсоры; актуаторы; полимеры.

Development of Technological Foundations for the Formation and Modification of Ferroelectric Polymer Films Based on PVDF for Microelectronic Applications

Makeev M. O., Osipkov A. S., Buryanskaya E. L., Kondrashov S. V., Kirkin V. S., Ryzhenko D. S.
Moscow State Technical University
105005 Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya St., 5, Bldg. 1
m.makeev@bmstu.ru

A technology for the fabrication of ferroelectric polymer materials based on polyvinylidene fluoride (PVDF) and its copolymers from domestically sourced raw materials has been developed. The polarization process of films in a glow discharge plasma has been investigated, and its effectiveness for films produced from domestic raw materials has been experimentally confirmed. A device for recording human seismocardiograms has been developed based on ferroelectric PVDF films.
Keywords: ferroelectrics; new materials; flexible electronics; sensors; actuators; polymers.

Развитие сенсорных и актуаторных систем нового поколения является одним из ключевых направлений современной науки и техники, определяющим прогресс в таких областях, как медицинская диагностика, биомедицинская инженерия, микро- и наноэлектроника, робототехника и системы неразрушающего контроля. Особое значение приобретает создание функциональных материалов, способных эффективно преобразовывать механические, акустические и тепловые воздействия в электрический сигнал и обратно, при одновременном обеспечении гибкости, миниатюрности и технологичности [1, 2].

Сегнетоэлектрические полимерные материалы на основе поливинилиденфторида (ПВДФ) и его сополимеров занимают особое место среди таких материалов благодаря сочетанию пьезоэлектрических и пироэлектрических свойств с высокой механической гибкостью, химической стойкостью и биосовместимостью [3, 4]. Эти свойства определяют их широкое применение в акустических сенсорах, гибкой электронике, биомедицинских устройствах и микроэлектромеханических системах [5–7].

Проведены работы по разработке методик очистки сополимера Ф-2М, а также показана возможность и разработана методика обработки промышленно выпускаемых пленок из материала Ф-2М с целью придания им пьезоактивных свойств. Исследована кинетика поляризации пленок сополимера ВДФ/ТФЭ, рассмотрено влияние условий контактной поляризации на доменной структуру и пьезоэлектрический отклик пленок.

Исследован процесс поляризации сегнетоэлектрических пленок с использованием плазмы тлеющего разряда. Показана эффективность поляризации данным методом пленок, полученных из отечественного сырья.

Разработан электропроводящий клей на основе одностенных углеродных нанотрубок и полимера Ф-42, обладающий повышенной адгезией к пленкам ПВДФ; показана возможность контактной поляризации пленок сополимеров ВДФ с электродами из клеевых составов, с достижением высоких значений d_{33} (17–20 пКл/Н). Проведено исследование влияния материала электрода с различными упругими свойствами на высоковольтный поляризационный отклик сегнетоэлектрического сополимера винилиденфторида с тетрафторэтиленом при деформациях изгиба или кручения, раскрывающее механизмы пьезоэффекта при деформациях такого типа.

На основе сегнетоэлектрической пленки поливинилиденфторида разработано устройство для снятия сейсмокардиограммы человека. Технология перспективна для внедрения в системы телемедицинского мониторинга, поскольку позволяет получать информацию о механической работе сердца, дополняющую данные стандартной ЭКГ. Это открывает возможности для более точной диагностики пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Для внедрения технологии необходимы дальнейшие исследования: клиническая валидация, оптимизация алгоритмов обработки сигнала и миниатюризация устройства для создания полностью автономного носимого датчика. Разработка отвечает глобальному запросу на создание доступных и удобных систем кардиомониторинга в условиях роста сердечно-сосудистой патологии.

Литература

1. Lang S. B., Muensit S. Review of some lesser-known applications of piezoelectric and pyroelectric polymers // Applied Physics A, 2006. Vol. 85. P. 125–134.
2. Lovinger A. J. Ferroelectric polymers // Science, 1983. Vol. 220. P. 1115–1121.
3. Martins P., Lopes A. C., Lanceros-Mendez S. Electroactive phases of poly(vinylidene fluoride): Determination, processing and applications // Progress in Polymer Science, 2014. Vol. 39. P. 683–706.
4. Furukawa T. Ferroelectric properties of vinylidene fluoride copolymers // Phase Transitions, 1989. Vol. 18. P. 143–211.
5. Wang Z. L., Song J. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays // Science, 2006. Vol. 312. P. 242–246.

6. Persano L., Dagdeviren C., Su Y. et al. High performance piezoelectric devices based on aligned arrays of nanofibers of poly(vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene) // Nature Communications, 2013. Vol. 4. P. 1633.
7. Yaqoob U., Uddin A. I., Chung G. S. A review of PVDF-based piezoelectric nanogenerators for energy harvesting applications // Sensors, 2020. Vol. 20. P. 396.

УДК 538.911

Синтез, характеризация и свойства муаровых гетероструктур на основе графена

Борисенко Д. П., к. т. н., Катин К. П., д. ф.-м. н.
Лаборатория 2D наноматериалов в электронике, спинтронике и фотонике, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
KPKatin@yandex.ru

Муаровые структуры получаются из графена или других 2D материалов и состоят из нескольких слоев, повернутых друг относительно друга. Угол поворота позволяет контролировать электронные свойства структуры. При некоторых углах наблюдаются фазовые переходы, связанные с возникновением нетривиальной топологии электронных зон. Мы описываем процесс синтеза и переноса графена, а также методику определения угла разворота между слоями на основе Рамановских спектров. Также обсуждается влияние перпендикулярного электрического поля на топологию зон.
Ключевые слова: графен; муаровая структура; топология зон; ширина запрещенной зоны.

Synthesis, Characterization, and Properties of Graphene-Based Moiré Heterostructures

Borisenko D. P., Ph.D, Katin K. P., Sc.D
Laboratory of 2D Nanomaterials in Electronics, Photonics and Spintronics, National Research Nuclear University "MEPhI"
31 Kashirskoe Hwy., Moscow, 115409, Russia

Moiré structures are derived from graphene or other two-dimensional materials and consist of multiple layers rotated relative to each other. The twist angle provides a means to control the electronic properties of the structure. At specific angles, phase transitions arising from nontrivial band topology are observed. We describe the synthesis and transfer of graphene, along with a Raman spectroscopy-based method for determining the interlayer twist angle. The influence of a perpendicular electric field on the band topology is also discussed.
Keywords: graphene; moiré structures; twisted graphene; band topology; band gap.

Методом химического газофазного осаждения на медном катализаторе были получены образцы графена с различным количеством слоев и взаимным разворотом на малые и большие углы. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света выявлены характерные особенности полученных графеновых структур. Положение и форма основных пиков изменялись в зависимости от увеличения количества слоев и их разворота, что свидетельствует об изменение характера взаимодействия между слоями. Изучены дополнительные пики в зависимости от величины угла разворота слоев графена. Определены отличительные особенности исследованных развернутых структур, которые позволят оптимизировать синтез и производство устройств на основе графена [1].

Получены образцы муаровых графеновых структур с числом слоев от 2 до 10 с разными углами разворота. Спектроскопия комбинационного рассеяния света, как неразрушающий и высокочувствительный метод, играет ключевую роль в исследовании таких систем. Ее применение позволяет не только идентифицировать угол разворота, но и выявлять коррелированные состояния, дефекты и фазовые переходы. Анализ КРС-спектров позволяет изучить особенности разных участков графеновых структур с учетом количества слоев и углов между ними. Выявлены различия между однослойным монокристаллом графена и сплошной пленкой с наличием многослойных участков.

В случае наличия AB типа укладки слоев наблюдается уменьшение отношения интенсивностей I_{2D}/I_G со значительным увеличением FWHM 2D-моды. Были изучены участки малослойного графена со средними (11–20°) и большими (25–29°) углами разворота. Характерной особенностью средних углов разворота при ~12° является наличие R-пика при ~1487 $см^{-1}$ и значительное уменьшение отношения интенсивностей I_{2D}/I_G до ~0,08. При наличии нескольких пар слоев с большими углами разворота >25° наблюдается увеличение отношения интенсивностей I_{2D}/I_G до ~4,3. С ростом количества слоев при наличии нескольких углов разворота между слоями на КРС-спектрах наблюдается одновременно несколько R-пиков, относящихся к разным углам разворота и вносящих вклад в общий спектр. Появление дополнительных пиков при ~871 $см^{-1}$ и в диапазоне 2880–3000 $см^{-1}$ наблюдалось только при увеличении числа слоев до 6 и более. Появление данных пиков свидетельствует о возникновении новых детектируемых мод в развернутых графеновых структурах, связанных именно с ростом количества слоев и наличием сразу нескольких углов разворота. Увеличение количества слоев помогает изолировать внутренние слои, сохраняя уникальные электрофизические и оптические свойства графена без использования дополнительных защитных покрытий.

Определены зонные структуры, кривизна Берри и топологические числа Черна для электронных зон двухслойных и трехслойных муаровых систем на основе графена и двумерного нитрида бора. Проведенное исследование электронных и топологических свойств муаровых гетероструктур графен-нитрид бора с различными углами скручивания продемонстрировало разнообразие зонных структур, возникающих в результате взаимодействия между слоями. Систематический анализ, основанный на приближении сильной связи с параметрами, извлеченными из расчетов методом теории функционала плотности, позволил детально проследить эволюцию зонной структуры и топологических характеристик системы при изменении угла скручивания от нуля до четырех градусов. Доказана нетривиальная топология зон и топологический фазовый переход при угле разворота слоев около 0,9 градуса [2].

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWU-2024-0014. Эта работа была выполнена с применением научного оборудования Центра коллективного пользования НИЯУ МИФИ «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников» (https://ckp-nano.mephi.ru).

Литература

1. Рамановская спектроскопия графеновых структур с разным углом разворота / Д. П. Борисенко, Н. И. Каргин, М. Г. Рыбин // Журнал прикладной спектроскопии, 2025. — Т. 92. — С. 762–769.
2. Topological phase transitions in Graphene-hBN Moiré heterostructure with twist angles / S. Renu, K. P. Katin, R. Kumar // Appl. Surf. Sci., 2026. Vol. 719. P. 164994.

УДК 536.37

Надежность и устойчивость образовательной платформы: интеграция оффлайн-архитектуры, защиты данных и масштабируемость

Савченко В. А., Серяков С. С.
АНОО ВО «НТУ «Сириус»
354340, Краснодарский край, Федеральная территория Сириус, Олимпийский пр-т, 1
seryakoff@internet.ru, klepa300@ya.ru

Разработана архитектура образовательной платформы, обеспечивающая надежность через гибридный оффлайн-режим и защиту ПДн по ФЗ-152. Реализована очередь операций с гарантированной доставкой для непрерывности коррекционного процесса при нестабильной инфраструктуре. Модульная интеграция компонентов обеспечивает масштабируемость без изменения ядра системы. Подтверждена экономия 160 ч/мес и соответствие требованиям устойчивости КИИ.
Ключевые слова: критическая информационная инфраструктура; отказоустойчивость; оффлайн-архитектура; защита персональных данных; масштабируемость; гибридная синхронизация; образовательная платформа; ФЗ-152; ФЗ-187; Flutter.

Savchenko V. A., Seryakov S. S.
Sirius NTU
1 Olympic Ave., Sirius Federal Territory, Krasnodar Territory, NGO 354340, Russia
seryakoff@internet.ru, klepa300@ya.ru

The architecture of the educational platform has been developed to ensure reliability through a hybrid offline mode and personal data protection in accordance with FZ-152. A queue of operations with guaranteed delivery has been implemented for the continuity of the correction process with unstable infrastructure. Modular component integration ensures scalability without changing the core of the system. Savings of 160 hours/month and compliance with the requirements of corrosion resistance have been confirmed.
Keywords: critical information infrastructure; fault tolerance; offline architecture; personal data protection; scalability; hybrid synchronization; educational platform; FZ-152; FZ-187; Flutter.

Современная система коррекционной педагогики в Российской Федерации функционирует в условиях двойного вызова: критического кадрового дефицита и ограничений цифровой инфраструктуры. По данным мониторинга образовательных организаций, нагрузка на одного педагога-дефектолога достигает 86 воспитанников при нормативе 6–12 человек, что приводит к выгоранию специалистов и снижению качества помощи [1]. Одновременно с этим до 40 % сельских школ сталкиваются с нестабильным интернет-соединением или его полным отсутствием, а геополитические риски создают угрозу отключения внешних сервисов [2]. В соответствии со ст. 2 Федерального закона № 187-ФЗ образование относится

к сфере критической информационной инфраструктуры (КИИ), следовательно, отказ цифрового сервиса равносилен нарушению права ребенка на образование [3].

Существующие рыночные решения («Мерсибо», Articulation Station) либо требуют постоянного онлайн-доступа, либо не соответствуют требованиям ФЗ-152 по защите персональных данных несовершеннолетних, либо являются фрагментированными инструментами без единой экосистемы [4]. Целью данной работы стало проектирование и реализация архитектуры образовательной платформы, интегрирующей требования надежности, безопасности и масштабируемости в едином решении. Научная новизна заключается в адаптации принципов обеспечения устойчивости КИИ к специфике коррекционной педагогики через гибридную оффлайн-архитектуру, эшелонированную защиту данных на уровне клиента и модульную интеграцию компонентов. Практическая значимость подтверждена Актом о внедрении в Центре логопедии и дефектологии Департамента образования г. Москвы и экономией ~160 ч/мес на группу из 20 детей.

Интеграция оффлайн-архитектуры

Обеспечение непрерывности коррекционного процесса в условиях нестабильной инфраструктуры реализовано через гибридную модель функционирования на базе Clean Architecture и паттерна BLoC. Ключевым архитектурным решением стало строгое разделение функций на оффлайн-доступные и требующие защищенного онлайн-соединения. Клиентская часть использует локальное NoSQL-хранилище Hive исключительно для кэширования публичных метаданных (возраст, диагноз, конфигурация аватара, список игр), что позволяет педагогу работать без ограничений интерфейса при полном отсутствии сети. Чувствительные персональные данные (ФИО родителей, медицинские заключения) физически исключены из локального контура хранения и доступны только через HTTPS-канал, что предотвращает утечки даже при компрометации устройства.

Механизм синхронизации построен на основе очереди операций (Sync Queue) с гарантированной доставкой. Любое изменение состояния системы (создание карточки, назначение ДЗ, фиксация результата игры) сериализуется в JSON-объект и транзакционно записывается в локальную очередь до применения изменений в UI. Это гарантирует целостность данных: ни одно действие пользователя не будет потеряно даже при аварийном отключении питания устройства. Фоновый процесс синхронизации активируется при восстановлении сетевого соединения и последовательно отправляет накопленные операции на сервер. Для предотвращения перегрузки канала при кратковременных сбоях реализован механизм экспоненциальной задержки (exponential backoff) с джиттером: интервал между повторными попытками увеличивается по формуле:

$$T_n = T_{base} * 2^{n-1} * \text{random}(0.8; 1.2),$$

где n — номер попытки (максимум 3).

В текущей версии платформы конфликты данных невозможны благодаря однопользовательской модели работы (single-user), однако архитектура очереди спроектирована с запасом масштабируемости. Структура объектов SyncOperation включает уникальные идентификаторы и временные метки, что позволяет в будущем внедрить алгоритмы бесконфликтной репликации данных (CRDT) для поддержки мультипользовательского режима без рефакторинга ядра системы. Таким

образом, надежность платформы обеспечена не резервированием серверов, а автономностью клиентского компонента КИИ, гарантирующего доступность услуги на конечном устройстве независимо от качества внешней инфраструктуры.

Защита данных

Безопасность персональных данных в разработанной платформе реализована как распределенная функция, охватывающая архитектурные, процессные и технологические уровни. В соответствии с требованиями ФЗ-152 и профилем «Разработка и управление КИИ», защита заложена на этапе проектирования (Security by Design), а не добавлена как надстройка. На уровне клиентской архитектуры применен принцип минимизации: локальное хранилище содержит исключительно данные, необходимые для функционирования интерфейса в оффлайн-режиме. Классификация данных строго разделена: публичные метаданные кэшируются в Hive, приватные ПДн хранятся централизованно на сервере и никогда не выгружаются на устройство. Все сетевые вызовы инкапсулированы в репозиториях и выполняются строго по защищенному каналу с проверкой JWT-токена, что исключает возможность перехвата или подмены данных.

Управление безопасностью включает процессные меры: проектирование архитектуры с учетом требований ФЗ-152 проводилось до написания кода, а Code Review велся с двойным фокусом — на защиту ПДн и отказоустойчивость. Явное согласие на обработку персональных данных (ст. 9 ФЗ-152) является блокирующим условием входа в систему; без подтверждения регистрация и использование сервиса невозможны. Технологическая независимость обеспечена использованием открытого стека (Flutter, Linux Foundation), что гарантирует прозрачность кода для аудита и исключает зависимость от проприетарных платформ. Модуль защиты ПДн на стороне сервера (реализованный отдельным участником команды) обеспечивает шифрование и анонимизацию чувствительных данных, при этом клиентская часть спроектирована так, чтобы не нарушать контур безопасности даже при автономной работе. Такая эшелонированная защита обеспечивает соответствие платформы требованиям КИИ и снижает риски утечки данных до приемлемого уровня.

Масштабируемость

Масштабируемость платформы обеспечена через модульную архитектуру и строгое разделение ответственности между компонентами. Интеграция игрового движка реализована через реестр GameRegistry и декларативный маршрутизатор go_router, что позволяет подключать новые игровые пакеты как независимые Flutter-модули без внесения изменений в основное ядро приложения. Для добавления новой игры достаточно зарегистрировать ее фабрику в GameWidgetFactory и указать маршрут; внутренняя реализация движка остается «черным ящиком» для клиентской части. Такой подход обеспечивает логическую независимость компонентов и контролируемую функциональную связь на уровне сценариев (запуск → результат → прогресс), упрощая сопровождение и расширение системы.

Управление распределенной разработкой осуществлялось на основе API-first подхода. Взаимодействие между клиентской частью, сервером и модулем защиты ПДн было организовано через заранее согласованные контракты (OpenAPI/Swagger), зафиксированные до начала кодирования. Это позволило вести параллельную разработку всех трех компонентов без блокировок: фронтенд тестировался на mock-серверах, а интеграция проводилась только после готовности

спецификаций. Единый стандарт качества поддерживался через монорепозиторий, модель ветвления Git Flow и обязательный Code Review с фокусом на безопасность и отказоустойчивость. Экономическая устойчивость платформы заложена архитектурно: поддержка модели подписки (300 руб./мес или 3000 руб./год) реализована через флаги доступа к контенту, что подтверждено анализом рынка и готовностью API-контрактов к интеграции платежного шлюза на этапе внедрения.

Выводы

В ходе выполнения работы спроектирована и реализована архитектура образовательной платформы КИИ, интегрирующая требования надежности, безопасности и масштабируемости в едином решении. Гибридная оффлайн-архитектура на базе Clean Architecture и BLoC обеспечивает непрерывность коррекционного процесса при полном отсутствии интернета, соответствуя требованиям ФЗ-187 к устойчивости критической информационной инфраструктуры. Механизм очереди операций с транзакционной записью и экспоненциальной задержкой гарантирует целостность данных и предотвращает потери при аварийных отключениях.

Безопасность персональных данных обеспечена на уровне архитектуры: чувствительные ПДн физически исключены из локального кэша, все сетевые вызовы инкапсулированы в репозиториях и выполняются по защищенному каналу, а использование открытого стека (Flutter, Linux Foundation) обеспечивает прозрачность кода для аудита и независимость от проприетарных платформ. Модульная интеграция через GameRegistry и параллельная разработка по API-контрактам гарантируют масштабируемость системы без рефакторинга ядра.

Эффективность решения подтверждена комплексным тестированием: все 10 функциональных и 7 нефункциональных требований реализованы, юзабилити-тесты с участием целевой аудитории показали повышение вовлеченности детей и экономию ~160 ч/мес на группу из 20 детей. Практическая ценность подтверждена Актом о внедрении в Центре логопедии и дефектологии Департамента образования г. Москвы. Результаты апробированы в 8 научных публикациях, включая спецвыпуск журнала «Наноиндустрия» (2026), и представлены на Школе молодых ученых форума «Микроэлектроника». Перспективы развития включают внедрение параметрического аватара, расширение библиотеки игр и защищенного чата «педагог–родитель».

Таким образом, разработанная платформа демонстрирует способность решать комплексные задачи на стыке программной инженерии, информационной безопасности и управления проектами, что соответствует компетенциям профиля «Разработка и управление критической информационной инфраструктурой» и обеспечивает технологическую основу для устойчивого развития коррекционной педагогики в Российской Федерации.

Литература

1. О кадровом дефиците учителей-дефектологов: статистика и региональные различия // Газета педагогов. — URL: https://gazeta-pedagogov.ru/o-kadrovom-defitsite-uchitelej-defektologov-statistika-i-regionalnye-razlichiya (дата обращения: 15.09.2024).
2. Федеральный закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ, 2017. — № 31. –Ст. 4742.

3. Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных» // Собрание законодательства РФ, 2006. — № 31. –Ст. 3451.
4. Савченко В.А., Серяков С.С. Информационные технологии в сфере образования –логопедии и дефектологии // Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции «Развитие научно-технического творчества детей и молодежи». –Смоленск, 2025. — С. 204–206.
5. Серяков С.С., Савченко В.А. Современные вызовы и практики защиты персональных данных на примере сферы образования // Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции «Развитие научно-технического творчества детей и молодежи». –Смоленск, 2025. — С. 212–217.

УДК 004.056.5

Обеспечение устойчивости информационных систем к угрозам деанонимизации посредством верифицируемого синтеза персональных данных

Серяков С. С., Савченко В. А.
АНОО ВО «НТУ «Сириус»
354340, Краснодарский край, Федеральная территория Сириус, Олимпийский пр-т, 1
seryakoff@internet.ru, klepa300@ya.ru

Рассмотрена проблема обеспечения устойчивости информационных систем к атакам на связывание и повторную идентификацию при передаче данных для аналитики и тестирования. Предложен метод верифицируемого синтеза, реализующий координированную генерацию синтетических данных с сохранением семантической целостности реляционных связей. Разработан прототип сервиса пакетной обработки дампов баз данных, обеспечивающий физическую изоляцию контуров хранения и автоматическое формирование контрольных примеров преобразования в соответствии с требованиями Приказа Минцифры России № 173. Апробация проведена на платформе образовательного профиля; архитектура сервиса предусматривает масштабирование на промышленные СУБД PostgreSQL.
Ключевые слова: обезличивание персональных данных; верифицируемый синтез; координированная генерация; k-анонимность; устойчивость к деанонимизации; ФЗ-233; пакетная обработка данных.

Ensuring the resilience of information systems against de-anonymization threats through verified personal data synthesis

Seryakov S. S., Savchenko V. A.
Sirius NTU
1 Olympic Ave., Sirius Federal Territory, Krasnodar Territory, NGO 354340, Russia
seryakoff@internet.ru, klepa300@ya.ru

The paper considers the problem of ensuring the resilience of information systems to attacks on linking and re-identification during data transfer for analytics and testing. A method of verifiable synthesis is proposed, which implements the coordinated generation of synthetic data while preserving the semantic integrity of relational relationships. A prototype of a batch database dump processing service is developed, which provides physical isolation of storage circuits and automatically generates conversion test cases in accordance with the requirements of Order № 173 of the Ministry of Digital Development of the Russian Federation. The service has been tested on an educational platform, and its architecture allows for scaling to industrial PostgreSQL databases.
Keywords: anonymization of personal data; verifiable synthesis; coordinated generation; k-anonymity; resistance to deanonymization; FZ-233; batch data processing.

В условиях ужесточения регулирования в сфере обработки персональных данных (ПДн) обеспечение устойчивости информационных систем (ИС) трансформируется

из задачи защиты периметра в задачу гарантии безопасности самих данных при их движении между контурами. Принятие Федерального закона № 233-ФЗ и комплекса подзаконных актов (Постановлений Правительства № 961, № 1154, Приказа Минцифры № 173) перевело обезличивание в статус обязательной юридически значимой процедуры [1, 2]. Для операторов ИС, это формирует новый класс требований: данные должны быть не только защищены от несанкционированного доступа, но и устойчивы к атакам на связывание (linkage attacks) и повторную идентификацию при передаче третьим лицам или использовании в тестовых средах [3].

Традиционные меры защиты (шифрование, разграничение доступа) обеспечивают конфиденциальность при хранении, но не гарантируют устойчивость набора данных после извлечения из защищенного контура. Существующие рыночные решения либо являются избыточными корпоративными комплексами, зачастую не поддерживающими сценарии пакетной обработки локальных дампов, либо представляют собой библиотеки без механизмов координированной генерации и верифицируемости, требуемых новыми нормативными актами [4]. Отсутствие доступных инструментов создает риски: операторы вынуждены либо передавать исходные данные, нарушая законодательство, либо применять примитивное маскирование, разрушающее семантическую целостность и функциональную пригодность данных для тестирования. Анализ современных вызовов защиты ПДн в образовательных системах, проведенный авторами ранее, подтверждает критическую потребность в верифицируемых решениях пакетной обработки [5].

Целью работы является разработка метода и программного сервиса, обеспечивающих устойчивость ИС к угрозам деанонимизации посредством верифицируемого синтеза ПДн. Научная новизна заключается в комплексном подходе к пакетному обезличиванию как к инженерно-верифицируемому процессу: предложена архитектура, объединяющая координированную генерацию синтетических данных (для сохранения реляционной целостности) с автоматическим формированием контрольных примеров преобразования (для доказательства необратимости регулятору). Практическая значимость подтверждена разработкой прототипа, апробированного на образовательной платформе. Сервис функционирует в режиме обработки файловых дампов SQLite, что обеспечивает физическую изоляцию контуров, при этом абстракция слоя доступа к данным позволяет масштабирование решения на промышленные СУБД PostgreSQL без изменения ядра трансформации.

Архитектура сервиса и механизмы устойчивости

Обеспечение устойчивости к деанонимизации требует не только корректного выбора алгоритмов, но и специфической архитектуры обработки данных, исключающей пересечение исходных и результирующих контуров. Разработанный сервис функционирует в парадигме извлечения, преобразования и загрузки (ETL) и спроектирован как независимый программный модуль, развертываемый в изолированной среде.

Ключевым архитектурным решением, обеспечивающим физическую устойчивость к утечкам, является пакетная обработка файловых дампов баз данных. В текущей реализации прототипа в качестве среды для отладки алгоритмов и тестирования конвейера выбрана файловая СУБД SQLite. Данный выбор обусловлен нулевыми затратами на развертывание, автономностью работы и возможностью

передачи изолированного файла базы данных без настройки сетевых интеграций, что идеально соответствует требованию раздельного хранения исходных и обезличенных данных согласно Постановлению Правительства РФ № 1154 [2]. При этом архитектура сервиса построена с применением уровня абстракции доступа к данным: ядро трансформации оперирует объектно-реляционными моделями и не зависит от конкретного диалекта SQL. Это обеспечивает возможность масштабирования решения на промышленные СУБД, такие как PostgreSQL, без изменения логики преобразований, что подтверждает универсальность разработанного подхода.

Для нейтрализации угроз связывания (linkage attacks) и повторной идентификации реализован механизм координированной генерации синтетических данных. Независимое применение алгоритмов маскирования к отдельным таблицам неизбежно разрушает семантическую целостность реляционной модели: например, синтетическая фамилия ребенка перестает совпадать с фамилией законного представителя, а адрес электронной почты теряет корреляцию с ФИО субъекта. Для решения данной проблемы введена концепция глобальных «якорей» и словарей соответствий. Перед началом преобразования таблиц формируется реестр уникальных сущностей (например идентификаторов семей), для которых детерминированно генерируется базовый набор атрибутов. В процессе обхода строк движок трансформации обращается к этому реестру, обеспечивая согласованность связанных полей [6]. Словари соответствий хранятся в изолированном файле вне целевого контура, что гарантирует необратимость преобразования для конечного потребителя данных и исключает возможность восстановления исходных значений даже при компрометации обезличенного набора.

Управление политиками преобразования осуществляется через декларативные конфигурации в формате YAML. Данный подход снижает влияние человеческого фактора, обеспечивает воспроизводимость результатов и позволяет адаптировать стратегии обезличивания под различные типы данных (прямые идентификаторы, квази-идентификаторы, чувствительные атрибуты) без модификации программного кода. Таблицы, не содержащие персональных данных, переносятся в целевую базу без изменений, что сохраняет ссылочную целостность и функциональную пригодность набора для тестирования и аналитики.

Верифицируемость как критерий надежности процесса

В соответствии с Приказом Минцифры России № 173, надежность процесса обезличивания определяется не только фактом применения алгоритмов, но и возможностью независимой верификации их корректности [7]. Разработанный сервис реализует данное требование через автоматическую генерацию контрольных примеров преобразования.

При выполнении пакетной обработки сервис выделяет репрезентативную тестовую выборку и формирует структурированный документ (в формате CSV), содержащий таблицу сравнения исходных и синтетических значений с указанием примененного метода и его параметров. Дополнительно генерируется исполняемый скрипт на языке Python, воспроизводящий данное преобразование для предоставленной выборки. Наличие воспроизводимого скрипта исключает использование непрозрачных алгоритмов («черных ящиков») и позволяет уполномоченному органу или независимому аудитору подтвердить корректность обезличивания, что

является обязательным условием легитимности операции согласно актуальной нормативной базе.

Формализация доказательства необратимости обеспечивается на архитектурном уровне: в целевом контуре отсутствуют таблицы маппинга, а конфигурации и словари соответствия хранятся изолированно. Для количественной оценки устойчивости набора к статистическим атакам реализован встроенный модуль оценки k-анонимности. Алгоритм агрегирует данные по заданному набору квази-идентификаторов и определяет минимальный размер группы неразличимых записей. Группы, размер которых ниже установленного порога k, принудительно подавляются, что исключает формирование уникальных комбинаций признаков и нейтрализует угрозу повторной идентификации. Расчет метрики k-анонимности выступает формальным критерием достаточности обезличивания, подтверждающим соответствие требованиям Постановления Правительства РФ № 961 о нейтрализации угроз идентификации и связывания [8].

Таким образом, верифицируемость в разработанном сервисе обеспечена не постфактум, а встроена в конвейер обработки данных: каждый сеанс обезличивания автоматически сопровождается артефактами, доказывающими корректность, необратимость и достаточность примененных мер защиты.

Выводы

В ходе выполнения работы предложен метод и разработан программный сервис, обеспечивающие устойчивость информационных систем к угрозам деанонимизации посредством верифицируемого синтеза персональных данных. Архитектура сервиса, функционирующая в парадигме пакетной обработки файловых дампов баз данных, гарантирует физическую изоляцию исходных и результирующих контуров хранения, что обеспечивает выполнение требований Постановления Правительства Российской Федерации № 1154 о раздельном хранении и исключает возможность утечки через пересечение сред [2]. Реализованный механизм координированной генерации синтетических данных на основе глобальных семантических якорей позволяет сохранять реляционную целостность и функциональную пригодность обезличенных наборов для тестирования и аналитики, нейтрализуя при этом угрозы повторной идентификации и связывания, регламентированные Постановлением Правительства Российской Федерации № 961 [8].

Надежность процесса обезличивания подтверждена встроенными механизмами верификации: автоматической генерацией контрольных примеров преобразования и воспроизводимых скриптов в соответствии с Приказом Минцифры России № 173, а также расчетом метрики k-анонимности как формального критерия устойчивости набора к статистическим атакам [7]. Апробация прототипа на платформе образовательного профиля продемонстрировала сохранение полезности данных при гарантированной необратимости преобразований. При этом абстракция слоя доступа к данным обеспечивает возможность масштабирования решения с файловой СУБД SQLite, использованной для тестирования алгоритмов, на промышленные системы управления базами данных PostgreSQL без изменения ядра трансформации.

Таким образом, разработанное решение закрывает дефицит доступных инструментов для легковесного пакетного обезличивания, соответствующего актуальным нормативным требованиям Российской Федерации, и формирует основу

для дальнейшего развития в направлениях автоматического обнаружения чувствительных атрибутов и интеграции в конвейеры непрерывной поставки программного обеспечения.

Литература

1. Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных» // Собрание законодательства РФ, 2006. — № 31. –Ст. 3451.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 01.11.2012 № 1119 «Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных» // Собрание законодательства Российской Федерации, 2012. — № 45. –Ст. 6163.
3. Борисов А. В., Босов А. В., Иванов А. В. Применение имитационного компьютерного моделирования к задаче обезличивания персональных данных. Модель и алгоритм обезличивания методом синтеза // Программирование, 2023. — № 5. — С. 19–34.
4. Постановление Правительства Российской Федерации от 26.06.2025 № 961 «О формировании составов персональных данных, полученных в результате обезличивания персональных данных, сгруппированных по определенному признаку» // Собрание законодательства Российской Федерации, 2025.
5. Серяков С. С., Савченко В. А. Современные вызовы и практики защиты персональных данных на примере сферы образования // Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции «Развитие научно-технического творчества детей и молодежи». –Смоленск, 2025. — С. 212–217.
6. Приказ Минцифры России от 03.03.2026 № 173 «Об утверждении методических рекомендаций по подготовке требования о предоставлении персональных данных, полученных в результате обезличивания персональных данных» // Официальный интернет-портал правовой информации, 2026.
7. Приказ Минцифры России от 03.03.2026 № 173 «Об утверждении методических рекомендаций по подготовке требования о предоставлении персональных данных, полученных в результате обезличивания персональных данных» // Официальный интернет-портал правовой информации, 2026.
8. Постановление Правительства Российской Федерации от 26.06.2025 № 961 «О формировании составов персональных данных, полученных в результате обезличивания персональных данных, сгруппированных по определенному признаку» // Собрание законодательства Российской Федерации, 2025.

УДК 004.056.5

Сравнительный анализ средств наблюдаемости DNS в Kubernetes и экспериментальная оценка надежности eBPF-модуля обнаружения DNS-туннелирования

Нассер А. А., магистрант
Научно-технологический университет «Сириус»», научный центр информационных технологий и искусственного интеллекта
354340, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр-т, 1
theahmad64@gmail.com

Проведен сравнительный анализ средств наблюдаемости DNS-трафика в Kubernetes. Экспериментально оценена надежность eBPF-модуля с атрибуцией событий до Pod независимо от CNI, где полнота обнаружения составила 1,0 при доле ложных срабатываний 0,051 % на легитимном трафике.
Ключевые слова: Kubernetes; eBPF; DNS-туннелирование; наблюдаемость; ложные срабатывания; информационная безопасность; контейнерные среды; критическая информационная инфраструктура.

Comparative Analysis of DNS Observability Tools in Kubernetes and Experimental Evaluation of the Reliability of an eBPF-Based DNS Tunneling Detection Module

Nasser A. A., Master's student
Sirius University of Science and Technology, Research Center for Information Technologies and Artificial Intelligence
1 Olympic Ave., Sirius Federal Territory, 354340, Russia
theahmad64@gmail.com

A comparative analysis of DNS traffic observability tools in Kubernetes is presented. The reliability of an eBPF-based module with pod-level event attribution independent of CNI is experimentally evaluated with detection recall of 1.0 and a false positive rate of 0.051 % on legitimate traffic.
Keywords: Kubernetes; eBPF; DNS tunneling; observability; false positives; information security; container environments; critical information infrastructure.

По данным IDC и EfficientIP, в 2021 году с DNS-атаками столкнулись 87 % опрошенных организаций, при этом 26 % компаний в США зафиксировали кражу данных именно через DNS [1]. База знаний MITRE ATT&CK фиксирует более 50 групп и семейств вредоносного программного обеспечения, использовавших DNS как канал управления (C2) или эксфильтрации данных (техника T1071.004) [2]. Согласно ежегодному опросу CNCF (2025), Kubernetes в продуктивной среде применяют 82 % организаций, использующих контейнеризацию, — на 16 п.п. больше, чем двумя годами ранее [3]. Расширение поверхности атак при переходе на контейнерную оркестрацию систематизировано в [4]. Большинство методов обнаружения DNS-туннелирования, описанных в литературе, основаны на выявлении структурных и поведенческих артефактов трафика — энтропии и длины доменных имен,

частоты и регулярности запросов, — а не на анализе полезной нагрузки или блокировке по спискам [5].

Для систематизации существующих подходов выполнено сопоставление инструментов наблюдаемости по критериям, значимым для задачи обнаружения DNS-туннелирования, таким как уровень наблюдения, атрибуция до Pod, наличие специализированных DNS-эвристик и независимость от реализации сетевой подсистемы (CNI). Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение средств наблюдаемости и детектирования DNS в Kubernetes

Инструмент	Технология перехвата	Точка перехвата	Атрибуция до Pod	DNS-эвристики	Независимость от CNI
CoreDNS (log-плагин)	логирование в приложении	DNS-резолвер (L7)	нет	нет	да
Zeek	захват пакетов (libpcap)	сетевой интерфейс (L3–L7)	нет	ограничено	нет
Falco	eBPF / syscall-хуки	системные вызовы процесса	да	нет[1]	да
Tetragon	eBPF (kprobe/tracepoint)	системные вызовы и сокеты	да	нет[2]	да
Hubble / Cilium	eBPF datapath + L7-proxy	сетевой стек CNI (L3–L7)	да	нет	нет[3]
Kubeshark	eBPF / AF_PACKET	сетевой интерфейс узла (L3–L7)в	да	нет	да
Inspektor Gadget (trace_dns)	eBPF (kprobe/tracepoint)	системные вызовы и сокеты	да	нет	да
разработанный модуль	eBPF	cgroup (BPF_ PROG_TYPE_ CGROUP_SKB)	да	да	да

CoreDNS приведен как штатный компонент кластера, доступный без установки дополнительных средств. Остальные строки — это специализированные инструменты наблюдаемости и безопасности. [1] Официальный открытый набор правил Falco (falcosecurity/rules, включая incubating и sandbox) не содержит эвристик DNS-туннелирования. Аналогичные правила существуют только в проприетарном наборе Sysdig Secure. [2] Нативный разбор DNS-запросов для TracingPolicy разрабатывается (PR cilium/tetragon #5148) и на момент подготовки тезисов не включен в стабильный релиз. [3] DNS-видимость Hubble доступна только на egress и требует Cilium в роли основного CNI. Сравнение составлено по официальной документации и репозиториям каждого инструмента в редакциях, актуальных на июль 2026 года, и отражает поведение при стандартной конфигурации без пользовательских правил.

Как видно из табл. 1, ни один из перечисленных инструментов не сочетает одновременно атрибуцию до Pod, встроенные эвристики для классов C2,

эксфильтрации и IP-over-DNS, а также независимость от CNI. Zeek привязан к сетевому интерфейсу и не видит Pod, Falco и Tetragon атрибутируют события до Pod, но не реализуют распознавания классов DNS-туннелирования без пользовательских правил, Hubble ограничен кластерами с Cilium CNI. Универсальные eBPF-инструменты наблюдаемости нового поколения, такие как Kubeshark и Inspektor Gadget, обеспечивают атрибуцию DNS-трафика до Pod независимо от CNI, однако являются инструментами общей диагностики трафика и не реализуют специализированной детекции туннелирования. Таким образом, обозначенный пробел в покрытии сохраняется и для инструментов, появившихся после первоначального анализа.

Для устранения выявленного пробела разработан программный модуль перехвата DNS-трафика на уровне cgroup с использованием eBPF (BPF_PROG_TYPE_CGROUP_SKB). Модуль развертывается как DaemonSet, интегрируется со стеком Prometheus/Grafana и реализует интегральную оценку структурных и поведенческих признаков. Детекторы нацелены на артефакты кодирования в метках поддоменов, редкие типы записей, повышенную энтропию, периодический опрос (beaconing) и множественные ответы CDN-подобного характера.

Экспериментальная оценка надежности проведена на тестовом стенде Kubernetes трех фазах. Фаза A – только легитимный фон (228 319 DNS-событий). Фаза B — изолированный запуск инструментов dnscat2, DNSExfiltrator и iodine. Фаза C — одновременная работа всех трех инструментов и генератора фоновой нагрузка.

В фазе A зафиксировано 116 ложных срабатываний при доле ложных срабатываний (FPR) 0,051 % — менее одного ложного события на 2000 легитимных запросов. Ведущими причинами были: BASE64_SUBDOMAIN на DKIM-селекторах (38 событий), HIGH_ENTROPY на длинных именах CDN и репозиториев (56), MANY_ANSWERS на ответах с большим числом A-записей (15). Средняя числовая оценка ложных срабатываний составила 2,0 балла при пороге 2, что указывает на возможность снижения FPR повышением порога.

В фазе B для каждого инструмента достигнуты точность, полнота и F1-мера 1,000 при нулевой доле ложных срабатываний на разобранных событиях. Ведущими причинами были: NULL_RECORD и MANY_SUBDOMAINS для iodine, HEX_SUBDOMAIN и C2_TXT_REQUEST для dnscat2, BASE64_SUBDOMAIN и HIGH_ENTROPY для DNSExfiltrator.

В фазе C при пороге 3 балла полнота обнаружения во всех прогонах равна 1,0. Доля ложных срабатываний составила 0,334 % (прогон1), 0,007 % (прогон2) и 0,126 % (прогон). Разброс обусловлен стохастикой фоновой нагрузки, потому как в прогоне прогон1доминирующей причиной ложных срабатываний стал признак C2_BEACON на периодических запросах генератора (534 из 573). Пересчет метрик для прогон3 показало, что при пороге 4 достигаются точность, полнота и F1-мера 1,000 при нулевой доле ложных срабатываний. Но порог 3 выбран как компромисс для общего случая.

В сопоставимом по классам угроз исследовании Qutqut и др. система Suricata достигла полноты 1,0 при анализе трафика iodine и dnscat2 в среде AWS EC2 [6]. Прямое сопоставление затруднено различием тестовых стендов и методик разметки, однако полученная в настоящей работе полнота 1,0 на тех же классах инструментов при дополнительной атрибуции событий до Pod и независимости от CNI

указывает на то, что перехват на уровне cgroup не уступает специализированным сетевым IDS по чувствительности к рассмотренным типам туннелей. Среди ограничений — сниженная чувствительность к низкоскоростной эксфильтрации, отсутствие поддержки шифрованного DNS (DoH/DoT) и необходимость калибровки порога числовой оценки на профиле легитимного трафика конкретного кластера.

Практическая значимость работы состоит в возможности внедрения модуля в системы мониторинга и защиты Kubernetes-кластеров критической информационной инфраструктуры без привязки к конкретной сетевой инфраструктуре. Полученные результаты подтверждают, что комбинация eBPF-перехвата на уровне cgroup и интегральных эвристик обеспечивает высокую полноту обнаружения при контролируемой доле ложных срабатываний на легитимном и смешанном трафике.

Литература

1. IDC, EfficientIP. Global DNS Threat Report 2021: аналитический отчет / IDC, EfficientIP. 2021. URL: https://efficientip.com/resources/idc-dns-threat-report-2021 (дата обращения: 25.04.2026).
2. MITRE. ATT&CK: T1071.004 Application Layer Protocol: DNS: knowledge base entry / MITRE Corporation. URL: https://attack.mitre.org/techniques/T1071/004 (дата обращения: 25.04.2026).
3. Cloud Native Computing Foundation. Annual Cloud Native Survey 2025: survey report / Cloud Native Computing Foundation, 2025. URL: https://www.cncf.io/reports/the-cncf-annual-cloud-native-survey/ (дата обращения: 01.06.2026).
4. Дарвеш Г., Хаммуд Дж., Воробьёва А.А. Безопасность в платформе Kubernetes: рекомендации и анализ безопасности // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. –2022. — № 2 (44). — С. 63–69.
5. Wang Y. A comprehensive survey on DNS tunnel detection / Y. Wang, A. Zhou, S. Liao, R. Zheng, R. Hu, L. Zhang // Computer Networks, 2021. Vol. 197. Art. 108322. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.108322.
6. Qutqut M. H. A Comparative Evaluation of Snort and Suricata for Detecting Data Exfiltration Tunnels in Cloud Environments / Qutqut M. H., A. Ahmed, Taqi M. K., J. Abimanyu, E. Th. Ajes, F. Alhaj // Journal of Cybersecurity and Privacy, 2026. Vol. 6. № 1. Art. 17. DOI: 10.3390/jcp6010017.