РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

ШКОЛА
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Университет «Сириус»
16–25 сентября 2024 г.

УДК 621.384.6 + 681.6-32

Перспективы высокопроизводительной печатной электроники на основе неорганических полупроводников

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

Обсуждается развитие нового поколения печатной электроники на основе неорганических полупроводников с высокой подвижностью носителей заряда (10–1000 $см^2/В{\cdot}с$), включая использование нанокристаллов на основе Si, GaAs, GaN, InAs, MoS_2, $MoSe_2$, оксидных полупроводников IGZO и углеродных нанотрубок.

Ключевые слова: печатная электроника; неорганические полупроводники; подвижность носителей заряда; нанокристаллы; оксиды; УНТ.

Печатная электроника (ПЭ), определяемая как печать электронных схем на различных плоских и неплоских подложках, таких как бумага, полимеры и текстиль, характеризуется быстрым развитием, перспективой низкой стоимости, крупносерийного и высокопроизводительного производства электронных устройств. В настоящее время происходит переход от применения ПЭ в интеграции готовых электронных устройств на гибкой печатной плате к печати функциональными чернилами активных элементов микроэлектроники и схем электронных устройств с достаточно высоким быстродействием. Для развития нового поколения печатной электроники разрабатываются неорганические полупроводниковые материалы с достаточно высокой подвижностью носителей заряда (10–1000 $см^2/В{\cdot}с$) и активные элементы на их основе [1]. В качестве перспективных неорганических полупроводников активно исследуются металлооксидные полупроводники InGaZnO с подвижностью зарядов в транзисторе до 350 $см^2/В{\cdot}с$ и отношением токов включенного и выключенного состояний Ion/Ioff более 10^4. В последние годы значительное количество исследований выполняется по печати транзисторов полупроводниковыми нанокристаллами в форме нанопроволок, нанолент и наномембран на основе Si, GaAs, GaN, InAs, MoS_2, $MoSe_2$ и др. с подвижностью зарядов от 100 до 1600 $см^2/В{\cdot}с$. При нанесении на подложку таких анизотропных и длинномерных нанокристаллов ключевую роль играет обеспечение их ориентированной укладки.

Особый интерес проявляется к работам по созданию элементов микроэлектроники на основе полупроводниковых углеродных нанотрубок [2], характеризуемых подвижностью зарядов порядка 10^5 $см^2/В\,с$, в 10 раз превышающей монокристальный Si. Для эффективного развития неорганической печатной электроники необходимо исследование фундаментальной физики устройств, эффектов изгибающих воздействий на гибких подложках, инновационных подходов изготовления и новых форм-факторов, необходимых для удовлетворения потребности этого нового поколения высокопроизводительной электроники.

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

Литература

1. Abhishek Singh Dahiya, Dhayalan Shakthivel, Yogeenth Kumaresan, Ayoub Zumeit, Adamos Christou and Ravinder Dahiya. High-performance printed electronics based on inorganic semiconducting nano to chip scale structures // Nano Convergence, 2020.
2. Franklin A. D., Hersam M. C., Wong H.-S. P. Carbon nanotube transistors: Making electronics from molecules // Science, 2022. Vol. 378. P. 726–732.

УДК 621.373.8

Квантовые точки и лазеры на их основе для интегральной оптоэлектроники

Жуков А. Е., д. ф.-м. н., Иванов К. А., к. ф.-м. н., Комаров С. Д., Махов И. С., к. ф.-м. н., Мельниченко И. А., Моисеев Э. И., Надточий А. М., к. ф.-м. н., Крыжановская Н. В., д. ф.-м. н.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
194100, г. Санкт-Петербург, ул. Союза Печатников, 16
zhuckale@yandex.ru; aezhukov@hse.ru

Представлены результаты исследований лазеров на основе самоорганизующихся квантовых точек, демонстрирующие их достоинства в качестве источника излучения для интегральной оптоэлектроники. Приведены примеры микролазеров, в том числе гибридно или монолитно интегрированных с кремнием, а также примеры интеграции с другими элементами.
Ключевые слова: квантовые точки; лазеры; микролазеры; интегральная оптоэлектроника.

В 2023 году глобальный потребительский интернет-трафик превысил 4 зеттабайта. При этом на долю объема обрабатываемых данных, остающегося внутри дата-центра, приходится более 70% его общего трафика (если при этом не учитывать данные, которые не выходят за пределы каждой конкретной серверной стойки, а если учитывать этот локальный трафик, то более 90%). Таким образом, имеется потребность в обработке больших объемов данных, при которой передача осуществляется на малые и сверхмалые расстояния. Актуальным является внедрение принципов оптической связи для реализации сетей внутри центров обработки данных или даже между процессором и памятью [1]. В предельном случае оптические сигналы могут использоваться для соединения фотонных и микроэлектронных элементов внутри одной оптоэлектронной интегральной схемы. Кремний остается основным материалом микроэлектроники, и, кроме того, продемонстрирован значительный прогресс в реализации пассивных фотонных компонентов и интегральных схем на основе кремния. К сожалению, эффективные источники света на основе кремния до сих пор не реализованы вследствие непрямой структуры электронных зон.

Преодолеть эту трудность может формирование лазеров на основе материалов A^3B^5, синтезированных на кремнии либо перенесенных на кремниевую подложку [2]. Самоорганизующиеся квантовые точки являются перспективным материалом для использования в качестве активной области таких лазеров благодаря следующим свойствам:

- низкая чувствительность к эпитаксиальным дефектам, возникающим при росте A^3B^5 на кремнии;
- низкая чувствительность к поверхностной безызлучательной рекомбинации, что позволяет формировать лазерные резонаторы малого размера (микролазеры);
- возможность достижения длины волны 1.1xx–1.3xx мкм, соответствующей низким потерям в кремнии, SiO_2, Si_3N_4;
- низкие пороговые плотности тока и высокая температурная стабильность.

Для использования в оптоэлектронной интегральной схеме лазер должен обладать малыми размерами. При этом типичные размеры традиционных лазерных диодов (около 1 мм) весьма велики. Перспективным является использование лазерных микрорезонаторов, поддерживающих моды шепчущей галереи — микродиски, микрокольца и их модификации. Благодаря высокому коэффициенту отражения от вертикальных боковых стенок низкие оптические потери достигаются даже в случае, когда размеры лазера составляют десятки, а иногда и единицы микрометров. Были продемонстрированы микродисковые лазеры с квантовыми точками, изготовленные из эпитаксиальных структур, синтезированных на кремнии или перенесенных на поверхность кремния [3]. Альтернативным подходом является использование лазеров полосковой конструкции с малой длиной резонатора, что оказывается возможным в случае использования квантовых точек высокой поверхностной плотности. Формированию интегральных схем способствует то обстоятельство, что лазеры на квантовых точках допускают использование зеркал, изготовленных с помощью травления ионным пучком. Низкая плотность тока прозрачности и неоднородно уширенный спектр усиления делают квантовые точки перспективными для использования в качестве активной области полупроводниковых оптических усилителей и фотодетекторов. Возможно формирование как лазера, так и фотоприемника из одной и той же эпитаксиальной структуры.

Литература

1. Sun C., Wade M. T., Lee Y. et al. Single-chip microprocessor that communicates directly using light // Nature, 2015. Vol. 528. P. 534–538.
2. Norman J. C., Jung D., Wan Y., Bowers E. Perspective: The future of quantum dot photonic integrated circuits // APL Photonics, 2018. Vol. 3. P. 030901.
3. Zhukov A. E., Kryzhanovskaya N. V., Moiseev E. I., Maximov M. V. Quantum-dot microlasers based on whispering gallery mode resonators // Light: Science & Applications., 2021. Vol. 10. P. 80.

УДК 538.958

SiGe-гетероструктуры в микрорезонаторах для создания Si-совместимых излучателей ближнего ИК-диапазона

Юрасов Д. В.[1], Степихова М. В.[1], Яблонский А. Н.[1], Перетокин А. В.[1], Шалеев М. В.[1], Дьяков С. А.[2], Гиппиус Н. А.[2], Тиходеев С. Г.[3], Родякина Е. Е.[4], Смагина Ж. В.[4], Новиков А. В.[1]

[1] Институт физики микроструктур РАН
603087, г. Нижегородская обл., д. Афонино, ул. Академическая, 7
Inquisitor@ipmras.ru
[2] Сколковский институт науки и технологий
143025, г. Москва, Большой бульв., 30, стр. 1
[3] МГУ им. М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
[4] Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

Исследовано формирование источников излучения ближнего ИК-диапазона на основе SiGe-гетероструктур. Рассмотрен подход по встраиванию таких излучателей в микрорезонаторы различного дизайна в целях как повышения их эффективности, так и получения дополнительных возможностей по управлению излучением.

Ключевые слова: SiGe-гетероструктуры; Si-фотоника; ближний ИК; микрорезонаторы; фотонные кристаллы; люминесценция.

К настоящему времени традиционный подход по увеличению быстродействия вычислительных устройств за счет масштабирования, т. е. за счет уменьшения размеров транзисторов, практически исчерпал свой потенциал. Элементы транзисторов достигли размеров в единицы нанометров, и дальнейшее продвижение крайне затруднительно. В связи с этим активно исследуется идея перехода к оптоэлектронике, где передача информации будет осуществляться за счет фотонов, а не электронов, что поможет радикально снизить энергопотребление и увеличить быстродействие. Многие Si-совместимые оптоэлектронные и фотонные элементы (модуляторы, волноводы, мультиплексоры, детекторы) уже созданы, но до сих пор отсутствует решение по созданию коммерчески эффективного светоизлучающего устройства на основе Si в ближнем ИК-диапазоне. Это связано с тем, что Si является непрямозонным полупроводником и его эффективность как излучателя крайне низка. В настоящее время в основном используется гибридный подход — светоизлучающие элементы (LED, лазеры) создаются на основе прямозонных полупроводников семейства A^3B^5, которые тем или иным способом интегрируются с Si КМОП-технологией [1]. Однако в силу различных типов и параметров кристаллической решетки, различных коэффициентов температурного расширения и др. интеграция полупроводников A^3B^5 с Si является достаточно сложной задачей. Кроме того, использование гибридных структур A^3B^5/Si значительно повышает итоговую стоимость чипов.

Потенциально перспективным видится создание источников излучения ближнего ИК-диапазона на основе гетероструктур на основе материалов IV группы (SiGe, SiGeSn) ввиду их полной совместимости с Si КМОП-технологией [2]. Однако

их эффективность как излучателей также низка по сравнению с материалами A^3B^5. Одним из способов повышения эффективности светоизлучающих структур является их зонная инженерия для роста внутренней квантовой эффективности, а также встраивание их в микрорезонаторы. Особо перспективными являются диэлектрические микрорезонаторы, т.к. омические потери в них крайне малы. В настоящей работе приведен обзор достижений по созданию источников излучения ближнего и среднего ИК-диапазона на основе нескольких видов гетероструктур на основе материалов IV группы, встроенных в различные микрорезонаторы. В частности, в качестве активной среды рассмотрены Ge квантовые точки, структуры на основе локально растянутых слоев Ge и структуры на основе слоев SiGeSn. Описаны некоторые способы их зонной инженерии для модификации оптических свойств. Приведены результаты по их встраиванию в диэлектрические микрорезонаторы на основе фотонных кристаллов, а также в Ми-резонаторы.

Работа поддержана НЦМУ «Центр фотоники» (соглашение № 075-15-2022-316).

Литература

1. Kunert B., Mols Y., Baryshniskova M., Waldron N., Schulze A. and Langer R. How to control defect formation in monolithic III/V hetero-epitaxy on (100) Si? A critical review on current approaches // Semicond. Sci. Technol., 2018. Vol. 633. P. 093002.
2. Silicon Photonics IV. Innovative Frontiers / Ed. by D.J. Lockwood and L. Pavesi // Topics in Applied Physics, 2021. Vol. 139. Spirnger publishing.

УДК 621.382

Квантовая наноэлектроника: фундаментальные ограничения и перспективы развития

Арутюнов К. Ю.[1,2]
[1] *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)*
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
[2] *ИФП им. П.Л. Капицы РАН*
119334, г. Москва, ул. Косыгина, 2

Представлен обзор основных причин, ограничивающих миниатюризацию наноэлектронных устройств: увеличение тепловыделения на единицу объема и различных квантовых размерных эффектов. Очевидно, что эти ограничения не должны игнорироваться при проектировании сверхминиатюрных наноэлектронных цепей нового поколения. Однако наряду с негативным влиянием квантовых эффектов на работу «стандартных» устройств эти явления могут быть использованы для построения качественно новых элементов, основанных на отличных от классических принципах передачи, обработки и хранения информации.
Ключевые слова: нанотехногия; сверхпроводимость; криоэлектроника; квантовая наноэлектроника.

В последние годы наблюдаются отклонения от хорошо известного правила Мура [1], описывавшего рост степени интеграции элементной базы микроэлектроники на протяжении нескольких десятилетий ее развития и построенной с применением стандартной КМОП-технологии. Обычно выделяют две основные причины: увеличение тепловыделения на единицу объема и различные квантовые размерные эффекты [2].

Представляется крайне заманчивым использовать сверхпроводящие материалы, в которых протекание электрического тока происходит бездиссипативно. Однако и в сверхпроводниках присутствуют различные размерные ограничения, приводящие к отклонению поведения таких сверхминиатюрных систем от стандартных объектов макроскопических размеров, например наличие конечного электрического сопротивления. В докладе обсуждаются различные нетривиальные эффекты в низкоразмерных сверхпроводниках [3] и приводятся примеры сверхпроводящих устройств нанометровых размеров: элементов квантовой логики (кубитов) [4], не содержащего диэлектрических слоев «одноэлектронного» сверхпроводящего транзистора [5] и квантового эталона силы электрического тока [6].

Работа поддержана Росийским научным фондом, проект 23-72-00018 «Исследование неравновесных и граничных явлений в сверхпроводящих гибридных наноструктурах».

Литература

1. Moore G. E. Cramming more components onto integrated circuits // Electronics, 1965. № 8. P. 114.
2. Sedov E. A., Riikonen Kari-Pekka and Konstantin Yu. A. Quantum size phenomena in single-crystalline bismuth nanostructures // Nature: Quantum Materials 2, 2017. № 18.

3. Arutyunov K. Yu., Golubev D. S. and Zaikin A. D. Superconductivity in one dimension // Physics Reports, 2008. 464, 1–70.
4. Astafiev O. V., Ioffe L. B., Kafanov S., Pashkin Yu. A., Arutyunov K. Yu., Shahar D., Cohen O., Tsai J. S. Coherent quantum phase slip // Nature, 2012. 484 (7394), 355.
5. Arutyunov K. Yu., Lehtinen J. S. Junctionless Cooper pair transistor // Physica C: Superconductivity and its applications, 2017. 533, 158.
6. Wang Z., Lehtinen J. S. and Arutyunov K. Yu. Towards quantum phase slip based standard of electric current // Appl. Phys. Lett., 2019. 114, 242601.

УДК 621.382.32

SPICE-моделирование ВАХ КНС КМОП-транзисторов с учетом технологического разброса параметров и воздействия температуры

Старилова Е. В., Хобов А. П., Исмаил-Заде М. Р.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
mismailzade@hse.ru

В работе отлажены на основе результатов измерений SPICE-модели для схемотехнического моделирования характеристик субмикронных КНС КМОП-транзисторов для проектирования КНС КМОП БИС с учетом технологического разброса параметров и воздействия температуры.
Ключевые слова: температура; кремний на сапфире; МОП-транзистор; SPICE-модели; схемотехническое моделирование; определение параметров модели; технологический разброс.

Введение

Одной из важнейших тенденций развития современной КМОП-технологии является уменьшение размеров транзисторов и других элементов интегральных схем (масштабирование). Более того, даже для хорошо отлаженных, управляемых и устойчивых процессов статистический разброс параметров этих элементов неизбежно увеличивается [1–3]. Разброс параметров транзисторов в интегральных схемах является результатом пространственных и временных флуктуаций технологического процесса, таких как колебания легирующих примесей, шероховатость кромок затвора и др.

Разброс технологических параметров приводит к разбросу параметров электронных компонентов, что приводит к разбросу параметров ИС в целом [4, 5] и, как следствие, ухудшению соотношения точности, быстродействия и энергопотребления [6].

Компьютерное моделирование электронных компонентов с учетом статистического разброса параметров элементов дает следующие возможности [7]:

1) снижение чувствительности схемы к разбросу параметров физической структуры за счет оптимального подбора размеров транзисторов и их взаимного расположения;
2) повышение параметрической надежности разрабатываемых электронных устройств;
3) повышение достоверности схемотехнического проектирования.

В данной работе предпринята попытка оценить технологический разброс параметров отечественной КНС КМОП-технологии с проектными нормами $L_{min} = 1{,}7$ мкм.

Экспериментальное исследование ВАХ КНС МОПТ

Были исследованы результаты измерений электрических характеристик КНС МОП-транзисторов с минимальной длиной канала $L_{min} = 1{,}7$ мкм и напряжением питания 7 В. Тестовая структура включает в себя *n*- и *p*-канальные транзисторы с размерами: диапазон ширин каналов $W = 5{,}2–100$ мкм; диапазон длин каналов $L = 1{,}7–40$ мкм.

Каждая тестовая структура содержит 92 кадра. Использовались усредненные измеренные характеристики для тестовых транзисторов каждого размера.

Методика учета технологического разброса в SPICE-моделях

Основными параметрами модели МОП-транзистора являются удельная крутизна, пороговое напряжение, коэффициент модуляции длины канала и ток насыщения. Первоначально определяются средние значения данных параметров, а также рассчитываются средние отклонения σ. Из-за физических и химических процессов во время изготовления транзисторов возникает технологический разброс, и для того, чтобы учесть его в SPICE-схемах, строятся угловые модели для данных параметров. В этом методе используется статистический подход для определения крайних точек значений параметров транзисторов. Для аналоговых и цифровых применений создаются четыре угловых случая: SS (медленные nMOS и pMOS) и FF (быстрые nMOS и pMOS) для аналоговых, а также FS (быстрые nMOS и медленные

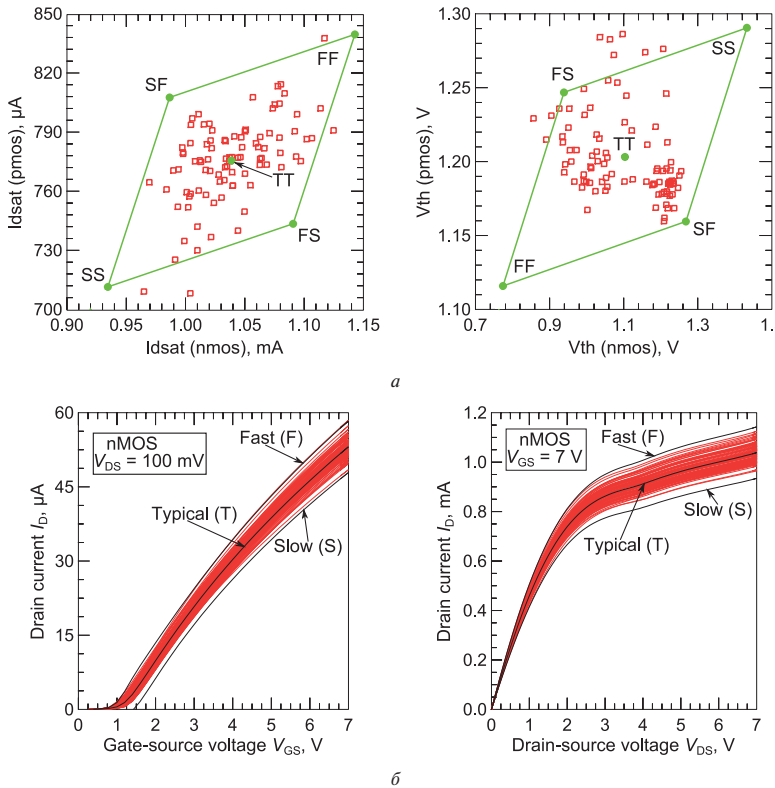


Рис. 1. Разброс параметров *Idsat* и *Vth* для *n*- и *p*-МОПТ (*а*). Сравнение измеренных и смоделированных с помощью угловой модели сток-затворных и выходных ВАХ КНС n-МОПТ с W/L = 5,2/1,7 мкм (красные символы — эксперимент, линии — моделирование)

pMOS) и SF (медленные nMOS и быстрые pMOS) для цифровых [4]. Эти точки представляют собой экстремальные случаи, охватывая все возможные промежуточные значения. Для этого параметры смещаются относительно среднего значения (TT) на величину ±3σ, где σ — стандартное отклонение. Такой подход позволяет охватить как наилучший, так и наихудший случай технологического разброса.

В данной работе подбирались следующие параметры МОП-транзистора: пороговое напряжение, ток насыщения и подвижность. Графическое представление угловых точек, построенных на основе экспериментальных данных, приведено на рис. 1*а*.

Следующим этапом является определение полного набора параметров SPICE-моделей для *n*- и *p*-МОПТ для случая TT (типичный nMOS и pMOS).

Для учета точек (SS, FF, SF, FS) угловой модели необходимо в базовой SPICE-модели TT изменить параметры, которые наиболее чувствительны к технологическому разбросу. Для МОП-транзисторов это параметры, отвечающие за пороговое напряжение *Vth*, за подвижность носителей заряда μ_{eff}, за изменение длины *L* и ширины *W* канала, за сопротивление сток-исток R_{DS}.

Возможности представленной угловой модели на основе стандартной модели BSIMSOIv.4 проиллюстрированы на примере моделирования ВАХ *n*-канального КНС МОПТ с W/L = 5,2/1,7 мкм (см. рис. 1*б*).

Заключение

В ходе выполнения работы получены следующие результаты:

1) проведены обработка и анализ измеренных электрических характеристик большого набора тестовых КНС МОПТ по 92 кадрам;
2) на основе стандартной модели BSIMSOIv.4 разработаны SPICE-модели КНС МОПТ, учитывающие технологический разброс основных параметров;
3) определены параметры разработанных SPICE-моделей для *n*- и *p*-канальных КНС МОПТ.

Литературы

1. Pradeep K., Poiroux T., Scheer P., Juge A., Gouget G., Ghibaudo G. // IEDM, 2018. P. 17.1.1–17.1.4.
2. Asenov Ase. and Khairulmizam Samsudin. Variability in nanoscale UTB SOI devices and its impact on circuits and systems. Nanoscaled SOI Structures and Devices. Springer, Dordrecht, 2007. P. 259–302.
3. Mroszczyk P. and Dudek P. Tunable CMOS delay gate with improved matching properties // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 61 (9) (2014). P. 2586–2595.
4. Saha S. K. Compact MOSFET modeling for process variability-aware VLSI circuit design // IEEE access, 2014. 2, 104–115.
5. Pradeep K., Poiroux T., Scheer P., Juge A., Gouget G., Ghibaudo G. Analysis and modeling of wafer-level process variability in 28 nm FD-SOI using split C-V measurements // Solid-State Electronics, 2018. 145. P. 19–28.
6. Toro-Frias A., Martin-Lloret P. et al. Reliability simulation for analog ICs: Goals, solution and challenges // Integration, 2016. Vol. 55. P. 341–348.
7. Patil S. R. and Gautam D. K. Statistical modeling of logic gates and flip-flops for high speed CMOS circuits applications // Silicon, 2017. 9 (3). P. 371–378.

УДК 621.372.412

Кварцевые генераторы. Перспективы развития

Ложников А. О., к. т. н.
АО «ОНИИП»
644071, г. Омск, ул. Масленникова, 231
crystal@oniip.ru

Приводятся последние достижения в области разработок и производства кварцевых резонаторов. Приведены физические ограничения параметров, достижимых в кварцевых генераторах, и способы их улучшения.
Ключевые слова: кварцевый генератор; фазовые шумы; стабильность частоты; термокомпенсация; термостатирование.

Стабильность частоты в 40-е годы XX века составляла $2 \cdot 10^{-4}$, затем во всем мире начинается бурный рост и развитие данного направления, к 2000-му году стабильность достигает $1 \cdot 10^{-10}$ и при определенных условиях в наше время может достигать $1 \cdot 10^{-11}$ [1]. Имеется ввиду температурная стабильность, то есть относительное изменение частоты от изменения температуры среды. Различают также кратковременную стабильность, которая обычно измеряется за время от 0,1 до 10 секунд, и долговременную, которая измеряется за сутки, месяц, год и за весь срок работы генератора.

На текущее время стабильность кварцевых генераторов и их миниатюризация еще не достигли физических ограничений [2]. Но развитие данного направления идет неспешно, так как в большинстве случаев нецелесообразно с экономической точки зрения обеспечивать высокую стабильность в таких изделиях. Легче изготовить относительно простой кварцевый генератор и подстраивать его частоту, опираясь на сигналы глобальных навигационных спутниковых систем или атомных стандартов. Однако в плане достижения фазовых шумов и кратковременной нестабильности частоты лучше кварцевых генераторов в настоящее время ничего не существует. Поэтому кварцевые генераторы актуальны и выпускаются в больших объемах. Например, современные автомобили высокого класса имеют на борту до 100 кварцевых генераторов. Это касается термокомпенсированных и простых тактовых генераторов со стабильность от $0{,}1 \cdot 10^{-6}$ до $50 \cdot 10^{-6}$.

Потребность в более стабильных генераторах меньше. Они, как правило, реализованы термостатированием резонатора и используются в базовых станциях связи, высокоточных навигационных системах, радиолокационных станциях и измерительных приборах. Долговременная и температурная стабильность частоты таких генераторов варьируется от $1 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^{-7}$. Кратковременная стабильность таких генераторов за 1 секунду может быть лучше $1 \cdot 10^{-13}$, и она лучше всего описывается графиком фазовых шумов.

Единица измерения спектральной плотности мощности фазовых шумов — дБн/Гц, это мощность шума, сосредоточенного в полосе 1 Гц на заданной отстройке от несущей, отнесенная к полной мощности несущей. Фазовые шумы при ближних отстройках 0,1–100 Гц, как правило, определяются добротностью и качеством резонансного колебательного контура генератора, в нашем случае — кварцевым резонатором. При отстройках 100 Гц и выше — схемой, ее тепловыми шумами. Лучшие образцы генераторов достигают уровня фазовых шумов до минус 150 дБн/Гц

при отстройке 10 Гц и до −190 дБн/Гц при отстройках 100 кГц и выше. Эти данные хорошо соотносятся с результатами расчетов [3].

В заключение стоит отметить, что термостатированные генераторы, выпускаемые в России, ничем не уступают по качеству и характеристикам лучшим импортным образцам [4] и часто идут на экспорт. Обратная ситуация с простыми тактовыми и термокомпенсированными генераторами. Для их производства требуется высокая автоматизация, и в их составе используются специализированные микросхемы. Данные микросхемы российского производства сильно уступают по качеству импортным, и уровень автоматизации российских производств ниже. Учитывая большой объем потребления таких генераторов, актуальной является задача разработки и локализации производства таких микросхем.

Литература

1. Vig J. R. Quartz crystal resonators and oscillators. For frequency control and timing applications: A tutorial // USA, NS: Development & Engineering Center Fort Monmouth, 2000. 493 p.
2. Vig J. R., Walls F. L. Fundamental limits on the frequency instabilities of quartz crystal oscillators // Proceedings of IEEE 48th Annual Symposium on Frequency Control, 1994.
3. Ложников А. О., Лепетаев А. Н. Анализ фазовых шумов генераторов на основе расчета предельных уровней возбуждения кварцевых резонаторов различных срезов // Техника радиосвязи, 2020. — Вып. 3 (46).
4. Ложников А. О. Перспективные образцы кварцевых и СВЧ-генераторов для ответственных применений // Наноиндустрия, 2021. — Вып. S7 (107).

УДК 538.945

Наноэлектроника на сверхпроводниках — челлендж или альтернатива

Пугач Н. Г.[1], к. ф.-м. н., Лекомцев Н. В. [1], Львов Б. Г.[1], д. т. н., Екомасов Е. Г.[2,3], д. ф.-м. н.

[1] Научно-исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
pugach@hse.ru
[2] Уфимский университет науки и технологий
450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32
[3] Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы
450008, г. Уфа, ул. Октябрьской революции, 3-а

Быстро развивающееся направление сверхпроводниковой наноэлектроники, как часть наноэлектроники квантовых систем, призвано решать следующие задачи: энергосбережение, миниатюризация элементов, их быстродействие и, наконец, обеспечение работы принципиально нового типа устройств — квантовой логики.

Ключевые слова: сверхпроводимость; контакт Джозефсона; кубит; сверхпроводниковая электроника.

Одним из подходов к решению проблем энергосбережения и быстродействия современных наноэлектронных устройств после насыщения закона Мура видится переход от использования десятилетиями отработанных методов КМОП (комплементарная структура металл — оксид — полупроводник) на сверхпроводящие материалы.

Наноэлектроника на сверхпроводниках является новой перспективной областью электроники квантовых систем, которая появилась в конце XX века и активно развивается в последние годы. Сверхпроводимость обеспечивает макроскопические квантовые явления, такие как эффекты близости и Джозефсона. Это открывает привлекательную возможность реализации электронных устройств, работающих на квантовых принципах, при современном уровне развития нанотехнологии [1].

Законы квантового мира отличаются от классических, соотношения Джозефсона отличны от закона Ома, так и устройства сверхпроводниковой наноэлектроники принципиально отличаются от традиционных для КМОП-технологии. Это создает новый функционал таких устройств, включая квантовые компьютеры и симуляторы, а также искусственные нейросети [2]. Одни из основных механизмов работы их элементов базируются на использовании переноса кванта магнитного потока для хранения и обработки информации, реализованного в сверхпроводящих контурах при низкой температуре.

Эта новая область призвана решать следующие задачи: энергосбережение, миниатюризация элементов, их быстродействие и, наконец, обеспечение работы принципиально нового типа устройств — квантовой логики. Будет дан обзор существующих направлений развития сверхпроводниковой наноэлектроники, включая магнитную память, джозефсоновскую логику, кубиты и квантовые компьютеры. Основными хорошо разработанными на сегодняшний день элементами сверхпроводниковой спинтроники являются сверхпроводящие спиновые вентили. Будет

дан обзор этих разработок [3]. Будут обсуждаться перспективы и проблемы их применения в качестве совместимой магнитной памяти для сверхпроводниковых классических и квантовых логических устройств. В заключение расскажу о нашей последней разработке — сверхпроводниковых спиновых вентилях нового типа [4].

Работа выполнена при поддержке проекта «Зеркальные лаборатории» НИУ ВШЭ и Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы «Квантовые эффекты в низкоразмерных гибридных наноструктурах».

Литература

1. Holmes S. D., Pugach N. et al. International roadmap for devices and systems. Cryogenic electronics and quantum information processing. 2018 Update // IEEE USA, 2019. 67 p.
2. Скуратов М. И., Пугач Н. Г., Екомасов Е. Г., Львов Б. Г. Искусственные нейронные сети: базовые принципы и возможные реализации // Известия Уфимского научного центра РАН, 2022. — № 4. — С. 5–11.
3. Пугач Н. Г., Селезнёв Д. В., Львов Б. Г. Сверхпроводящая спинтроника — перспективное направление криогенной наноэлектроники // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № S8-2 (113). — С. 572–573.
4. Pugach N., Safonchik M. O., Belotelov V., Ziman T., Champel T. Superconducting Spin Valves Based on a Single Spiral Magnetic Layer // Physical Review Applied, 2022. Vol. 18. № 5. Article 054002.

УДК 53.083.98

Контроль параметров процессов в технологическом цикле производства КМОП ИС

Волоховский А. Д.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org

В докладе приводится ряд базовых понятий, таких как объект измерения и его модель, границы допуска и контрольные границы, неопределенность измерения. Также доклад познакомит слушателей с методиками измерения, используемыми в технологическом цикле производства КМОП ИС, и методами статистического анализа обработки результатов.
Ключевые слова: интегральная схема; технологический процесс; контроль технологических процессов; микроэлектроника.

Процесс измерения может быть представлен операцией

Модель процесса ⊗ Модель структуры → Результат измерения,

где параметр «Модель процесса» представляет модель измерительной операции, а «Модель структуры» — это модель описания измеряемой структуры. Модель измеряемой структуры необходимо выбирать так, чтобы определить объект измерения таким образом, как он нас интересует, и не учитывать те детали, которые являются неизвестными, незначительными либо являются слишком сложными для рассмотрения.

Ошибка измерения — это разница между результатом измерения и неизвестным настоящим значением. Неопределенность измерения есть доверительный интервал, представляющий дисперсию ошибок измерения. Неопределенность вызвана флуктуациями случайных параметров. Причины возникновения данных ошибок неизвестны либо неконтролируемы, так как в противном случае их можно было бы исключить.

Результат измерения есть вероятностное распределение случайных величин, которые можно охарактеризовать через среднее значение и дисперсию.

Тогда существует вероятность p_1, которая меньше единицы, что измерение элемента, попавшее в границы допуска, на самом деле попало в границы допуска, и вероятность $(1 - p_1)$, что не попало. Аналогично существует вероятность p_2, что измерение элемента, не попавшее в границы допуска, на самом деле не попало в границы допуска, и вероятность $(1 - p_2)$, что попало.

Предположим, что измерение производилось в целях проверки, удовлетворяет ли объект спецификации заказчика. Тогда существует стоимость c_{12} отгрузки несоответствующего спецификации объекта и стоимость c_{21} забракования объекта, который соответствует спецификации. Очевидно, $c_{21} < c_{12}$. Стоимость забракования несоответствующего объекта еще меньше, и стоимость поставки объекта, соответствующего спецификации, равна нулю. В общем, существует стоимость c_{ij} действия над объектом i при условии, что он относится к категории измеряемого результата j, и p_j — вероятность того, что объект действительно принадлежит к категории j. При этом суммарная вероятность по всем категориям должна равняться единице:

$$\sum p_j = 1 .$$

Тогда ожидаемая стоимость действия *i* будет равна

$$C_i = \sum c_{ij} p_j .$$

В табл. 1 приведены соотношения для случая решения о поставке/непоставке объекта на основе результата измерения. На рис. 1 графически изображены вероятности *p* и (1 – *p*).

Таблица 1. Ожидаемая стоимость принятия решения на основе данных измерения с достоверностью *p*

Действие, *i*	Стоимость действия, c_{ij}, при условии		Ожидаемая стоимость действия, C_i
	объект на самом деле соответствует спецификации	объект на самом деле не соответствует спецификации	
Поставка	c_{11}	c_{12}	$p\,c_{11} + (1-p)\,c_{12}$
Забракование	c_{21}	c_{22}	$p\,c_{21} + (1-p)\,c_{22}$

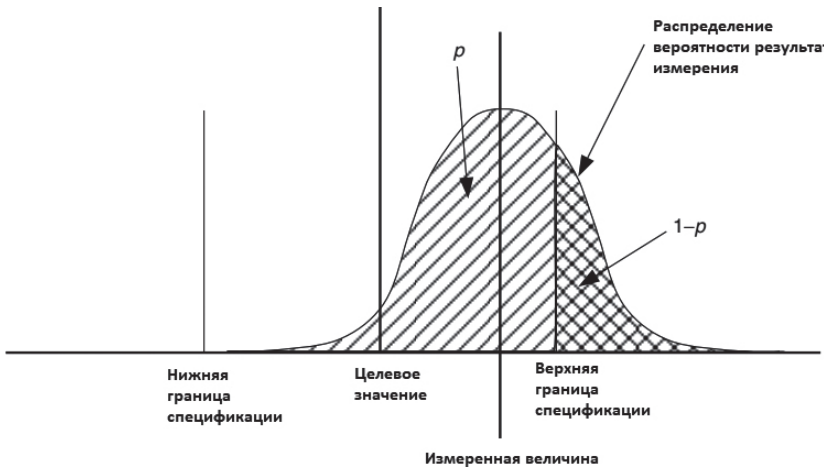


Рис. 1. Соотношения между целевым значением измеряемой величины, границами спецификации и распределением вероятности результата измерения

Для многих продуктов стоимость поставки некачественного продукта c_{12} выше остальных. Также само измерение имеет стоимость c_0 независимо от его результата. Тогда суммарная ожидаемая стоимость измерительной операции C_{NET} равна

$$C_{NET} = C_i + c_0.$$

Расширенная неопределенность *U* измерения прямо пропорциональна стандартному отклонению вероятностного распределения:

$$U = k\sqrt{var(x)}\,,$$

где k — константа, выбираемая из таблицы для необходимого доверительного интервала, а $var(x)$ — дисперсия распределения вероятности величины x. Неопределенность измерения может быть снижена путем направления дополнительных ресурсов на выполнение измерительной операции, например, путем перехода на более точный и дорогостоящий тип средства измерения. Таким образом, стоимость измерительной операции c_0 тем выше, чем ниже неопределенность измерения:

$$c_0 \propto 1/U.$$

В производственном цикле проведение измерения имеет смысл, если стоимость полученных данных превосходит стоимость проведения измерения. Целью измерения является определение того, какое действие приведет к минимизации полной ожидаемой стоимости ($C_i + c_0$).

В докладе будет также приведен обзор методов, применяемых в технологическом цикле производства КМОП ИС для измерения толщин, линейных размеров, концентраций и других технологических параметров, а также краткий обзор методов статистической обработки полученных данных.

УДК 621.3.049

Исследование процессов дефектообразования в эпитаксиальных гетероструктурах методами высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии

Фалеев Н. Н.[1], Maros A.[2], Zhang C.[2], Gangopadhyay A.[3], Smith D. J.[4], Honsberg C. B.[2]

[1] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
nfaleev@mail.ioffe.ru
[2] School of Electrical, Computer and Energy Engineering, Arizona State University Tempe, AZ 85287, USA
[3] School for Engineering of Matter, Transport and Energy, Arizona State University Tempe, AZ, 85287, USA
[4] Department of Physics, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA

Высокоразрешающими методами рентгеновской дифрактометрии (РД) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) исследованы процессы дефектообразования в эпитаксиальных гетероструктурах различного типа. Показано, что механизм формирования и взаимодействия дефектов в объеме эпитаксиальных структур определяется структурой интерфейсов, формируемой на начальной стадии роста.

Ключевые слова: высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия; просвечивающая электронная микроскопия; эпитаксиальные гетероструктуры; кристаллические дефекты.

Кристаллические дефекты в гетероэпитаксиальных структурах и механизм их формирования являются серьезной проблемой в силу большого влияния дефектов на физические параметры будущих приборов. Механизм формирования дефектов в процессе роста систематически не исследован, объяснение наблюдаемых эффектов в рамках классической термодинамики некорректно и требует дополнительной проработки.

Структурные исследования полярных/полярных {(GaAs-GaAsSb-GaAs(001)} [1–3] и полярных/неполярных GaP-Si(001) [4] гетероструктур выявили общие структурные закономерности и отличия механизмов формирования дефектов.

Процесс релаксации проходит в три этапа: начальный — докритический медленный, лавинный — быстрый и финальный — посткритический медленный. Графики показывают изменение степени релаксации в слоях и плотности винтовых дислокационных сегментов в объеме эпитаксиальных слоев.

Начальная стадия роста — релаксация 1–3 %, низкая плотность дислокаций в структурах (max ~ 10^4/cm). Вследствие квантовомеханической природы дефектообразования вероятность появления дислокаций и начала релаксации есть величина малая, но конечная. (Пример — *туннельный переход в полупроводниках*.) При этом незначительное отличие энергии образования дислокаций в плоскостях {110} и {1–10} может привести к заметному различию плотности дислокаций (~ в пять

раз в пол./пол. структурах). Образование дефектов не приводит к существенному разрушению кристаллического совершенства структур и потере пространственной когерентности слоев. Переход от начальной к лавинной стадии роста, от одноосной анизотропии к изотропно напряженной проходит через формирование доменной структуры в объеме слоя.

Лавинная стадия роста — достижение критической толщины слоя, экспоненциальное увеличение плотности дислокаций, стабилизация упругой энергии слоя на критическом уровне, формирование единого деформационного поля и разрушение пространственной когерентности в объеме слоя. Критическую толщину слоя следует определить как толщину, при которой начинается лавинное образование дефектов и резко растет релаксация упругой деформации в слое.

Финальная стадия роста — уменьшение упругой энергии слоя, замедление процесса дефектообразования. В пол./пол. структурах уменьшение объемной упругой деформации слоев является следствием *компенсационного взаимодействия винтовых компонент 60° дислокаций в объеме слоев. Формируются устойчивые дислокационные пары по типу дислокаций Ломера в сильнорассогласованных структурах.*

Структура интерфейсов влияет на тип, плотность и взаимодействие дефектов. В исследованных пол./пол. структурах локализация основных дефектов (60° диссоциированные дислокации) на интерфейсах допускает пространственное перекрытие и взаимодействие их деформационных полей в процессе роста.

В пол./непол. структурах дефекты случайным образом распределены в объеме слоев, взаимодействие в объеме незначительно, компенсационного эффекта нет. Дислокации несоответствия образуются при взаимодействии прорастающих линейных дефектов: доменных стенок, дефектов упаковки/микродвойников, образовавшихся на интерфейсе на ранней стадии роста.

Литература

1. Maros A., Faleev N., King R. R., Honsberg C. B., Convey D., Xie H., Ponce F. A. Critical thickness investigation of MBE-grown GaInAs/GaAs and GaAsSb/GaAs heterostructures // J. Vac. Sci. Technol. B 34, 02L113 (2016); DOI: 10.1116/1.4942897.
2. Gangopadhyay A., Maros A., Faleev N., Smith D. J. Atomic structure of dissociated 60° dislocations in GaAs/$GaAs_{0.92}Sb_{0.08}$/GaAs heterostructures // Scripta Materialia, 153 (2018), 77–80.
3. Gangopadhyay A., Maros A., Faleev N., Smith D. J. Strain relaxation in low-mismatched GaAs/GaAs1-xSbx/GaAs heterostructures // Acta Materialia, 162 (2019), 103–115.
4. Zhang C., Boley A., Faleev N., Smith D. J., Honsberg C. B. Investigation of defect creation in GaP/Si(0 0 1) epitaxial structures // Journal of Crystal Growth, 503 (2018), 36–44.

УДК 621.3.049

Магнитная память с произвольным доступом к данным, управляемая с помощью зарядовых токов, SOT-MRAM

К. ф.-м. н. Давыденко А. В., к. ф.-м. н. Козлов А. Г., Базров М. А., Намсараев Ж. Ж., Летушев М. Е., Черноусов Н. Н., Турпак А. А.
ДВФУ, Лаборатория пленочных технологий
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
davydenko.av@dvfu.ru

Приведены физические принципы работы устройств записи информации, основанных на изменении магнитного состояния наносистем вследствие переноса углового момента от кристаллической решетки слоев с сильным спин-орбитальным взаимодействием в магнитные слои с помощью электронов проводимости (spin-orbit torque или SOT-эффект).

Ключевые слова: магнитная память с произвольным доступом к данным; сдвиговая магнитная память; перенос углового момента током.

На сегодняшний день человечеству требуется хранить и оперировать все большими объемами информации. Постоянно идет поиск новых типов памяти, сочетающих в себе высокое быстродействие, энергоэффективность, энергонезависимость и экономическую рентабельность. Потенциальными кандидатами на замещение существующей оперативной и кеш-памяти являются магнитные типы памяти с произвольным доступом к данным, основанные на SOT-эффекте (SOT-MRAM) [1].

Метод управления намагниченностью с помощью SOT-эффекта превосходит другие (перенос углового момента от тока, проходящего сквозь магнитные слои, — STT-эффект и поле Эрстеда) по скорости, эффективности, долговечности и универсальности, что делает его привлекательным с научной и промышленной точек зрения. Тем не менее в настоящее время устройства SOT все еще страдают от:

1) высокого энергопотребления;
2) требования наличия продольного магнитного поля;
3) проблем совместимости с существующими технологиями изготовления электронных устройств.

Для решения вышеперечисленных проблем производится поиск новых материалов и систем материалов, обладающих большим значением SOT-эффективности. При этом устройства должны демонстрировать бесполевое перемагничивание под действием импульсов тока.

Рассмотрены перспективные материалы и системы материалов в качестве источников спиновых токов в устройствах SOT-MRAM. Приведены подходы, позволяющие реализовать бесполевое переключение намагниченности в SOT-MRAM. Обсуждено потенциальное применение SOT-эффекта в различных устройствах: MRAM, сдвиговой магнитной памяти, приборах магнитной логики и нейроморфных вычислителях. Указаны проблемы, возникающие при масштабировании магнитных элементов до латеральных размеров, соответствующих десяткам нанометров.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России по государственному заданию (проект № FZNS-2023-0012).

Литература

1. Zhu L. Switching of Perpendicular Magnetization by Spin–Orbit Torque // Advanced Materials, 2023. Vol. 35. P. 2300853.

УДК 004.8, 004.31

Перспективы развития нейроморфных процессоров для систем искусственного интеллекта

Логунов М. В.[1,2]
[1] *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН*
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
loginov@cplire.ru
[2] *Московский физико-технический институт*
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В докладе рассмотрены задачи, для решения которых необходимы системы искусственного интеллекта, а также современное состояние и перспективы развития нейроморфных процессоров для таких систем.
Ключевые слова: системы искусственного интеллекта; нейроморфные процессоры.

Значительный прогресс, достигнутый в последние годы в области развития систем искусственного интеллекта, оказывает все возрастающее влияние не только на развитие информационных технологий и на многие отрасли промышленности, но и в целом на развитие общества. В данном докладе рассмотрены задачи, для решения которых необходимы системы искусственного интеллекта, а также современное состояние и перспективы развития нейроморфных процессоров для таких систем [1–5]:

- производство процессоров на базе кремниевой микроэлектроники с архитектурой, адаптированной к эффективному выполнению нейроморфных вычислений;
- готовность к производству процессоров на базе кремниевой микроэлектроники с технологией прямой интеграции энергонезависимой быстродействующей магнитной памяти в архитектуру процессора;
- разработка и пилотные образцы магниторезистивной оперативной памяти со случайным доступом, в которой функции энергонезависимого хранения данных и вычислений в оперативной памяти объединены в одной микросхеме;
- перспективные разработки нейроморфных процессоров на основе эффектов спинтроники и интерфейсов спин-фотоники в целях многократного повышения энергоэффективности и быстродействия систем искусственного интеллекта.

Литература

1. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. Том 1. — Вильямс, 2021. — 704 с.
2. Processing-in-Memory for Al. From Circuits to Systems / Editors: J.-Y. Kim, B. Kim, T. T.-H. Kim // Springer, 2023. 165 p.
3. Yusuf A., Adegbija T., Gaiaria D. Domain-Specific STT-MRAM-Based In-Memory Computing: A Survey // IEEE Access, 2024. Vol. 12. P. 28036.

4. Вилков Е.А., Сафонов С.С., Темирязев А.Г. и др. Исследование свойств магнитооптических пленок и пленочных наноструктур для интегрально-оптических невзаимных устройств межсоединений верхнего уровня УБИС // Вестник РФФИ, 2023. — № 2 (118). — С. 141–151.
5. Zhang Y., Feng X., Zheng Z. et al. Ferrimagnets for spintronic devices: From materials to applications // Applied Physics Reviews, 2023. Vol. 10. P. 011301.

УДК 681.5.015

Интервальные модели динамических систем

К. ф.-м. н. Морозов А. Ю., д. ф.-м. н. Абгарян К. К., д. ф.-м. н. Ревизников Д. Л.
ФИЦ ИУ РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2
morozov@infway.ru, kristal83@mail.ru, reviznikov@gmail.com

При решении различных прикладных и исследовательских задач часто возникают ситуации, когда какие-либо данные точно неизвестны, но есть информация о диапазонах, в которых находятся их значения. Подобные задачи нередко встречаются в области моделирования электронных компонентов, которые могут быть описаны динамическими системами с интервальными параметрами. В частности, яркими представителями в этой области являются мемристоры, так как их характеристики могут отличаться от измерения к измерению, от экземпляра к экземпляру и т.д. В работе представляется подход к моделированию динамических систем, который позволяет получить ограничения сверху и снизу на интересующие величины.
Ключевые слова: алгоритм адаптивной интерполяции; интервальная параметрическая идентификация; интервальные модели; мемристор.

Для задач с неопределенностями актуально получение интервальных оценок интересующих величин по известным исходным интервальным данным. Применительно к прямым задачам речь идет о нахождении интервальных оценок решения по интервальным значениям параметров, а применительно к обратным задачам — об определении интервальных оценок параметров, при которых соответствующее интервальное решение содержало бы в себе экспериментальные данные. Разработанный подход основан на адаптивной интерполяции с использованием kd-деревьев [1], разреженных сеток [2] и тензорных поездов [3]. Данный подход позволяет получить в явном виде зависимость решения прямой задачи от значений параметров из заданных интервалов с контролируемой точностью. С помощью предложенного подхода решен ряд актуальных прикладных и исследовательских задач с интервальными параметрами из области вычислительного материаловедения, химической кинетики, небесной механики, микроэлектроники и других областей, включая задачи, содержащие дробно-дифференциальные уравнения с интервальными параметрами в показателях производных, и задачи моделирования динамических систем, в которых имеют место бифуркации и динамический хаос.

Наиболее ярким примером из области микроэлектроники является задача моделирования мемристивных элементов с учетом разброса их вольт-амперных характеристик. Большинство известных компактных моделей мемристора сформулированы в виде динамической системы относительно параметра состояния мемристора. Параметр состояния мемристора — это величина, которая соответствует положению границы, разделяющей области с низкой и высокой концентрацией вакансий кислорода, толщине проводящего слоя или толщине непроводящего барьера, в котором возникает туннельный ток электронов.

Согласно экспериментальным данным, характер функционирования мемристоров является отчасти стохастическим, о чем свидетельствует разброс в вольт-амперных характеристиках в процессе переключения из высокоомного состояния

в низкоомное состояние и наоборот. Зачастую существующие математические модели мемристоров не в полной мере воспроизводят эксперимент.

Можно использовать интервальный аппарат для учета разброса характеристик элементов [4]. Идея заключается в добавлении в математическую модель интервальных параметров. В этом случае результатом имитационного моделирования в каждый момент времени будут являться интервальные оценки фазовых переменных. Значения интервальных параметров подбираются таким образом, что полученные оценки полностью содержат экспериментальные данные. Для этого строится целевая функция (и ее градиент) в пространстве границ интервальных параметров модели, характеризующая отклонение модельных интервальных оценок фазовых переменных от экспериментальных данных, и выполняется ее минимизация [5].

В контексте моделирования мемристивных элементов зависимость тока от параметра состояния и приложенного к элементу напряжения может быть довольно сложной, и за счет правильного выбора соответствующего аппроксиматора, включающего интервальные параметры, можно добиться хорошего согласования модели и эксперимента [6].

К ключевым особенностям предложенного подхода относится то, что он позволяет получить модели, которые дают ограничения сверху и снизу на интересующие величины. Эффективность подхода продемонстрирована на задаче распознавания изображений с помощью аналоговой нейроморфной системы на основе мемристорного кроссбара, в котором содержалось порядка 80 000 мемристоров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-91-01012).

Литература

1. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Алгоритм адаптивной интерполяции на основе kd-дерева для численного интегрирования систем ОДУ с интервальными начальными условиями // Дифференциальные уравнения, 2018. — Т. 54. — № 7. — С. 963–974. DOI: 10.1134/S0374064118070130.
2. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Алгоритм адаптивной интерполяции на разреженных сетках для численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений с интервальными неопределенностями // Дифференциальные уравнения, 2021. — Т. 57. — № 7. — С. 976–987. DOI: 10.31857/S0374064121070104.
3. Гидаспов В. Ю., Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Алгоритм адаптивной интерполяции с использованием TT-разложения для моделирования динамических систем с интервальными параметрами // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2021. — Т. 6. — № 9. — С. 1416–1430. DOI: 10.31857/S0044466921090106.
4. Morozov A. Yu., Abgaryan K. K., Reviznikov D. L. Interval Model of a Memristor Crossbar Network // Physica status solidi (b), 2022. Vol. 269. Is. 11. 2200150.
5. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Алгоритм подвижного окна для параметрической идентификации динамических систем с прямоугольными и эллипсоидными областями неопределенности параметров // Дифференциальные уравнения, 2023. — Т. 59. — № 6. — С. 814–827. DOI: 10.31857/S0374064123060110.
6. Abgaryan K. K., Morozov A. Yu., Reviznikov D. L. Hybrid Approach for Modeling Memristive Elements // Physica status solidi (b), 2024. 2400058.

УДК 621.38:57.08

Новые подходы к созданию компонентов для биоэлектроники

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
gerasimenko@bms.zone

Разработаны новые подходы и материалы для создания биоэлектронных компонентов. Приведены результаты моделирования и формирования углеродных наноматериалов с управляемыми структурными, механическими и электрофизическими характеристиками для изготовления электропроводящих топологий в интегральных схемах, полевых катодов, стимуляторов электрогенных клеток и тканей, а также кардиоимплантатов.
Ключевые слова: нанокомпозиты; углеродные каркасные наноматериалы; гибкая электроника; диагностика; терапия.

Ввиду нарастающего развития электронной компонентной базы возникает необходимость разработки новых материалов и подходов формирования топологий. В последнее время электронные приборы широко используются в медицине для диагностики и терапии социально значимых заболеваний. Особенно активно развивается имплантируемая миниатюрная микроэлектроника. Однако в настоящий момент традиционные твердотельные микроэлектронные технологии сталкиваются с проблемой несовместимости кремниевых чипов с биологическими тканями организма. К основным перспективным материалам для современных электронных компонентов относятся аллотропные формы наноуглерода — нанотрубки и графен, структурные свойства которых обеспечивают управляемые электрофизические, оптические и механические свойства [1]. Обе формы наноуглерода способны выдерживать высокие плотности тока ~10^9 А/см^2, высокую теплопроводность на уровне 5300 Вт/м·К и обладают высокой прочностью и жесткостью (модуль Юнга 1,0 ТПа и предел прочности 130 ГПа). Такие характеристики углеродных нанотрубок и графена делают их многообещающими кандидатами не только для функциональных компонентов твердотельной электроники, но и для создания гибких тонкопленочных транзисторов, электропроводников, накопителей энергии, которые превосходят кремниевую электронику.

На основе выявленных особенностей взаимодействия углеродных нанотрубок и графена с лазерным излучением предложен новый подход к изготовлению кремниевых электронных и биоэлектронных устройств. Подход основан на том, что одномерные и двумерные углеродные наноматериалы, к которым относятся углеродные нанотрубки и графен, за счет малого размера и особенной структуры в виде моноатомных слоев с ковалентно связанными атомами в гексогональные кольца имеют большую величину удельной поверхности при значительной гибкости и прочности. Углеродные наноматериалы могут проявлять полупроводниковые или металлические свойства с высокой подвижностью заряда и регулируемой электропроводностью. Такими же свойствами может быть наделен трехмерный

биосовместимый материал на основе наноструктур из углеродных нанотрубок, графена и их гибридов в полимерной или биополимерной матрице. Лазерное излучение стимулирует образование контактов между нанотрубками и графен-нанотрубных контактов, что приводит к созданию новых электропроводящих конструкций для создания полевых автоэмиссионных катодов, межсоединений с различными топологиями для интегральных схем, тензодатчиков для детектирования движений, интерфейсов для электростимуляции роста клеток и электропроводящих тканеинженерных конструкций и других компонентов [2–6].

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект FSMR-2024-0003).

Литература

1. Pyo S., Eun Y., Sim J. et al. Carbon nanotube-graphene hybrids for soft electronics, sensor. and actuators // Micro and Nano Syst Lett., 2022. Vol. 10. № 9.
2. Gerasimenko A. Yu. et al. Hybrid Carbon Nanotubes–Graphene Nanostructures: Modeling, Formation, Characterization // Nanomaterials, 2022. Vol. 12. № 16. P. 2812.
3. Slepchenkov M. M., Gerasimenko A. Yu., Kuksin A. V. et al. Electrophysical properties of laser-structured carbon nanomaterials functionalized with LaB6 nanoparticles // Diamond and Related Materials, 2023. Vol. 140. P. 110512.
4. Nikitina N. A., Ryabkin D. I., Suchkova V. V., Kuksin A. V., Selishchev S. V., Gerasimenko A. Yu. et al. Laser-Formed Sensors with Electrically Conductive MWCNT Networks for Gesture Recognition Applications // Micromachines, 2023. Vol. 14. № 6. P. 1106.
5. Gerasimenko A. Yu. et al. Interfaces Based on Laser-Structured Arrays of Carbon Nanotubes with Albumin for Electrical Stimulation of Heart Cell Growth // Polymers, 2022. Vol. 14. № 9. P. 1866.
6. Gerasimenko A. Yu. et al. Laser fabrication of composite layers from biopolymers with branched 3D networks of single-walled carbon nanotubes for cardiovascular implants // Composite Structures, 2021. Vol. 260. P. 113517.

УДК 537.9

Сверхгибкая сегнетоэлектрическая память на биосовместимой платформе

К. ф.-м. н. Чуприк А. А.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
chouprik.aa@mipt.ru

В работе представлены результаты разработки сверхгибких и растяжимых устройств памяти на основе пленки $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ толщиной 10 нм, изготовленных по технологии, предусматривающей инкапсуляцию устройств в упаковку из биосовместимого органического материала (полиимида). Устройства демонстрируют высокие механические и электрические характеристики. Результаты экспериментального исследования влияния механических напряжений на функциональные свойства подтверждены теоретическими расчетами.
Ключевые слова: гибкая электроника; энергонезависимая память; сегнетоэлектрическая память; оксид гафния.

Гибкая электроника обладает большим потенциалом для изменения жизни человека в сторону большего удобства и здоровья. Значительные усилия направлены на разработку технологий и устройств для гибких гаджетов, электронного текстиля, носимых устройств и ряда приложений для здравоохранения, включая медицинские датчики, размещаемые на коже человека, и медицинские имплантируемые устройства [1]. Следующее поколение медицинских и носимых электронных устройств, непосредственно контактирующих с телом человека, требует разработки гибких активных элементов на биосовместимой платформе, потенциально микроконтроллеров, включая энергонезависимую память для хранения данных. В настоящее время рассматривается несколько концепций гибкой энергонезависимой памяти. Одними из наиболее привлекательных концепций являются сегнетоэлектрические запоминающие устройства благодаря их высокой скорости, низкому энергопотреблению и высокому ресурсу.

Тонкие поликристаллические сегнетоэлектрические пленки HfO_2 имеют большой потенциал для разработки гибких сегнетоэлектрических запоминающих устройств, поскольку они обладают сегнетоэлектрическими свойствами, будучи очень тонкими (4–30 нм) [2], и, следовательно, ожидается, что при изгибе внутренние механические напряжения должны быть малы. В данной работе продемонстрированы сверхгибкие и растяжимые устройства памяти на основе пленки $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ толщиной 10 нм, изготовленные по инновационной технологии, предусматривающей инкапсуляцию устройств в упаковку из биосовместимого органического материала (полиимида) [3]. Устройства демонстрируют большое окно памяти (остаточная поляризация 27 мкКл/см^2) и выдерживают экстремальные механические условия, включая складывание пополам (радиус изгиба 0,5 мм), многократный изгиб до 150 000 циклов изгиба и более, растяжение с нагрузкой до 1,5 кг и не менее 900 циклов растяжения. Далее данные гибкие устройства были использованы в качестве платформы для исследования фундаментальной роли механического напряжения в природе сегнетоэлектричества в оксиде гафния как экспериментально, так

и теоретическим путем. Прямой *in situ* эксперимент показал, что механическое напряжение вызывает обратимые изменения спонтанной поляризации, коэрцитивного напряжения, диэлектрической проницаемости и проводимости. С помощью теоретических квантовомеханических расчетов была установлена роль механического напряжения в сегнетоэлектрических и диэлектрических свойствах оксида гафния.

В прикладном плане данная работа может заложить основу для реализации биосовместимой высокопроизводительной гибкой сегнетоэлектрической памяти, а в области фундаментальных основ сегнетоэлектрических материалов она позволяет понять критическую роль остаточного механического напряжения, неизбежно присутствующего в тонких сегнетоэлектрических пленках.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00370, https://rscf.ru/project/20-19-00370/).

Литература

1. Herbert R., Kim J.-H., Kim Y. S., Lee H. M., Yeo W.-H. Soft material-enabled, flexible hybrid electronics for medicine, healthcar. and human-machine interfaces // Materials, 2018. Vol. 11. P. 187.
2. Böscke T. S. et al. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films // Applied Physics Letters, 2011. Vol. 99. № 10.
3. Chouprik A., Mikheev V., Margolin I., Kalika E., Spiridonov M., Negrov D. Superflexible and Stretchable Ferroelectric Memory on a Biocompatible Platform // Advanced Electronic Materials, 2024. Vol. 10. № 2300449.

УДК 615.47:612.746.4

Распознавание и классификация паттерна физиологического тремора с помощью акселерометрии в системе анализа мышечного утомления и восстановления умного костюма Muscles.AI

Селезнева Л. Г.[1], Улыбин В. В.[2]
[1] ООО «Институт детской и взрослой неврологии и эпилепсии имени Святителя Луки»
119571, г. Москва, ул. Академика Анохина, 9
ludmila-2277@mail.ru
[2] ООО «МАСКЛ.АИ»
420500, г. Иннополис, ул. Университетская, 5, пом. 111
v.ulybin@gmail.com

Создана база данных физиологического тремора и разработана ML-модель, выполняющая распознавание и классификацию паттерна физиологического тремора верхних и нижних конечностей, измененного под влиянием физической нагрузки, в потоке данных нательного инерциального измерительного датчика.

Ключевые слова: мышечное утомление; тремор; инерциальная измерительная система; акселерометр; машинное обучение; носимые устройства; спорт высших достижений; реабилитация.

Отсутствие возможности объективно оценить мышечное утомление во время физических тренировок или двигательной реабилитации снижает их эффективность и повышает риски травматизма. Оценка утомления преимущественно субъективна, а методы объективной диагностики в основном сосредоточены на анализе напряжения кардиореспираторной системы. Применение умных аппаратно-технических систем с машинным анализом информации инерциальных измерительных систем актуально и имеет значительные преимущества в объективизации оценки движений человека и состояния его опорно-двигательного аппарата.

Мышечное утомление — распространенная причина усиления физиологического тремора во время и после физической нагрузки. Физиологический тремор визуально не определяется, но выявляется инструментально, имеет частоту 8–12 Гц, становится заметным при выполнении точных движений, длительном поддержании позы, стрессе, утомлении, гипертиреозе и приеме некоторых препаратов [1, 2].

Целью нашего исследования стала разработка ML-модели, выполняющей распознавание и классификацию паттерна тремора верхних и нижних конечностей в потоке данных нательного инерциального измерительного датчика: в статической нагрузке, в покое до и после нагрузки.

Практическая часть исследования включала регистрацию тремора IMU-сенсором на девять степеней свободы Bosch BMX055 согласно разработанному протоколу эксперимента и формирование базы данных физиологического тремора, получившей регистрацию Роспатента, анализ и препроцессинг данных тремора, разработку ML-моделей для решения задачи распознавания и классификации тремора.

Запись данных тремора осуществлялась в течение не менее 3 мин. в каждом из трех состояний с руки и с ноги. Место установки датчика на руке — на дистальной трети предплечья, на ноге — на дистальной трети голени. Целевой эффект физической нагрузки — достижение значительного утомления (не менее 5–6 баллов по модифицированной шкале Борга 0–10 баллов) и визуально — появление и усиление тремора конечности.

Выборка представлена 55 взрослыми условно здоровыми добровольцами (30 добровольцев имели регулярные физические нагрузки и 25 — тренировались нерегулярно).

Результатом работы стали классические ML-модели и сверточно-рекуррентная нейронная сеть, продемонстрировавшие точность около 80% классификации паттерна тремора верхних и нижних конечностей в покое до нагрузки, в нагруженном состоянии и после. Цель исследования достигнута созданием модели распознавания паттерна тремора в трех состояниях. Подтверждены гипотезы настоящего исследования:

- с помощью нательного инерциального измерительного датчика может быть выявлен паттерн тремора верхних и нижних конечностей. Частотные характеристики тремора, полученные с помощью нательного инерциального измерительного датчика, сопоставимы с имеющимися данными о физиологическом треморе в научных литературных источниках;
- физиологический тремор изменяется под влиянием мышечного утомления, что позволяет ML-модели эффективно классифицировать тремор.

Предложен алгоритм интерпретации классов тремора в оценке утомления и восстановления мышц после физической нагрузки в пользовательском приложении «Умный костюм»: измерение тремора в покое перед физической активностью, повторно между упражнениями и по завершении тренировки.

Состоятельность методов машинного обучения в распознавании тремора, изменяющегося при мышечном утомлении, подтверждает целесообразность проведения будущих исследований в целях разработки комплексной модели оценки утомления организма и выделения специфичных для разного уровня мышечного утомления характеристик тремора.

Литература

1. Bhatia K. P. et al. Consensus Statement on the classification of tremors. from the task force on tremor of the International Parkinson and Movement Disorder Society // Movement disorders, 2018. Vol. 33. № 1. P. 75–87.
2. Raethjen J. et al. Determinants of physiologic tremor in a large normal population // Clinical neurophysiology, 2000. Vol. 111. № 10. P. 1825–1837.

УДК 621.315.592

Преимущества и недостатки ВЧ и СВЧ методов регистрации спада фотопроводимости для определения рекомбинационного времени жизни носителей заряда в кремнии

Кобелева С. П.[1,2], Анфимов И. М.[2], Юрчук С. Ю.[1], Щемеров И. В.[1,2]
[1] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
[2] ООО «РИИС»
119049, г. Москва, Крымский вал, 3
kob@misis.ru

Рассмотрены принципы регистрации спада фотопроводимости в полупроводниковых материалах методами ВЧ и СВЧ для определения рекомбинационного времени жизни свободных носителей заряда в монокристаллическом кремнии. Показано, что емкостной ВЧ метод обладает рядом преимуществ, в первую очередь при регистрации больших (выше 1 мс) рекомбинационных времен.

Ключевые слова: монокристаллический кремний; спад фотопроводимости; рекомбинационное время свободных носителей заряда.

Введение

Рекомбинационное время жизни свободных носителей заряда (τ) в непрямозонных полупроводниках является уникальным параметром по величине которого можно судить о степени чистоты материала. Так в монокристаллическом кремнии при удельном электросопротивлении (ρ) выше 1 Ом см доминирует рекомбинация через глубокие центры, величина τ при этом обратно пропорциональна концентрации этих центров N_r. При $N_r \sim 10^{11}$ см$^{-3}$ $\tau \sim 10$ мкс и это дает уникальную возможность контролировать концентрации центров ниже 10^{11} см$^{-3}$ никакими другими методами не детектируемые, тем более в условиях промышленного производства. Поэтому τ является вторым марочным параметром для кремния и германия после ρ. Методов измерения τ много [1]. Для непрямозонных материалов с достаточно большими временами жизни (больше 10 мкс) предпочтительным являются методы, основанные на регистрации спада фотопроводимости (ФП). Они в свою очередь делятся на контактные и бесконтактные. Для производства используют бесконтактные методы, которые не требуют специальной подготовки образцов и создания омических контактов к образцам. В систему международных стандартов SEMI включен метод регистрации спада ФП СВЧ методом [2]. Метод регистрирует спад концентрации неравновесных носителей заряда, созданных импульсами засветки. Вторым бесконтактным методом является ВЧ метод, в котором регистрируется изменение проводимости образца при помещении образца в индуктивный или емкостной ВЧ контур. Индуктивный применяется для измерения образцов с $\rho < 100$ Ом см, т. е. для кремния, выращенного методом Чохральского, емткостной — для материала, выращенного методом БЗП. В работе анализируются емкостной ВЧ метод и СВЧ метод для анализа материалов с $\tau > 100$ мкс.

Факторы, влияющие на погрешность измерения рекомбинационного времени жизни

Главной проблемой при измерении τ по спаду ФП является влияние поверхностной рекомбинации на кривую спада. Релаксационная кривая будет представлять экспоненту с характерным параметром τ только при условии однородной генерации и отсутствии рекомбинации на поверхности. В связи с этим в [2] требуется измерять τ только на пассивированных образцах. Неоднородность генерации приводит к искажению начального участка кривой спада и стандарт рекомендует рассчитывать τ на второй половине релаксационной кривой. Учитывают поверхностную рекомбинацию как граничное условие при решении уравнения непрерывности, принимая, что на обоих гранях образца — освещенной и противоположной — поток носителей прямо пропорционален величине избыточной концентрации на поверхности. При этом коэффициент пропорциональности имеет размерность скорости и называется скоростью поверхностной рекомбинации S. Наличие поверхностной рекомбинации приводит к появлению «быстрых» экспонент, которые влияют на релаксационную кривую на первых этапах релаксации. Аналитическое решение уравнения непрерывности затруднено, в частности практически невозможно рассчитать вклад отдельных поверхностных экспонент, поэтому уравнение непрерывности в одномерном варианте решали численным методом [3]. Было показано, что на сколько долго будет заметен этот вклад зависит от степени однородности генерации. При этом существует максимальное значение «поверхностного» времени жизни τ_S, которое и приводят в учебниках для оценки вклада поверхностной рекомбинации [1]:

$$T_s = \frac{d^2}{\pi^2 D} + \frac{d}{2S} \quad \text{и} \quad \frac{1}{T_{эф}} = \frac{1}{T} + \frac{1}{T_s}, \tag{1}$$

где D — коэффициент диффузии неосновного носителя заряда в образце, d — толщина образца.

Формулы (1) описывают релаксационную кривую как в ВЧ, так и СВЧ установках, но возникает и общая проблема — на каком участке релаксационной кривой рассчитывать $\tau_{эф}$. Далее в работе используется рекомендация [2], где предложено рассчитывать $\tau_{эф}$ на участке от 45 до 5 % от начальной интенсивности сигнала спада ФП.

Существенным отличием ВЧ и СВЧ установок является наличие скин-слоя при поглощении СВЧ волны материалом, величина которого зависит как от частоты генерации СВЧ волны, так и от проводимости образца. Для частот генерации в 10–30 ГГц размер скин слоя для проводящих образцов может составлять миллиметры и если его размер сопоставим с диффузионной длиной L, это заметно искажает релаксационную кривую и приводит к занижению измеренных значений τ.

Существует два типа СВЧ детекторов для регистрации сигнала ФП. Первый, предложенный в [2], предполагает достаточно широкую площадку контакта образца с СВЧ-трактом. В [4, 5] предложен другой тип СВЧ детектора. Это детекторы т. н. кольцевого типа, в которых контакт образца с СВЧ-трактом ограничен достаточно узким, 3–5 мм размером кольцевого зазора, который дополнительно искажает сигнал в случае, когда L имеет тот же порядок величины. Это можно учесть при расчетах τ численными методами, но погрешность при этих оценках возрастает, в частности нельзя пользоваться формулами (1).

В ВЧ методе таких ограничений нет. До значений объемного τ порядка 500 мкс и толщин образцов в интервале до 5L для всех типов установок можно использовать (1), но при значениях выше 500 мкс в СВЧ установках погрешность расчетов объемного τ по (1) может превышать 20 %, что делает ВЧ метод, помимо более простой аппаратной реализации прибора, преимущественным.

Заключение

Для измерения τ в образцах с непассивированными поверхностями при толщинах образцов в интервале 1–5 диффузионных длин и τ выше 500 мкс ВЧ метод имеет преимущества, связанные с меньшим влиянием параметров ВЧ детекторов на результаты измерений релаксационной кривой.

Литература

1. Кобелева С. П. Методы измерения электрофизических параметров монокристаллического кремния. Ч. 2 // Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам, 2013. — № 8. — С. 15–27.
2. SEMI M F1535. Stantard Test Methods for Carrier Recombination Lifetime in Silicon Wafers by Noncontact Measurement of Photoconductivity Decay by Microwave Reflectance // SEMI annual book, 2007. P. 8274–8293.
3. Юрчук С. Ю., Кобелева С. П. Расчет профилей распределения фотогенерированных носителей заряда в полупроводнике и фотопроводимости // Свидетельство о гос. Регистрации программы ЭВМ № 2013612971 от 19 марта 2013 г.
4. Ахманаев В. Б., Лисюк Ю. В., Медведев Ю. В., Петров А. С. Измерение скорости поверхностной рекомбинации и времени жизни носителей заряда в полупроводниках бесконтактным СВЧ-резонаторным методом // Известия вузов. Физика, 1983. — Вып. 6. — С. 79.
5. Кобелева С. П., Анфимов И. М., Щемеров И. В. Прибор для измерения рекомбинационного времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках // Приборы и техника эксперимента, 2016. — № 3. — С. 91–95.

УДК 537.312.7

Влияние параметров атомно-слоевого осаждения на количество проводящих филаментов в мемристорных структурах на основе оксида гафния

Исаев А. Г.[1,2], Пермякова О. О.[1], к. ф.-м. н., Мягоньких А. В.[1], к. ф.-м. н., Рогожин А. Е.[1]

[1] Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
isaev.ag@phystech.edu
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

При помощи АСМ с измерением проводимости исследовался процесс резистивного переключения в структурах на основе оксида гафния, сформированных при различных параметрах ALD. Показано, что для различных типов ALD существует оптимальная температура осаждения, при которой число филаментов максимально.

Ключевые слова: мемристор; резистивное переключение; атомно-слоевое осаждение.

Резистивная память с произвольным доступом (ReRAM) [1] является одним из наиболее перспективных кандидатов на замену традиционных видов памяти, так как она потенциально позволит добиться большей плотности элементов при столь же высоких прочих характеристиках, таких как скорость чтения и записи, энергопотребление и время хранения информации. Такая память может быть реализована на основе мемристорных структур металл — диэлектрик — металл, в которых возможно резистивное переключение (РП), которое обычно происходит за счет образования проводящих филаментов в слое диэлектрика.

Оксид гафния — один из наиболее перспективных материалов для ReRAM, так как он достаточно хорошо изучен и обладает отличными характеристиками РП [1]. Однако в большинстве работ, посвященных РП, исследуются структуры площадью более 1 мкм², в то время как структуры в ReRAM не должны превышать 576 нм² [2]. Для исследования возможности масштабирования структур может применяться метод атомно-силовой микроскопии с измерением проводимости (ПАСМ) [3].

В данной работе оксид гафния толщиной 6 нм формировался при помощи атомно-слоевого осаждения (ALD) на кремниевой пластине покрытой 100 нм TiN. Исследовались образцы, осажденные при различных температурах при помощи термического (W-образцы) и плазмостимулированного (P-образцы) ALD. Исследования методом ПАСМ показали, что для P-образцов число филаментов росло с увеличением температуры до 275 °C, но при повышении температуры выше 275 °C начинало снижаться. Для W-образцов наблюдалась аналогичная картина, однако температура, при которой наблюдалось наибольшее число филаментов, составила 325 °C. Рост числа филаментов при повышении температуры осаждения может быть связан с ростом числа нанокристаллических зародышей в аморфном оксиде гафния [4], на которых предположительно формируются проводящие филаменты.

Дальнейшее падение числа филаментов вероятнее всего связано с повышением стехиометрии оксида и снижением концентрации кислородных вакансий, из которых состоят филаменты.

Литература

1. Pan F. et al. Recent progress in resistive random access memories: Materials, switching mechanism. and performance // Mater. Sci. Eng. R Rep., 2014. Vol. 83. P. 1–59.
2. Lanza M. et al. Recommended Methods to Study Resistive Switching Devices // Adv. Electron. Mater., 2019. Vol. 5. № 1. P. 1800143.
3. Celano U. Electrical Atomic Force Microscopy for Nanoelectronics // Cham: Springer International Publishing, 2019.
4. Chesnokov Y. M. et al. Microstructure and electrical properties of thin HfO_2 deposited by plasma-enhanced atomic layer deposition // J. Mater. Sci., 2018. № 53. P. 7214–7223.

УДК 621.315.592.4

Низкотемпературное окисление кремния с использованием генератора озона

Горохов С. А.[1,2], Патюков С. И.[1], Черняев М. В.[1], Резванов А. А.[1,2]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
sgorohov@niime.ru
[2] *Московский физико-технический институт*
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В работе исследуется кинетика низкотемпературного радикального окисления кремния в потоке озона, сформированном в озонаторе (генераторе озона). Полученные данные подтверждают уникальные возможности процесса низкотемпературного окисления в озоне — возможность формирования тонкого оксида кремния толщиной 10–20 Å при температуре 500 °C, что примерно на 150–200 градусов ниже, чем для существующего процесса ISSG-окисления.
Ключевые слова: радикальное окисление; кинетика роста оксида кремния; окисление в озоне; генератор озона.

При использовании high-k-материалов в качестве подзатворных диэлектриков в современных КМОП СБИС с проектными нормами менее 45 нм термическое окисление по-прежнему используется для создания совершенной границы раздела с полупроводником при формировании подслоя [1]. Постоянное уменьшение размеров элементов требует сокращения термического бюджета окислительных операций при сохранении качества оксида и границы раздела с кремнием. В настоящее время основным методом создания высококачественного оксида кремния толщиной 1–10 нм является процесс ISSG- (*in situ* steam-generation) окисления в установках быстрых термических процессов (RTP — rapid thermal processing). Однако ISSG-окисление имеет определенные ограничения, связанные с использованием в процессе водорода [2].

Метод термического окисления с использованием озона является свободным от этих ограничений. Этот процесс реализуется при низкой температуре вплоть до 200 °C в широком диапазоне концентрации атомарного кислорода и без водородосодержащих веществ. По сравнению с окислением в кислороде использование озона существенно увеличивает скорость роста оксида в температурном диапазоне 200–550 °C [3].

В цели данной работы входило исследование кинетики роста оксида в процессе окисления в озоне и сравнение ее с кинетикой радикального ISSG-окисления. Выбор технологических параметров процесса для достижения максимального количества радикалов кислорода определялся по результату предварительного моделирования состава газовой среды в реакторе субатмосферного давления с применением модели реактора идеального смешения [4]. В качестве механизма реакций использовался механизм диссоциации озона, описанный в работе [5].

Полученные данные подтверждают уникальные возможности процесса низкотемпературного окисления в озоне — возможность формирования тонкого оксида

кремния толщиной 10–20 Å при температуре 500 °C, что примерно на 150–200 градусов ниже, чем для существующего процесса ISSG-окисления.

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — С. 177.
2. Черняев М. В. и др. Кинетика радикального окисления кремния // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 3 (187). — С. 31–44.
3. Cui Z., Madsen J. M., Takoudis C. G. Rapid thermal oxidation of silicon in ozone // Journal of Applied Physics, 2000. Vol. 87. № 11. P. 8181–8186.
4. Черняев М. В. и др. Моделирование процесса ISSG окисления с применением модели реактора идеального смешения // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 1 (185). — С. 87–93.
5. Jian J. et al. A reaction mechanism for ozone dissociation and reaction with hydrogen at elevated temperature // Fuel, 2022. Vol. 322. P. 124138.

УДК 621.315.592

Оптические методы контроля и характеризации при производстве гетероструктур для полевых транзисторов на основе GaN

Артеев Д. С.[1,2], Сахаров А. В.[1,2], к. ф.-м. н., Николаев А. Е.[1], Заварин Е. Е.[1,2], к. ф.-м. н., Родин С. Н.[1], Лундин В. В.[1], к. ф.-м. н., Цацульников А. Ф.[1,2], д. ф.-м. н.

[1] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
ArteevDS@mail.ioffe.ru

[2] Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Применение оптических методов, таких как *in situ* многолучевая лазерная рефлекто-/дефлектометрия, а также *ex situ* фотолюминесцентная спектроскопия и спектроскопия оптического отражения, позволило относительно просто, быстро и недорого проводить неразрушающий контроль и характеризацию гетероструктур для полевых транзисторов на основе GaN и оптимизировать параметры ростового процесса для стабильного достижения отличной однородности по пластине и высокого качества производимых структур.

Ключевые слова: нитрид галлия; транзистор; фотолюминесценция; оптическое отражение.

Полевые транзисторы на основе гетероструктур AlGaN/GaN и AlInN/GaN с двумерным электронным газом (ДЭГ) находят все большее применение в современной мощной и высокочастотной электронике, постепенно вытесняя кремниевые транзисторы. Этому способствует уникальная совокупность свойств GaN, а именно большая ширина запрещенной зоны ~3,4 эВ, относительно высокая подвижность электронов и их насыщенная дрейфовая скорость, большая пробивная напряженность электрического поля, хорошая химическая и радиационная стойкость. Основным промышленным методом получения гетероструктур на основе III-N является газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений, при котором в результате пиролиза подаваемых в реактор газов-прекурсоров на поверхности подложки происходит осаждение слоев необходимых материалов. Из-за отсутствия дешевых «родных» подложек рост структур в подавляющем большинстве случаев производят гетероэпитаксиально на подложках сапфира, кремния или карбида кремния, что сопряжено с рядом трудностей и приводит к усложнению дизайна структур, количество слоев в которых в итоге может исчисляться десятками.

Такой сложный процесс производства не может обходиться без тщательного контроля получаемых структур как непосредственно во время роста, так и после него. Особое место при этом занимают именно оптические методы благодаря своему неразрушающему характеру, относительной простоте, быстроте и дешевизне проведения измерений. Так, эксплуатируемые нами в лаборатории физики полупроводниковых гетероструктур ФТИ им. А. Ф. Иоффе и НТЦ микроэлектроники РАН эпитаксиальные установки оснащены системой *in situ* многолучевой лазерной

рефлекто-/дефлектометрии на длинах волн 405 и 637 нм российской разработки, позволяющей с высокой точностью контролировать скорости роста и толщины слоев, изгиб пластины и возникающие в слоях механические напряжения. Кроме того, благодаря широкому расположение оптических преобразователей друг относительно друга с неплохой точностью возможны реконструкция трехмерного профиля (формы) подложки и оценка величин прогиба и коробления без дополнительных *ex situ* измерений.

На свойства ДЭГ, а именно на его концентрацию и подвижность, наибольшее влияние оказывает состав барьерного слоя. Для контроля состава, а также его однородности по поверхности пластины нами применяется УФ фотолюминесцентная (ФЛ) спектроскопия с длиной волны возбуждения 266 нм в случае относительно толстых ~20–30 нм слоев AlGaN малого состава. Канальный слой GaN может находиться в сжатом, растянутом или ненапряженном состоянии в зависимости от типа подложки и дизайна структуры, это возможно определить по положению пика GaN в спектре ФЛ. В случае когда люминесценция из барьерного слоя практически отсутствует (например барьерный слой слишком тонкий или поверх него выращен другой слой) или ширина его запрещенной зоны превышает энергию возбуждения лазера (слои AlInN или AlGaN с повышенным содержанием Al), состав барьерного слоя определяется по спектру оптического отражения в УФ-области, а по частоте осцилляций спектра в области прозрачности можно определить общую толщину структуры. Кроме того, с помощью теоретических расчетов спектров и сопоставления их с измеренными возможно оценить не только состав, но и толщину барьерного слоя.

Используя *in situ* и *ex situ* оптические методы для оптимизации параметров и условий ростового процесса нам удалось добиться отличных параметров однородности изготавливаемых структур, таких как относительный размах вариации $(Q_{max}-Q_{min})/Q_{mean}$ общей толщины структуры порядка 1–2%, состав барьерного слоя и удельное слоевое сопротивление ~2–4%.

УДК 621.793.162

Процесс атомно-слоевого осаждения оксида гафния и оксида цирокния: эксперимент и модельное представление

Зюзин С. С.[1,2], Резванов А. А.[1,2], Ганыкина Е. А.[1,2], Резник А. А.[1,2], Гвоздев В. А.[1]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
szyuzin@niime.ru
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассмотрена модель процесса плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения слоев оксидов гафния и циркония, основанная на методе Монте-Карло и подробно учитывающая кинетику осаждения. Проведено сравнение с экспериментальными данными, полученными на собственной установке атомно-слоевого осаждения.

Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение; ALD; плазма; оксид гафния; оксид циркония; HZO; моделирование; Монте-Карло; конформность.

Непрерывное масштабирование структур микроэлектроники [1] накладывает существенные ограничения на формируемые слои (например определенная стехиометрия, сверхвысокая равномерность толщины слоя и т. п.), которые затрудняют дальнейший переход к нанометровым и субнанометровым масштабам [2, 3]. Особенно важен правильный выбор технологии формирования слоев, в частности при наличии сильных ограничений для параметров процесса (например температуры для соблюдения термобюджета).

Наиболее гибким и подходящим методом получения тонких равномерных слоев считается атомно-слоевое осаждение (ALD) [4]. Суть данного метода заключается в циклически реализованной последовательности реакций прекурсоров с подложкой. Благодаря тому что химические реакции происходят на самой поверхности подложки, а также механизму самоограничения достигается высокая степень равномерности пленки по толщине, низкая шероховатость и стехиометричность состава получаемого слоя. Также используется плазмостимулированное атомно-слоевое осаждение (PEALD). Использование плазмы на шаге подачи газообразного прекурсора позволяет значительно уменьшить температуру процесса и увеличить скорость роста пленки с позитивным или отсутствующим влиянием на другие свойства слоя [5, 6].

Благодаря возможности гибкой настройки параметров процесса и используемых прекурсоров метод ALD позволяет получать комбинированные соединения управляемого состава, что влияет на свойства получаемых слоев. Так, легирование цирконием оксида гафния (фактически получение смешанного оксида $Hf_xZr_{1-x}O_2$ или HZO) позволяет подавить преобладающую моноклинную фазу оксида гафния и увеличить стабильность орторомбической фазы [7], что позитивно влияет на сегнетоэлектрические свойства слоя и вызывает интерес для изучения электрических характеристик слоя HZO.

В данной работе будут рассмотрены физические и электрические свойства полученных слоев HZO, а также приведены результаты компьютерного

моделирования процесса плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения данного оксида. Показано влияние температур процесса и отжига на параметры пленки. Осаждение исследованных слоев проводилось с использованием отечественной установки атомно-слоевого осаждения Изофаз «ТМ 200-01» [8].

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

Литература

1. Iwai H. Roadmap for 22 nm and beyond // Microelectronic Engineering, 2009. Vol. 86. № 7–9. P. 1520–1528.
2. Белоус А. И., Красников Г. Я., Солодуха В. А. Основы проектирования субмикронных микросхем. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — 782 с. ISBN 978-5-94836-603-6.
3. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 13–19.
4. Зюзин С. С. и др. Атомно-слоевое осаждение пленок металлов и их оксидов // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-3 (102). — С. 808–811.
5. Profijt H. B. et al. Plasma-assisted atomic layer deposition: basics, opportunitie. and challenges // Journal of Vacuum Science & Technology A, 2011. Vol. 29. № 5.
6. Nigro R. L. et al. Comparison between thermal and plasma enhanced atomic layer deposition processes for the growth of HfO_2 dielectric layers // Journal of Crystal Growth, 2020. Vol. 539. P. 125624.
7. Резник А. А. и др. Элемент хранения сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти: структура и свойства. — М.,2023.
8. Одиноков В. В. и др. Установка Изофаз ТМ 200-01 для термического и плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения Al_2O_3 // Электроника и микроэлектроника СВЧ, 2019. — Т. 1. — № 1. — С. 10–14.

УДК 544.032.4

Исследование оптических и размерных свойств пленок платины, полученных методом сухой аэрозольной печати

Новосёлов А. К., Санатулина А. Ф., Вершинина О. В., Каменева Е. И., Токунов Ю. М., Мало Д., Лизунова А. А.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Работа посвящена изучению оптических и морфологических свойств плазмонных структур Pt, сформированных с помощью метода сухой аэрозольной печати. Были изучены свойства пленок из первичных наночастиц, а также из модифицированных частиц.
Ключевые слова: наночастицы; платина; искровой разряд; плазмонные структуры; спектры поглощения.

Наночастицы (НЧ) платины являются перспективным материалом, так как они имеют плазмонные свойства в ультрафиолетовой (УФ) области, зависящие от размеров частиц. Используя метод газового разряда [1], можно получить наночастицы высокой чистоты. Также использование термической модификации позволяет добиться большего размера отдельных НЧ [2]. Поэтому целью данной работы является изучение свойств платиновых пленок, полученных методом сухой аэрозольной печати на стеклянной подложке [3] при различных параметрах нанесения плазмонных структур.

Сохраняя постоянными параметры печати, нанесли пленки при несущем потоке аэрозоля 100 и 400 мл/мин из первичных НЧ и термически модифицированных в трубчатой печи при температуре 985 °C. С помощью спектрофотометра было получено, что для пленки с модифицированными НЧ пик поглощения находится на длины волны 265 нм, а для пленки с агломератами из первичных НЧ пик находится на длине волны ниже 240 нм (рис. 1). С помощью просвечивающей электронной микроскопии были получены изображения НЧ, представляющих собой агломераты первичных частиц и укрупненные частицы с размерами вблизи 91 нм после термической модификации (рис. 2*а*, *д*). На растровом электронном микроскопе были получены изображения поверхности напечатанных пленок (рис. 1*б*, *е*), показывающие, что без модификации поверхность пленки состоит из агломератов, в то время как при модификации укрупненные наночастицы равномерно распределены по подложке. По изображениям, полученным на оптическом профилометре (рис. 1*в*, *ж*), и профилю пленок (рис. 1*г*, *з*) были получены толщины и шероховатости пленок. Для потока 100 мл/мин толщина пленки увеличивается с $8{,}5 \pm 2{,}4$ до $33{,}8 \pm 9{,}1$ нм после термической модификации, в то же время для потока 400 мл/мин толщина растет от $4{,}5 \pm 1{,}8$ нм до $112{,}4 \pm 30{,}0$ нм после модификации. Шероховатость пленок увеличивается с $2{,}6 \pm 1{,}0$ до $3{,}2 \pm 0{,}5$ и от $2{,}4 \pm 1{,}4$ до $11{,}6 \pm 5{,}1$ нм для потоков 100 и 400 мл/мин соответственно после термической модификации НЧ в печи.

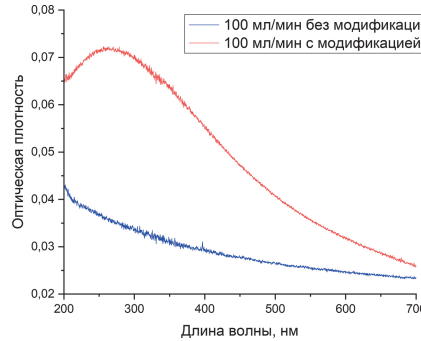


Рис. 1. Спектры поглощения пленок из первичных и модифицированных наночастиц

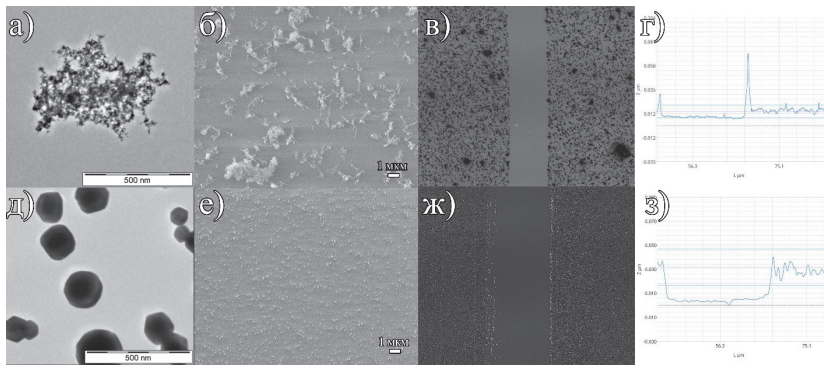


Рис. 2. Пленки, полученные при несущем потоке 100 мл/мин: ПЭМ-изображение первичных НЧ платины без модификации (*а*); РЭМ-изображения агломератов НЧ без модификации (*б*); изображение пленки с оптического профилометра для НЧ без модификации (*в*); профиль пленки из НЧ без модификации (*г*); ПЭМ-изображение первичных НЧ платины с модификацией (*д*); РЭМ-изображения агломератов НЧ с модификацией (*е*); изображение пленки с оптического профилометра для НЧ с модификацией (*ж*); профиль пленки из НЧ с модификацией (*з*)

Литература

1. Efimov A. A., Arsenov P. V., Borisov V. I. et al. Synthesis of nanoparticles by spark discharge as a facile and versatile technique of preparing highly conductive Pt nano-ink for printed electronics // Nanomaterials, 2021, 11 (1). 234.
2. Lizunova A., Mazharenko A., Masnaviev B. et al. Effects of Temperature on the Morphology and Optical Properties of Spark Discharge Germanium Nanoparticles // Materials, 2020. 13 (19), 4431.
3. Efimov A., Arsenov P., Kornyushin D. et al. Aerosol Jet Printing of Silver Lines with A High Aspect Ratio on A Heated Silicon Substrate // Materials, 2020. 13 (3), 730.

УДК 544.558

Исследование адгезионных свойств оснований печатных плат после плазмохимического травления при различных температурах хранения

Аверина А. И.[1], Каширин Н. В.[1], Сидоров Р. В.[2]
[1] *Марийский государственный университет*
424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1
irene75@inbox.ru, kachnic@mail.ru
[2] *ООО «ТЕХНОТЕХ»*
424007, г. Йошкар-Ола, ул. Строителей, 98
ruslan.sidorov.teh@gmail.com

В работе исследовались адгезионные свойства оснований печатных плат после их плазмохимического травления при различных температурах хранения и их изменения с течением времени. Показано, что критические времена хранения оснований печатной платы зависят от температуры и уменьшаются с ее повышением.

Ключевые слова: печатная плата; плазмохимическое травление; показатель адгезии; время хранения.

Одной из технологических операций при изготовлении печатной платы (ПП) является нанесение жидкой паяльной маски [1]. Перед ее нанесением производится подготовка поверхности ПП. Одним из видов подготовки является плазмохимическое травление (ПХТ). Результатом этой операции является увеличение поверхностной шероховатости и придание поверхности ПП особых свойств, обеспечивающих хорошее сцепление с последующим наносимым слоем полимерной защитной паяльной маской. Однако свойства поверхности ПП, активированной методом ПХТ, с течением времени изменяются [2], а именно ухудшается адгезия к паяльной маске.

Целью наших исследований являлось выяснение влияния температуры хранения основания ПП (стеклотекстолита марки FR-4) на их адгезионные свойства и определение изменения этих свойств с течением времени.

Активацию поверхности образцов производили в установке плазмохимического травления Plasma Desmear System JSPDS-500 VW. Измерение показателя адгезии осуществлялось в соответствии с ГОСТ 32299-2013 методом отрыва липкой ленты [3]. Использовался адгезиметр собственной конструкции, обеспечивающий отрыв полиимидной ленты от поверхности под углом 90 градусов с постоянной скоростью [4]. В качестве показателя адгезии принималось усредненное усилие отрыва F_a [4].

В ходе эксперимента получены зависимости показателя адгезии от времени хранения для образцов, активированных методом ПХТ, в сравнении с образцами, поверхность которых не подвергалась активации, при этом они хранились в одинаковых условиях. Для образцов, поверхность которых не активирована, показатель адгезии практически не менялся с течением времени. Полученные зависимости для образцов, поверхность которых активирована, имели вид сложных спадающих кривых, на которых явно прослеживаются два участка: 1 — начальный быстро

спадающий участок; 2 — конечный медленно спадающий участок. Эти участки мы аппроксимировали линейными функциями. Пересечение аппроксимирующих прямых дает условное время перехода t_a от одного участка к другому и, по нашему мнению, отражает критическое время хранения ПП перед последующей операцией — нанесением защитной паяльной маски. Оказалось, что t_a уменьшается с увеличением температуры хранения образцов.

Анализ полученных экспериментальных данных позволил нам высказать предположение, что изменение с течением времени адгезионных свойств поверхности ПП после активации методом ПХТ может быть обусловлено воздействием различных факторов и явлений на активированной поверхности с развитой морфологией, например процессов адсорбции молекул воды из окружающей среды.

Практическая значимость исследований заключается в разработке метода и методики проверки и анализа качества активации поверхности ПП методом ПХТ, способа контроля адгезионных свойств и определения критического времени хранения ПП после активации ее поверхности методом ПХТ. Полученные нами критические времена хранения для различных оснований ПП, полученные с использованием предложенной методики, приняты предприятием ООО «ТЕХНОТЕХ», г. Йошкар-Ола, — лидирующим производителем ПП в России (извещение ДСГ 1162/24 от 19.03.2024 г.). В результате на предприятии снизился процент отбраковки, улучшилось качество продукции, снизились затраты на производство.

Литература

1. Петров Н. Защитная паяльная маска: с самого начала // Технологии в электронной промышленности, 2015. — № 4. — С. 44–46.
2. Акишев Ю. С., Гильман А. Б., Грушин М. Е., Драчев А. И., Каральник В. Б., Петряков А. В., Трушкин Н. И. Изменение во времени поверхностных свойств полимеров, модифицированных в плазме // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология, 2012. — Т. 55. — № 4. — С. 42–51.
3. ГОСТ 32299-2013. Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва. Введ. 01.08.2014. — М.: Стандартинформ.
4. Аверина А. И., Гурьянов А. Е. Исследование адгезионных свойств поверхности печатной платы // Студенческая наука и XXI век, 2023. — Т. 20. — № 1 (23). — Ч. 1. — С. 4–8.

УДК 533.924

Стратегия и тактика в разработке стабильного процесса плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления

Шибанов Д. Р., к. ф.-м. н. Лопаев Д. В., д. ф.-м. н. Рахимов А. Т., к. ф.-м. н. Рахимова Т. В.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им Д. В. Скобельцына 119234, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

Исследованы механизмы плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления (PEALE) в низкотемпературной высокочастотной плазме низкого давления в экспериментальном промышленном реакторе «Плазма ТМ 200-04» АО «НИИТМ». Оптимизация процессов бездефектного PEALE SiO_2 и Si_3N_4.

Ключевые слова: атомно-слоевое травление; низкотемпературная ВЧ-плазма; плазменное травление; диагностика плазмы; взаимодействие плазмы с поверхностью.

Атомно-слоевое травление [1–3] — это метод послойного удаления материала с помощью циклической цепочки самоограничивающихся реакций. Любой процесс атомно-слоевого травления состоит из как минимум двух этапов: модификации поверхностного слоя и удаления модифицированного слоя. Важно отметить, что каждая из реакций должна быть самоограничивающейся, т. е. процесс модификации должен затрагивать только верхний (в пределе моноатомный) слой материала, не вызывая травления, а процесс удаления — травить только модифицированный слой, не повреждая первоначальный материал.

В плазменно-стимулированном атомно-слоевом травлении (Plasma Enhanced Atomic Layer Etching — PEALE) используется низкотемпературная высокочастотная (ВЧ) плазма низкого давления для модификации поверхности, стимулирования поверхностных реакций травления и последующего удаления продуктов реакций. Применение низкотемпературной ВЧ-плазмы в процессах ALE является перспективным направлением в развитии ALE, предлагая большую скорость и контроль процессов в сравнении с другими методами.

Разработка механизмов и сценариев плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления имеет большое значение в современных промышленных технологиях микроэлектроники. Достижение атомарной точности обработки поверхности при создании СБИС важно:

1) для кремниевой технологии с топологическим размером $\leqslant$7–14 нм, накладывающей жесткие ограничения на процент возможных дефектов в конечных структурах;

2) для микросхем для сверхвысокочастотной (СВЧ) и квантовой электроники, требующих прецизионной точности формирования межслойных контактов, при топологических размерах от сотен нанометров до десятков микрон.

В концепции каждый этап в PEALE [4–7] должен быть самоограничивающимся, что на практике труднодостижимо, особенно при наложении требований на производительность процессов [3, 5, 8]. Низкая повторяемость циклов вплоть до вырождения в непрерывное травление из-за взаимодействия плазмы со стенками реактора, а также создание дефектов и загрязнение нижележащих слоев

являются главными проблемами процессов PEALE. Преодоление этих сложностей и оптимизация каждого шага цикла невозможны без понимания физических процессов, протекающих на поверхности материала, в объеме плазмы и на стенках реактора.

В этой работе представлено исследование факторов, влияющих на повторяемость и бездефектность процессов плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления. На примере разных процессов PEALE SiO_2 продемонстрированы причины образования дефектов и методы их минимизации. В процессах плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления Si_3N_4 продемонстрированы причины низкой повторяемости и вырождения процессов. *In situ* контроль параметров плазмы (с помощью зондовых диагностик) и толщины материала (лазерной эллипсометрией), а также *ex situ* РФЭС-анализ образцов на каждом этапе процесса позволили сформулировать стратегию разработки процессов бездефектного плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления. Результаты продемонстрированы на примере оптимизации рецептов PEALE SiO_2 и Si_3N_4 в экспериментальном промышленном реакторе «Плазма ТМ 200-04» АО «НИИТМ». Процессы бездефектного плазменно-стимулированного атомно-слоевого травления демонстрируют высокую повторяемость на протяжении сотен циклов.

Литература

1. Kanarik K.J. et al. Overview of atomic layer etching in the semiconductor industry // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surface. and Films, 2015. Vol. 33. № 2. P. 020802.
2. Kanarik K.J. et al. Universal scaling relationship for atomic layer etching // Journal of Vacuum Science & Technology A. American Vacuum Society, 2021. Vol. 39. № 1. P. 010401.
3. Kanarik K.J. et al. Predicting synergy in atomic layer etching // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surface. and Films, 2017. Vol. 35. № 5. P. 05C302.
4. Oehrlein G.S., Metzler D., Li C. Atomic Layer Etching at the Tipping Point // An Overview, 2015. Vol. 4. № 6.
5. Metzler D. et al. Fluorocarbon assisted atomic layer etching of SiO_2 using cyclic Ar/C4F8 plasma // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surface. and Films, 2014. Vol. 32. № 2.
6. Metzler D. et al. Characterizing fluorocarbon assisted atomic layer etching of Si using cyclic Ar/C_4F_8 and Ar/CHF_3 plasma // J. Chem. Phys., 2017. Vol. 146. № 5.
7. Mannequin C. et al. Comparative study of two atomic layer etching processes for GaN // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surface. and Films, 2020. Vol. 38. № 3.
8. Hsiao S.-N., Sekine M., Hori M. In Situ Monitoring of Etching Characteristic and Surface Reactions in Atomic Layer Etching of SiN Using Cyclic CF_4/H_2 and H_2 Plasmas // ACS Appl Mater Interfaces, 2023. Vol. 15. № 29. P. 35622–35630.

УДК 621.382.2/.3

Изучение влияния состава газовой смеси на профиль травления межсоединений металлических слоев в технологическом процессе КМОП 180 нм

Михайлова А. В.[1,2], Травкина Д. С.[1], Степанов А. А.[1,3], Леготин С. А.[2]
[1] АО «Микрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
annastasiaro@mail.ru
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
[3] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе проведено исследование влияния состава плазмы в смеси C_4F_8 + Ar + + O_2 + CO в условиях, характерных для процессов реактивно-ионного травления, на профиль травления межсоединений металлических слоев. Проведены технологические эксперименты с варьированием концентрации газов. Изучены теоретические основы процесса травления диэлектрических слоев в плазме фторсодержащих газов для подтверждения полученных результатов.
Ключевые слова: полупроводниковое производство; металлические межсоединения; переходные окна; via; плазмохимическое травление; технология КМОП 180 нм.

В настоящее время современное полупроводниковое производство должно быть гибким и адаптивным, так как развитие технологических процессов не стоит на месте. Могут произойти непредвиденные события, влияющие на производство, например, замена материалов. Такая ситуация может сказаться на физике и химии выполняемой технологической операции. Такого рода изменения всегда требуют хорошей осведомленности о теоретических физических и химических принципах работы для того, чтобы иметь возможность изменения процесса в соответствии с новыми условиями без ухудшения качества выпускаемой продукции.

Основную роль в процессах создания интегральных микросхем играют процессы плазмохимического травления [1]. Так как в большинстве случаев основным материалом интегральных микросхем является кремний и его соединения (SiO_2, Si_3N_4 и SiC), для травления таких материалов используются фторуглеродные газы с общей формулой $C_xH_yF_z$. Среди них CF_4 характеризуется наиболее высоким соотношением F/C и обеспечивает преобладание процесса травления над процессом поверхностной полимеризации в типичных условиях реактивного ионного травления. Более полимеризующиеся фторуглероды (C_4F_8, C_4F_6, CHF_3 и CH_2F_2) обычно используются для процессов травления, которые требуют высокой анизотропности травления SiO_2. Примером является травление переходных отверстий через слой SiO_2, где необходимо получить субмикронные размеры вместе с высоким соотношением сторон [2].

В ходе работы было проведено исследование влияния состава газовой смеси C_4F_8 + Ar + O_2 + CO в процессе плазмохимического травления оксида кремния

на профиль и минимальные линейные размеры формируемых межсоединений металлических слоев (via).

В результате работы получены зависимости профиля травления переходных окон от состава газовой смеси. Выявлены зависимости влияния плотности заполнения слоя на скорость травления, профиль межсоединений и минимальный размер формируемых элементов. Результатом этой работы стало адаптирование процесса травления диэлектрических слоев под текущее состояние производственного процесса.

Литература

1. Plummer J. D. Silicon VLSI Technology: Fundamentals // Practice and Modeling, 2000. P. 609–679.
2. Технология СБИС / Под ред. Зи С. М. — М.: Мир, 1986. — Т. 2 — С. 5–59.

УДК 533.924

Исследование механизма атомно-слоевого травления диэлектриков в установке плазмохимического травления

Кузьменко В. О., Мельников А. Е., к. ф.-м. н., Мяконьких А. В.
ФТИАН им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
kuzmenko@ftian.ru

Исследован механизм процесса атомно-слоевого травления диэлектриков в технологической установке плахмохимического травления с источником индуктивно-связанной плазмы. Изучена возможность оптимизации процесса травления путем выбора параметров плазмы.
Ключевые слова: атомно-слоевое травление; диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью; индуктивно-связанная плазма; фторуглеродные пленки.

Уменьшение топологических размеров микроэлектронных устройств приводит к возрастающим требованиям к точности переноса профиля маски при создании структур [1]. Атомно-слоевое осаждение (ALD) и атомно-слоевое травление (ALE) HfO_2 важны для производства полевых транзисторов, изготовленных по проектным нормам <45 нм. Другим возможным применением атомно-масштабных процессов материалов на основе оксида Hf является производство мемристорных структур [2].

Идея процесса ALE схожа с концепцией ALD и заключается в последовательном проведении насыщающихся реакций на поверхности травящегося функционального слоя. Процесс состоит из двух циклически повторяющихся шагов. На первом шаге, называемом модификацией поверхности, на поверхности травящегося материала создается модифицированный слой, который самостоятельно не травит функциональный слой. На втором шаге происходит активация реакции между модифицированным слоем и функциональным слоем и удаление продуктов реакции с поверхности за счет бомбардировки ускоренными ионами из плазмы.

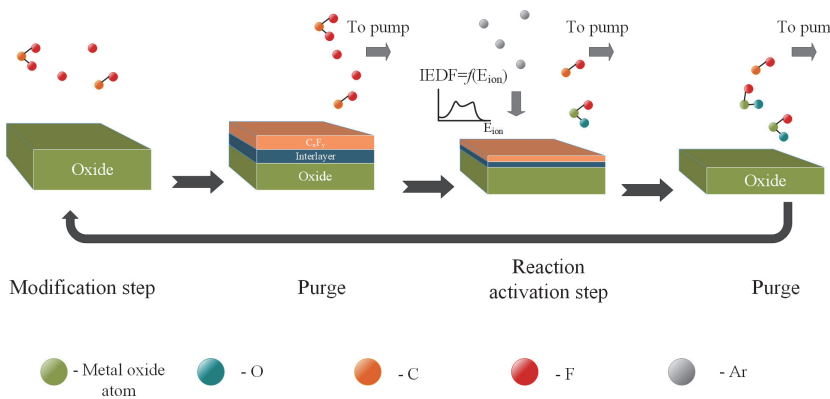


Рис. 1. Схема процесса атомно-слоевого травления

В настоящей работе исследован процесс атомно-слоевого травления HfO_2, в котором модификация поверхности осуществлялась в плазме $Ar/CF_4/H_2$. Активация реакции происходила в плазме Ar путем приложения напряжения смещения к образцу. Исследован механизм травления HfO_2, который заключается во фторировании поверхности HfO_2 и осаждении фторуглеродной пленки на поверхности на шаге модификации. На шаге активации реакции происходило удаление фторуглеродной пленки и модифицированного слоя. Показаны возможность управления процессом травления за счет выбора параметров разряда Ar на шаге активации реакции, а также преимущество процесса атомно-слоевого травления перед процессом распыления.

Работа проведена в молодежной лаборатории функциональных диэлектриков в рамках государственного задания ФТИАН им. К. А. Валиева РАН Минобрнауки Российской Федерации по теме № FFNN-2022-0020.

Литература

1. Adamovich I., Agarwal S., Ahedo E., Alves L. L., Baalrud S. et al. The 2022 Plasma Roadmap: low temperature plasma science and technology // J. Phys. D: Appl. Phys., 2022. Vol. 55. P. 373001-1–373001-55.
2. Permiakova O. O., Rogozhin A. E., Miakonkikh A. V., Smirnova E. A., Rudenko K. V. Transition between resistive switching modes in asymmetric HfO_2-based structures // Microelectronic Engineering, 2023. Vol. 275. P. 111983.

УДК 621.382

Исследование процесса селективного плазмохимического травления слоя p-GaN в гетероструктуре GaN/AlGaN

Тахири П. Ю., к. т. н. Зайцев А. А., к. т. н. Егоркин В. И.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
pauline.takhiri@gmail.com

Разработан высокоселективный процесс плазмохимического травления слоя p-GaN в гетероструктуре p-GaN/$Al_{0,2}Ga_{0,8}N$/AlN/GaN для формирования затворов нормально закрытых силовых транзисторов. Получена зависимость селективности от параметров процесса. Приведены ВАХ транзисторов, затворы которых были получены путем травления в индуктивно-связанной плазме.
Ключевые слова: p-GaN; индуктивно-связанная плазма; селективное травление; силовой нормально закрытый транзистор.

Гетероструктуры на основе GaN имеют ряд уникальных свойств, позволяющих выгодно использовать их для создания силовых транзисторов [1]. Нитрид галлия обладает широкой запрещенной зоной, что обеспечивает высокое значение критического электрического поля по сравнению с кремнием. Хорошая теплопроводность GaN делает его пригодным для работы при больших значениях мощности и температуры, а благодаря высокой дрейфовой скорости насыщения электронов устройства на его основе способны работать на большей частоте. В особенности интерес представляют гетероструктуры на основе этого полупроводника с высокими значениями подвижности и концентрацией носителей заряда в двумерном электронном газе (2DEG), которые приводят к большому току насыщения структуры [2].

Процесс плазмохимического травления является основополагающим при формировании силовых нормально закрытых транзисторов на основе GaN. Точный контроль глубины травления p-GaN за пределами затворной области с минимальными повреждениями нижележащего слоя AlGaN необходим, чтобы концентрация носителей заряда в 2DEG не уменьшалась, а канал под затвором при нулевом напряжении оставался закрытым. Нежелательное утонение слоя AlGaN даже на несколько нанометров может привести к резкому снижению плотности носителей и, следовательно, увеличению сопротивления канала, что приведет к снижению выходных характеристик транзистора. Утонение легированного GaN способствует утечке носителей в закрытом состоянии [3].

В работе исследовалось влияние газовой смеси, давления и мощности на селективность травления p-GaN. В качестве образцов применялись кремниевые пластины с гетероструктурой p-GaN/$Al_{0,2}Ga_{0,8}N$/AlN/GaN. Эксперимент проводился на установке плазмохимического травления CORIAL 200L. Проведено исследование морфологии поверхности после травления p-GaN методом атомно-силовой микроскопии. Исследование профиля области затвора методом просвечивающей электронной микроскопии подтверждает, что травление останавливается на слое AlGaN. Разработан высокоселективный процесс травления в индуктивно-связанной плазме. Приводятся вольт-амперные характеристики силового нормально

закрытого транзистора, затвор которого был сформирован путем травления в индуктивно-связанной плазме.

Литература

1. Гольцова М. Мощные GaN-транзисторы Истинно революционная технология // Электроника: наука, технология, бизнес, 2012. — № 4. — С. 86–101.
2. Egorkin V. I. et al. Normally-Off p-Gate Transistor Based on AlGaN/GaN Heterostructures // Semiconductors, 2021. Vol. 55. № 13. P. 1039–1044.
3. Zhang P. et al. High selectivity, low damage ICP etching of p-GaN over AlGaN for normally-off p-GaN HEMTs application // Micromachines, 2022. Vol. 13. № 4. P. 589.

УДК 621.3.082

Влияние контактных явлений при проведении зондовых параметрических измерений низкоразмерных областей

Спиридонов С. В.
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ
420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10
com-m-a-i-l@yandex.ru

В работе рассмотрены особенности проведения зондовых измерений с низкоразмерных контактных областей. Проведена экспериментальная оценка явлений, возникающих в момент касания и отрыва измерительного зонда. Показано, что для низкоразмерного контакта характерна специфичная зависимость величины тока от площади контакта и степени его удаления от площадки. Выявленную зависимость предложено использовать для анализа качества прилегания зонда и исключения вносимых контактом ошибок измерений.
Ключевые слова: зондовые измерение; параметрический контроль; низкоразмерные контакты; контактные явления.

Параметрические измерения являются одним из востребованных в микроэлектронике методов производственного контроля. Как правило, они проводятся на основе зондовых измерений [1] со специальных контактных площадок в зоне спейсера, разделяющих полупроводниковые кристаллы. На текущий момент размеры контактных площадок соизмеримы с микронными, что обеспечивает надежный контакт и высокую воспроизводимость измерений. При этом повышение степени интеграции приводит к необходимости увеличения числа площадок и сокращению их размера [2].

В представленной работе рассмотрены особенности проведения зондовых измерений с низкоразмерных контактных областей (с линейными размерами менее 100 нм). Малые размеры накладывают ограничения на размеры самих зондов, радиус скругления которых начинает стремиться к единицам нанометров. При таких измерениях начинают себя проявлять специфичные контактные явления, свойственные квантовым типам проводимости [3]. Это может стать причиной искажения результатов измерений и появления погрешностей.

В ходе экспериментальной апробации проведена оценка проводимости интерфейса «зонд — контактная площадка» при различных степенях контакта. Рассмотрены случаи от полного контакта до полного разрыва (диапазон расстояний 0–100 Å). Показано, что в процессе разрыва величина тока изменяется по определенной зависимости, характерной для двух специфичных областей. Первая область — утонение контакта вследствие межатомной перестройки металла [4, 5], вторая — область туннелирования. По величинам токов возможно провести разделение областей и оценку качества контакта. Помимо этого, при проведении низкотоковых измерений (величин порядка 100 нА) подобные контактные явления способны вносить значимую погрешность. В таких случаях выявленная закономерность может быть использована для программной корректировки результатов измерений.

Литература

1. Водсворф А. Справочник по параметрическим измерениям. Третье издание // Agilent Technologies, 2012. — 218 с.
2. IEEE International Roadmap for Devices and Systems. Executive Summary 2022. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022. DOI: 10.60627/C13Z-V363.
3. Спиридонов С. В., Русяев Н. Н., Трифонов А. А., Сафина И. Р. Исследование влияния частичного разрыва низкоразмерного нанопровода на его вольт-амперные характеристики // Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век, 2014. — Т. 6. — № 4. — С. 42–53.
4. Park H. S., Zimmerman J.A. Stable nanobridge formation in ⟨110⟩ gold nanowires under tensile deformation // Scripta Materialia, 2006. Vol. 54. P. 1127–1132.
5. Da Silva E. Z., Novaes F. D., da Silva A.J. R. and Fazzio A. Theoretical study of the formation, evolutio. and breaking of gold nanowires // Phys. Rev. B, 2004. Vol. 69. P. 115411–115422.

УДК 535.374

Изготовление плазмонных наноструктур платины методами печатной электроники для усиления фотолюминесценции

Керечанина М. Ф., Храмов Е. С., Санатулина А. Ф., Новосёлов А. К., к. т. н. Лизунова А. А., д. ф.-м. н. Иванов В. В.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Изготовлены плазмонные наноструктуры методом микроплоттерной печати на кварцевых стеклах на основе наночастиц платины со средним радиусом от 3 до 45 нм. Приведены характеристики полученных пленок и показаны перспективы их применения. Проведены теоретические расчеты фактора усиления фотолюминесценции в ультрафиолетовой области для частиц, аналогичных экспериментальным.

Ключевые слова: локализованный поверхностный плазмонный резонанс; наночастицы платины; усиление фотолюминесценции; ультрафиолет (УФ); микроплоттерная печать.

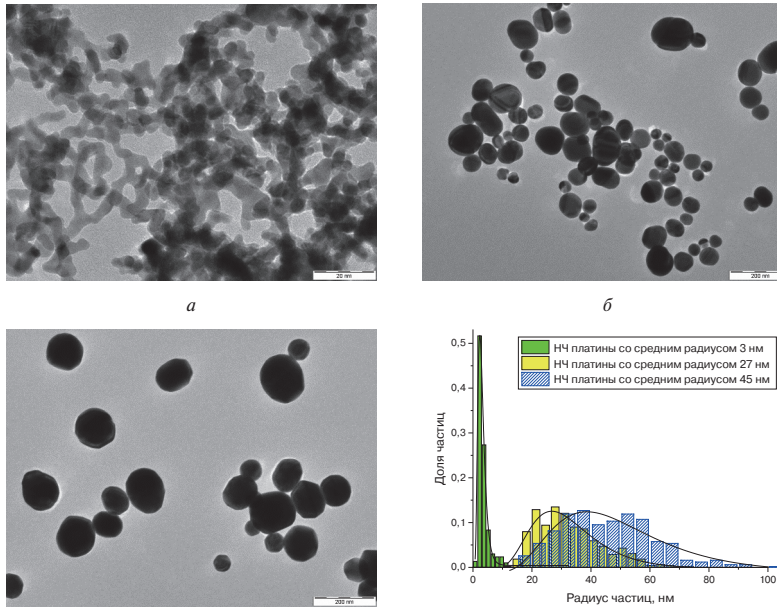
Металлические наночастицы сильно рассеивают и поглощают свет определенных длин волн из-за резонансного возбуждения колебаний плотности заряда, известных как поверхностный плазмонный резонанс [1]. На сегодняшний день плазмонные свойства наноструктур на основе наночастиц (НЧ) золота и серебра, которые находятся в видимой и ближней инфракрасной области спектра, хорошо изучены и широко используются в оптоэлектронике и создании биосенсоров [2]. В то же время перспективным, но менее изученным материалом, имеющим резонансный пик поглощения в ультрафиолетовой (УФ) области, считаются НЧ платины [3].

В работе использовались НЧ платины, синтезированные в импульсном газовом разряде, с различным средним размером: 3, 27 и 45 нм (рис. 1).

Из НЧ платины изготавливалась жидкая суспензия на основе хроматографически чистого изопропилового спирта с добавлением поливинилпироллидона для стабилизации. Методом микроплоттерной печати суспензия наносилась на кварцевую положку для получения тонкой пленки.

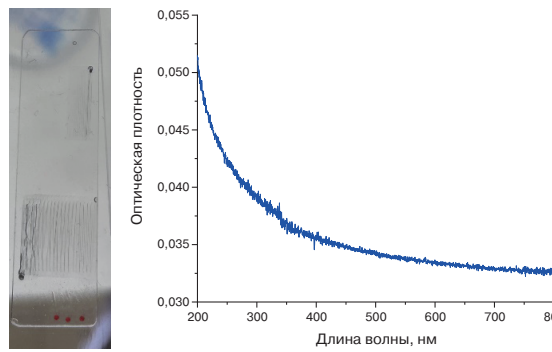
В качестве люминофора использовались кристаллы оксида цинка с характерной длиной волны эмиссии 377 нм. Из кристаллов изготавливалась суспензия, которая также методом микроплоттерной печати наносилась на кварцевую подложку.

Перспективы применения были оценены с помощью расчетов фактора усиления люминесценции по теории Ми. Показано, что фактор усиления для квантового выхода 0,1 на длине волны 377 нм максимален для самых крупных частиц (средний радиус НЧ 45 нм), усиление люминесценции при этом составляет до 16 раз (рис. 3).



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Просвечивающая электронная микроскопия наночастиц, полученных в газовом разряде: *а*) со средним радиусом 3 нм; *б*) со средним радиусом 27 нм; *в*) со средним радиусом 45 нм; *г*) распределение частиц по размерам



а *б*

Рис. 2. Фото пленки (*а*); оптическая плотность пленки (*б*)

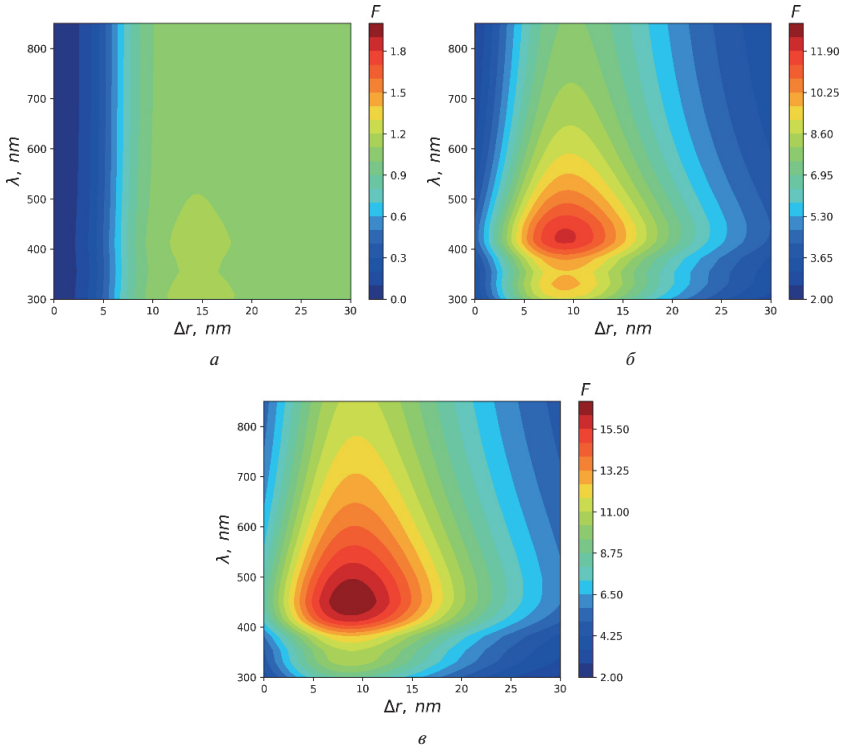


Рис. 3. Расчетные значения фактора усиления люминесценции эмиттера с длиной волны эмисиии 377 нм и квантовым выходом 0,1 в присутствии НЧ платины со средним радиусом: *а*) 3 нм; *б*) 27 нм; *в*) 45 нм

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание) № 075-03-2024-107, номер проекта FSMG-2022-0034.

Литература

1. Bohren C. F. and Huffman D. R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. Wiley. New York, 1983.
2. Gaponenko S. V. Introduction to Nanophotonics. Cambridge University Press: New York, NY, USA, 2010.
3. Naik G. V., Shalaev V. M., Boltasseva A. Alternative plasmonic materials: beyond gold and silver // Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.), 2013. № 25. P. 3264–3294.

УДК 621.315.61

Процессы гидрофобизации пористых органосиликатных пленок для систем многоуровневой металлизации ИС

Воротынцев Д. А.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
vorotyncev@mirea.ru

Исследованы методы гидрофобизации перспективных пористых органосиликатных пленок для использования в качестве материалов с низкой диэлектрической проницаемостью в системах многоуровневой металлизации интегральных схем. Рассмотрены методы, основанные на модификации исходных прекурсоров и постгидрофобизация путем обработки в парах гексаметилдисилазана.

Ключевые слова: гидрофобизация; органосиликатные пленки; метил-модификация; FTIR; порометрия.

Введение в материал субтрактивной пористости позволило уменьшить значения диэлектрической проницаемости low-k-материалов, используемых в BEOL-процессах с топологическими нормами 45 нм и менее [1]. Однако, несмотря на все преимущества использования пористых материалов, существенной проблемой является их гидрофильность, обусловленная остаточными силанолами на поверхности пор, которые могут образовываться в процессе формирования пленок и их последующей обработки, прежде всего травления в плазме. Гидрофильность и поглощение влаги приводят к деградации электрических свойств пленок. Особенно существенной данная проблема становится в новых типах low-k-диэлектриков — периодических мезопористых органосиликатах (PMO), в которых используются относительно большие молекулы прекурсоров и силанолы могут возникать вследствие стерических эффектов.

В рамках работы были исследованы способы гидрофобизации двух типов перспективных PMO — пористых органосиликатных пленок с мостиковыми этиленовыми и бензольными группами. Одним из способов являлось использование в составе пленкообразующего раствора мостикового прекурсора с дополнительной концевой метильной группой 1-(триэтоксисилил)-2-(диэтоксиметилсилил)этан (TESDEMSE). Методом ИК Фурье-спектроскопии было выявлено, что пленки на основе TESDEMSE содержат минимальное количество воды, а также в их составе присутствуют диметилы, что связано с частичным разрушением мостиковых групп при термической обработке при 430 °C [2]. Термодеструкция этиленового мостика приводит к образованию еще одной метильной группы, которая, в свою очередь, может объединиться с соседней метильной группой и образовать диметил. Исследование методом адсорбционной порометрии показало, что, помимо увеличения гидрофобности, дополнительная концевая метильная группа в составе прекурсора также воздействует на пористую структуру, а именно структура таких пленок отличается полным отсутствием микропор.

Вторым способом является поверхностная модификация парами гексаметилдисилазана (HMDS). При взаимодействии данного газа с поверхностными силанольными группами происходит реакция, в результате которой на месте силанолов

образуются три метильные группы. Для эксперимента были выбраны пленки со 100%-м содержанием бензольных мостиков как наиболее гидрофильный представитель с малыми размерами пор и большим модулем Юнга. ИК Фурье-спектроскопия продемонстрировала успешное внедрение молекул HMDS в микропористую структуру пленок: появляются пики, характерные для групп $Si(-CH_3)_{1;3}$. Исследования влияния отжига на привитые группы показали отсутствие их термостабильности [3]. Анализ адсорбционной порометрии показал укрепление стенок пор после обработки парами HMDS, так как изотермы адсорбции обработанного образца после термообработки при 350 и 430 °C практически не меняются в отличие от пленок без поверхностной модификации, у которых уменьшается открытая пористость вследствие схлопывания пор и усадки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 23-79-30016).

Литература

1. Ненашев Р. Н., Котова Н. М., Вишневский А. С., Воротилов К. А. Исследование влияния порогена Brij® 30 на свойства тонких полиметилсилсесквиоксановых пленок, полученных золь-гель-методом // Неорган. материалы, 2016. — Т. 52. — № 9. — С. 1035–1039.
2. Vishnevskiy A. S., Seregin D. S., Palov A. P., Orlov G. A., Yakushev V. A., Ovchinnikov I. S., Vorotilov K. A., Baklanov M. R. Temperature evolution of organosilicate glass films with organic bridges // Microporous and Mesoporous Materials, 2024. Vol. 363. P. 112783.
3. Воротынцев Д. А., Вишневский А. С., Серегин Д. С., Воротилов К. А., Сигов А. С., Бакланов М. Р. Исследование тонких пористых пленок на основе прекурсора, содержащего фениленовые мостиковые группы // Вестник РФФИ, 2023. — Т. 118. — № 2. — С. 31–52.

УДК 621.3.049

Разработка отечественной UHF-микросхемы для применения в области радиочастотных меток

Эпов И. В.[1,2], Резник А. Ю.[3]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
iepov@niime.ru
[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

Работа посвящена проектированию и разработке первой отечественной микросхемы УВЧ-диапазона для применения в области радиочастотной идентификации. Измерения показали, что радиочастотная метка на основе разработанной отечественной микросхемы имеет дальность считывания 12,5 метров в диапазоне 850–950 МГц.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация; микросхема; УВЧ; чувствительность; импеданс.

Компанией АО «Микрон» была спроектирована и изготовлена первая отечественная микросхема УВЧ-диапазона для применения в области радиочастотной идентификации (RFID). RFID — это технология, суть которой заключается в бесконтактном считывании всей необходимой информации, которая хранится в прикрепляемых к различным объектам транспондерах (радиометках), по запросу устройства считывания информации [1–4].

Микросхема разрабатывалась с учетом требований имеющейся на предприятии технологии для минимального топологического размера 180 нм, действующих правил проектирования и имеющейся библиотеки электронных компонентов. При проектировании учитывались предложения и рекомендации специалистов дизайн-центров, традиционных партнеров предприятия [5].

Требовалось разработать микросхему, которая могла обеспечить приемлемую дальность считывания информации из метки (не менее 10 метров) при согласовании комплексных импедансов микросхемы и антенны в диапазоне 850–950 МГц. В этом случае чувствительность микросхемы должна была иметь значение не менее −17,5 дБм [6].

Первичная версия разработанной микросхемы имела значение чувствительности (пороговой мощности) около −13 дБм. Были произведены несколько корректировок топологии микросхемы. Например, был добавлен стабилизатор напряжения питания, уменьшающий сквозную утечку в цифровой части, и снижен ток потребления с 30 до 2 мкА для работы в условиях слабых входных мощностей. В результате новая версия микросхемы имеет чувствительность около −19 дБм.

Для практического исследования была разработана пробная антенна типа T-match, плечи которой припаивались к выводным контактам микросхемы [7]. Полученная метка была измерена в свободном пространстве с помощью программно-измерительного оборудования Voyantic Tagformance Pro. Измерения показали, что

метка на основе разработанной отечественной микросхемы имеет дальность считывания 12,5 метров в диапазоне 850–950 МГц.

Таким образом, разработанная отечественная микросхема УВЧ-диапазона может иметь применение в составе конструкции радиочастотной метки для решения различных задач идентификации: отслеживание товаров и грузов, инвентаризация объектов на складах, запись и расчет ресурса буровых труб, с помощью которых образуются нефтедобывающие скважины, и т. д.

Литература

1. Dobkin D. The RF in RFID: UHF RFID in practice // Newnes, 2012.
2. Zubov I. A., Losevskoy A. Y., Ermakov I. V., Nuykin A. V., Kravtsov A. S. An UHF RFID Tag Design 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. 208–211.
3. Шарфельд Т. Системы RFID низкой стоимости. —М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — Т. 7. — С. 15.
4. 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.
5. Egorov K. V., Kirtaev R. V., Lebedinskii Y. Y., Orlov O. M. et al. Complementary and bipolar regimes of resistive switching in TiN/HfO_2/TiN stacks grown by atomic-layer deposition // Physica Status Solidi. A: Applications and Materials Science, 2015. Vol. 212. № 4. P. 809–816.
6. Friis H. T. A note on a simple transmission formula // Proceedings of the IRE, 1946. Vol. 34. № 5. P. 254–256.
7. Marrocco G. The art of UHF RFID antenna design: Impedance-matching and size-reduction techniques // IEEE antennas and propagation magazine, 2008. Vol. 50. № 1. P. 66–79.

УДК 544.77.032.13

Разработка чернил на основе InGaZnO для печатной микроэлектроники

Филалова Э. М., Каменева Е. И., Лизунова А. А., Иванов В. В.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Проведена разработка чернил на основе полупроводниковых оксидных наночастиц InGaZnO4 для микроплоттерной печати. Произведен подбор бинарных растворителей для создания чернил с необходимыми реологическими свойствами в целях формирования транзисторов. Определены стабильность и размерные характеристики получаемых чернил.
Ключевые слова: IGZO; полупроводниковые оксидные материалы; чернила; транзисторы.

Струйная печать признана эффективным методом прямого нанесения функциональных материалов на гибкую подложку по заранее разработанным рисункам благодаря простоте обработки, низкой стоимости и большей адаптируемости для крупномасштабного изготовления электронных устройств, датчиков, светодиодов и т. д. Технология струйной печати — одна из наиболее многообещающих альтернатив фотолитографическим и вакуумным процессам, которая позволяет напрямую наносить на подложку функциональные материалы, такие как проводящие, изолирующие и полупроводниковые материалы [1].

Для порошков на основе полупроводниковых оксидных наночастиц InGaZnO4 с различными фазовыми составами подобраны органические растворители для создания чернил. Рассмотрено несколько растворителей с различными соотношениями компонентов:

1) этиленгликоль и вода — 3:1;
2) этиленгликоль и вода — 1:1;
3) этиленгликоль и изопропиловый спирт — 3:1;
4) бутанол.

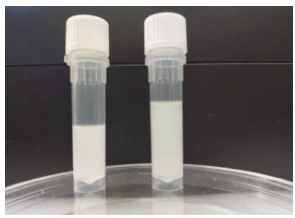
Для повышения стабильности чернил были использованы поверхностно-активные вещества (ПАВ), такие как поливинилпирролидон (ПВП) и поливинилбутираль (ПВБ).

Чернила с наилучшей стабильностью, наиболее подходящие для микроплоттерной печати, были получены на основе растворителей: буферного раствора бутанола с ПВП (рис. 1*а*) и буферного раствора этиленгликоля и воды в соотношении 1:1 с ПВП. Концентрация порошка IGZO в таких чернилах составляет 100 г/л или 10 весовых процентов (%). Характерный размер частиц соединения InGaZnO4 в таких чернилах, измеренный с помощью прибора динамического рассеяния света (ДРС), равен 186,4 ± 15,2 нм, что подтверждается на изображениях с растрового электронного микроскопа (РЭМ) (рис. 1*б*). Такие суспензии обладают стабильностью около 10 дней.

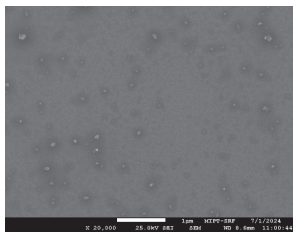
На основе полученных чернил были сформированы тонкие пленки (рис. 1*в*). В качестве подложки использовались пластины из оксидированного кремния с предварительной подготовкой. При подготовке подложек проводились химическая очистка и их прокаливание при температуре 400 °C. Проведена оценка морфологии пленок

с помощью оптического профилометра (рис. 1*г*). Можно заметить, что покрытие сформировано с равномерным распределением наночастиц по подложке. Также при высыхании пленки происходило формирование так называемого эффекта кофейного пятна [2]. Высота такой пленки составляла 2,25 ± 0,05 мкм.

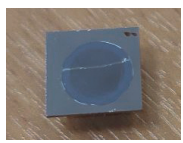
Таким образом, найдены оптимальные растворители (бутанол, этиленгликоль и вода) и ПАВ (ПВП) для чернил на основе соединений InGaZnO4, подходящие для микроплоттерной печати, в то время как для остальных растворителей наблюдалась агломерация частиц и седиментация в течение суток.



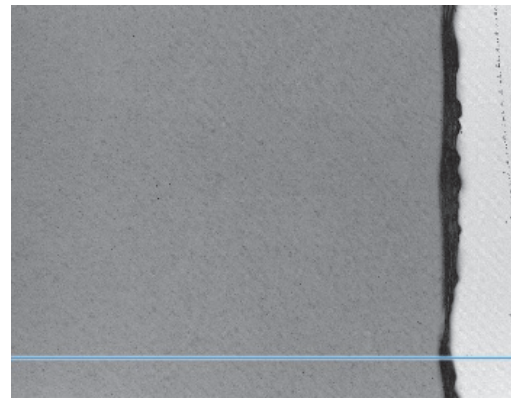
а

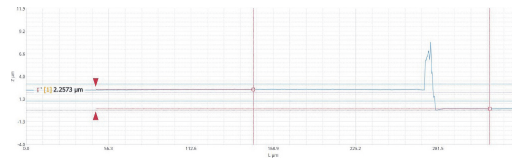


б



в





г

Рис. 1. Чернила с концентрацией InGaZnO4 100 г/л в буферном растворе бутанола (*а*); РЭМ-изображение наночастиц InGaZnO4 (*б*); фотография пленки на кремниевой подложке (*в*); изображение пленки, полученной на оптическом профилометре (*г*)

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

Литература

1. Kim G. H., Kim H. S., Shin H. S., Du Ahn B., Kim K. H., Kim H. J. Inkjet-printed InGaZnO thin film transistor // Thin solid films, 2009. 517 (14), 4007–4010.
2. Nayak L., Mohanty S., Nayak S. K., Ramadoss A. A review on inkjet printing of nanoparticle inks for flexible electronics // Journal of Materials Chemistry C, 2019. 7 (29), 8771–8795.

УДК 621.039.624

Влияние режимов магнетронного напыления на свойства мемристоров, изготовленных из ZrO_2

Шулаев Н. А., Бобылев А. Н., Губин А. А., Удовиченко С. Ю.
Лаборатория мемристорных материалов, Центр природовдохновленного инжиниринга, школа естественных наук, Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
n.a.shulaev@utmn.ru

Исследовано влияние режимов магнетронного напыления активного слоя мемристоров из диоксида циркония на вольт-амперные характеристики изготавливаемых устройств. Обнаружена нелинейная зависимость характеристик рельефа поверхности и электрических свойств мемристоров от скорости осаждения тонких пленок ZrO_2.

Ключевые слова: мемристор; тонкие пленки; магнетронное распыление; диоксид циркония.

Электрические и эксплуатационные характеристики мемристоров в основном зависят от свойств пленок активного слоя, включая рельеф его поверхности. Использование метода магнетронного распыления обеспечивает гибкий контроль за процессом изготовления тонкопленочных структур, что позволяет варьировать многие параметры. Получение оптимальных характеристик мемристора сопровождается подбором режимов изготовления [1]. В связи с этим проведено исследование зависимости вольт-амперных характеристик (ВАХ) готовых устройств от скорости осаждения стехиометрических пленок ZrO_2, являющегося одним из перспективных материалов [2].

Электроды и активные слои мемристоров осаждены через фотополимерные маски, изготовленные методом электронно-лучевой литографии. Экспонирование производилось в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOL JSM-6510 с помощью приставки и ПО Nanomaker. Для каждого режима напыления измерение ВАХ осуществлялось для наборов мемристоров из шести штук с топологией кроссбар, выполненных на одной подложке. Контактные площадки размером 40×40 мкм и нижние электроды шириной 1 мкм выполнены из вольфрама, верхние электроды шириной 1 мкм изготовлены из титана с защитным слоем из нитрида титана.

Исследование режимов распыления и изготовление пленок активного слоя проводилось в модифицированном магнетронном модуле комплекса «НаноФаб-100» при давлении 0,15 Па в режиме стабилизации по току. Для получения стехиометрического диоксида циркония при различных скоростях осаждения варьировалась мощность магнетронного разряда, а контроль стехиометрии осуществлялся путем изменения содержания кислорода в рабочей камере.

Изготовление активного слоя мемристоров проводилось при трех выбранных режимах (табл. 1). Состав пленок определен методом энергодисперсионной рентгеновской спектрометрии для пленок толщиной 150 нм при помощи приставки Oxford Instruments X-Max 20 к СЭМ.

Съемка и анализ морфологии поверхности для пленок, осажденных на отдельную кремниевую подложку одновременно с напылением активного слоя

мемристоров, проводились атомно-силовым микроскопом NT-MDT NTegra и ПО Nova.

Образцы имели зеренную структуру с характерными размерами, приведенными в табл. 1.

Измерения вольт-амперных характеристик показали различия электрических свойств мемристоров с разной морфологией активного слоя.

Кривые ВАХ использовались для расчета коэффициентов сопротивления R_{off}/R_{on} при напряжении 0,1 В для каждого образца (табл. 1).

Таблица 1. Режимы изготовления активного слоя мемристоров на основе ZrO_2 и их параметры

№	I, A	R, Å/c	Q(O_2), sccm	C(O/Zr)	Средний размер зерен, нм	R_{off}/R_{on}
1	0,3	0,1	6	2,03	80	2,19
2	0,6	0,21	11	1,98	45	16,45
3	1	0,33	18	2,03	90	4,16

Таким образом, определено, что существует оптимум скорости осаждения 0,21 Å/c, при котором реализуется максимальное отношение предельных сопротивлений R_{off}/R_{on}, равное 16.45.

Результаты могут быть использованы при разработке промышленной технологии магнетронного осаждения тонких пленок оксидов металлов для твердотельных мемристоров.

Литература

1. Simanjuntak F. M., Ohno T., Samukawa S. Film-nanostructure-controlled inerasable-to-erasable switching transition in ZnO-based transparent memristor devices: sputtering-pressure dependency // ACS Applied Electronic Materials, 2019. Vol. 1. № 11. P. 2184–2189.
2. Yuan Y., Cao X., Sun Y., Su J., Liu C., Cheng L., Li Y., Yuan L., Zhang H., Li J. Intrinsic mechanism in nonvolatile polycrystalline zirconium oxide sandwiched structure // J. Mater. Sci.: Mater. Electron., 2017. Vol. 29. № 3. P. 2301–2306.

УДК 537.525

Анализ влияния добавки благородных и молекулярных газов на электрофизические параметры тлеющего разряда постоянного тока трихлорида бора

Гришков А. Э., Мурин Д. Б.
Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский просп., 7

Проведено экспериментальное исследование электрофизических параметров тлеющего разряда постоянного тока трихлорида бора в зависимости от внешних параметров разряда в широком диапазоне условий. Показано, что величина температуры газа линейно возрастает с ростом давления газа и тока разряда. Поведение приведенной напряженности электрического поля при малых давлениях типично для электроотрицательных и инертных газов. Исследовано влияние благородных и молекулярных газов на электрофизические параметры трихлорида бора. Показано, что величина температуры газа во всех исследуемых смесях, кроме смеси BCl_3/Cl_2, уменьшается с ростом доли второго газа в смеси. Установлено, что приведенная напряженность электрического поля во всех исследованных смесях, кроме смеси BCl_3/Cl_2, плавно уменьшается от значения чистого BCl_3 до значений чистых благородных или молекулярных газов.

Ключевые слова: плазма; трихлорид бора; аргон; гелий; хлор; кислород; водород; электрофизика; напряженность; температура.

В настоящее время плазма хлорсодержащих газов и смесей на их основе активно применяется в технологии микро- и наноэлектроники при проведении процессов очистки и размерного травления поверхности полупроводниковых пластин и функциональных слоев интегральных микросхем. Одним из таких хлорсодержащих газов является трихлорид бора. Целью данной работы является анализ влияния благородных и молекулярных газовых добавок на электрофизические параметры плазмы трихлорида бора.

Эксперименты по исследованию параметров и свойств смесей трихлорида бора с благородными и молекулярными газовыми добавками проводились на плазмохимической установке проточного типа. В качестве внешних параметров разряда выступали ток разряда и состав газа. Трихлорид бора, аргон, гелий и кислород набирали из баллона с маркой «чистый». Газообразный хлор получали термическим разложением хлорной меди в вакууме. Водород получали с помощью генератора водорода «Кулон-6». Для измерения напряженности электрического поля был использован двухзондовый компенсационный метод. Температура газа, необходимая для определения приведенной напряженности электрического поля, определялась путем решения уравнения теплового баланса реактора с использованием экспериментальных данных по температуре наружной стенки. Измерение температуры наружной стенки проводилось с помощью хромель-копелевой термопары.

Эксперименты показали, что увеличение доли всех исследуемых газовых добавок (кроме смеси BCl_3/Cl_2) в смеси с BCl_3 приводит к уменьшению осевой напряженности электрического поля и сопровождается снижением удельной мощности,

вкладываемой в разряд, и температуры газа. Исключение составила смесь BCl_3/Cl_2, в которой ранее упомянутые параметры увеличивались. Было установлено, что приведенная напряженность электрического поля в плазме всех исследуемых смесей слабо зависит от тока разряда, а при увеличении доли Ar, He, H_2, O_2 плавно уменьшается от значений, соответствующих чистому BCl_3, до значений, соответствующих чистым Ar, He, H_2, O_2. Предположительно такой характер обусловлен снижением эффективности гибели электронов в процессе диссоциативного прилипания к молекулам BCl_3.

Литература

1. Rooth J. R. Industrial plasma engineering. Philadelphia: IOP Publishing LTD, 1995. Vol. 1. 545 p.

УДК 007.90:003.5 + 001.8

Сравнение физико-химических свойств фторидов и оксидов металлов для применения в технологии микроэлектроники

Орлов В. О.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
vorlov@niime.ru

В работе рассматривается применение CaF_2 для технологии микроэлектроники, а также сравнение физико-химических свойств CaF_2 с другими материалами.

Ключевые слова: фториды; оксиды; УФ- и ИК-спектроскопия.

Интерес к фтористым соединениям металлов (как щелочных, так и щелочноземельных) был обусловлен прежде всего их химической устойчивостью в сравнении с другими галоидными соединениями этих же металлов. Фториды — химические соединения фтора с другими элементами. Фториды известны для всех элементов, кроме гелия и неона. К фторидам относят как бинарные соединения — ионные фториды (соли фтороводородной кислоты и металлов, ковалентные фториды переходных металлов в высших степенях окисления и фториды неметаллов), так и сложные неорганические соединения (фторангидриды кислот, комплексные фториды, гидрофториды металлов, фторированный графит). Оксиды делятся на несколько групп: кислотные, основные, амфотерные и несолеобразующие. Кислотные оксиды соответствуют кислотам, основные — основаниям, амфотерные — амфотерным гидроксидам. Несолеобразующие оксиды не соответствуют ни кислотам, ни основаниям [1].

Фторид кальция — CaF_2 — один из фторидов металлов второй группы периодической системы. CaF_2 — широко распространенный материал для УФ- и ИК-спектроскопии в диапазоне длин волн от 0,15 до 9 мкм и для лазерных приложений. В настоящее время проводится активный поиск новых изолирующих материалов для использования в полупроводниковой микроэлектронике в качестве альтернативы диоксиду кремния. При этом внимание уделяется не только оксидам металлов, таким как Al_2O_3, HfO_2, La_2O_3, но и другим диэлектрикам, принципиально отличающимся от них по структуре и свойствам [2]. Среди рассматриваемых фторидов наилучшими характеристиками обладает CaF_2: высокая радиационная стойкость, прозрачность в ВУФ-области спектра, однородность показателя преломления, отсутствие гигроскопичности. CaF_2 может использоваться в электронике при создании различных устройств. Например, структуры с CaF_2 интересны в контексте поиска новых изоляторов с высокой диэлектрической проницаемостью, которые могли бы быть использованы как альтернатива SiO_2 в обычных МДП-транзисторах [3, 4].

Применение CaF_2 может стать актуальной темой будущих исследований в микроэлектронике.

Литература

1. Бокарев В. П. Влияние деформирования под давлением на физико-химические свойства неорганических фторидов и некоторых других соединений: диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук. — Москва, 1988. — 177 с. EDN QIKNDJ.

2. Sokolov N. S., Kaveev A. K., Krupin A. V. et al. High insulating quality CaF_2 pseudomorphic films on Si(111) // Applied Physics Letters, 2007. Vol. 90. № 14. P. 142909. DOI: 10.1063/1.2719610. EDN LKTCMP.
3. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41. EDN ZUQSZZ.
4. Красников Г. Я., Бокарев В. П. Поверхностная энергия и огранка кристаллов элементарных полупроводников и некоторых других веществ // Доклады Академии наук, 2002. — Т. 382. — № 2. — С. 225–229. EDN JQCHNS.

УДК 621.319.5

Разработка электростатического прижима для оборудования микроэлектроники

Трактирщиков В. С.[1,2], Ширяев М. Е.[3], Корячко В. В.[1,2]
[1] АО «НПП «ЭСТО»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5/1
v.s.traktirschikov@nppesto.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] ООО «ЭСТИКА»
124681, г. Москва, г. Зеленоград, к. 237, кв. 95

В процессе разработки конструкций и технологии производства столов с электростатическим прижимом (ЭСП) разрабатывается экспериментальный стенд, исследуются материалы, конструкции и само явление электростатического удержания пластин в условиях технологических процессов.
Ключевые слова: электростатический прижим; электростатическое крепежное устройство; электростатическое удержание; технологический стол.

Увеличение степени интеграции ИМС способствует применению более совершенных узлов оборудования микроэлектроники. Для фиксации пластин на технологическом столе применяются прижимы различных типов. Электростатический прижим позволяет достигать равномерного охлаждения, усилия удержания пластины, ее выравнивания, отсутствия кромок и трущихся деталей, быстрой смены пластин. Ввиду перечисленных преимуществ применение данного типа фиксации подложек становится обязательным для современных установок.

Рынок электростатических прижимов для пластин является важнейшим сектором промышленности полупроводникового оборудования, включающим в себя разработку, производство и применение этих устройств [1]. В Российской Федерации применяются столы с электростатическим прижимом иностранного производства. Освоение процессов разработки и производства ЭСП позволяет увеличить автономность и компетентность российской микроэлектроники.

На сегодняшний день имеется множество конструкций ЭСП. По количеству электродов их можно классифицировать как монополярные, биполярные и мультиполярные. По материалу диэлектрика ЭСП можно разделить на кулоновский тип и тип Джонсена — Рахбека [2]. Выбор конкретного типа ЭСП зависит от особенностей технологической задачи. Для плазмохимического травления в вакууме обычно применяется монополярный электростатический прижим. Для ионной имплантации важно отсутствие дополнительного смещения на обрабатываемой пластине, для чего применяется электростатический прижим с несколькими электродами, напряжение на которые подается с определенной частотой [3, 4].

Основные тенденции развития [1]:

- создание передовых материалов для повышения термостабильности, производительности и снижения загрязнений;
- достижение совместимости с передовыми технологиями;
- добавление интеллектуальных функций для контроля параметров и своевременного обслуживания.

Однако разработка и изготовление подобных устройств сопряжены со многими трудностями, которые необходимо преодолеть при внедрении электростатических прижимов в российскую промышленность.

Среди трудностей производства можно выделить следующие:

- отсутствие подрядчиков на единичные заказы;
- трудности формирования прочной слоевой керамической структуры высокой плоскостности;
- отсутствие достаточного опыта проектирования, производства и применения данного устройства.

Трудности внедрения отечественных ЭСП включают в себя:

- экономическую обоснованность;
- технологическую обоснованность;
- отсутствие системы обслуживания и ремонта;
- отсутствие исчерпывающего модельного ряда;
- отсутствие подтверждений качества и надежности отечественных устройств.

Компании АО «НПП «ЭСТО» и ООО «ЭСТИКА» занимаются разработкой серии столов с ЭСП для различных технологических процессов. При разработке выполняются исследования явления электростатического удержания, материалов и конструкций ЭСП. Для исключения недостатков примитивных экспериментальных стендов компанией изготавливается стенд для прямого измерения усилия прижима в технологической среде.

Полученные в процессе исследований результаты позволяют формировать теоретическую базу для проектирования и производства столов с электростатическим прижимом.

АО «НПП «ЭСТО» уже внедрило собственный монополярный электростатический прижим в оборудование ПХТ.

Литература

1. Verified market reports: сайт. Вашингтон, 2023. URL: https://www.verifiedmarketreports.com/product/electrostatic-chucks-for-wafer-market (дата обращения: 09.06.2024).
2. Sun Y., Cheng J., Lu Y., Hou Y., Ji L. Design space of electrostatic chuck in etching chamber // Journal of Semiconductors, 2015. Vol. 36. № 8. P. 084004.
3. Shim G. I., Yamauchi T., Sugai H. Plasma effects on electrostatic chuck characteristics on capacitive RF discharge // Plasma and Fusion Research, 2007. Vol. 2. P. 044–044.
4. Kalkowski G., Risse S., Müller S., Harnisch G. Ultraplanare Elektrostatische Chucks für Next-Generation-Lithographie // Fraunhofer IOF Jahresbericht, 2005.

УДК 537.525

Кинетика травления кремния в тлеющем разряде тетрафторметана

Чесноков И. А., к. х. н. Мурин Д. Б.
Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский просп., 7
mordv1ncs@gmail.com

Проведено исследование влияния времени травления и внешних параметров плазмы на скорость травления кремния. Показано, что зависимости убыли масс носят линейный характер, что свидетельствует о стационарном режиме протекания процесса травления. Установлено, что зависимости скоростей травления кремния при увеличении давлении газа и тока разряда проходят через максимум и выходят на стационар. Получены и проанализированы спектры излучения тлеющего разряда тетрафторметана при травлении кремния. Предположено, что зависимости интенсивностей линий и полос от внешних условий разряда определяются возбуждением излучающих состояний при прямых электронных ударах, при этом их поведение хорошо согласуется с характером зависимостей скорости травления при тех же условиях.
Ключевые слова: плазма; тлеющий разряд; тетрафторметан; кремний; кинетика; скорость травления; интенсивности излучения; активные частицы; излучательные состояния; спектральный контроль.

Фторсодержащие газы широко используются для создания плазмы при обработке кремния в процессе изготовления интегральных микросхем. Одним из методов контроля таких процессов является оптическая эмиссионная спектроскопия. Целью данного исследования было изучение влияния различных параметров плазмы на скорость травления кремния в тлеющем разряде постоянного тока тетрафторметана, а также анализ эмиссионных спектров и определение основных источников излучения.

Для исследования взаимодействия плазмы тетрафторметана с кремнием в условиях тлеющего разряда постоянного тока использовался стеклянный проточный плазмохимический реактор цилиндрической формы (внутренний диаметр 3,4 см, длина зоны разряда 40 см). Внешними (регулируемыми) параметрами разряда выступали ток разряда (5–75 мА), давление (20–200 Па) плазмообразующего газа. Тетрафторметан набирался в хлорвиниловую емкость, откачанную до давления ~1 Па, из металлического баллона с маркой «чистый». Давление контролировалось U-образным масляным манометром. Для травления использовались фрагменты полированных пластин кремния *n*-типа (средняя площадь 1 см^2, толщина 400 мкм). Образцы располагались в области положительного столба разряда, температура образца контролировалась по температуре подложкодержателя. Определение скоростей травления осуществлялось гравиметрически, по изменению массы образца до и после обработки. Взвешивание образцов проводилось на лабораторных аналитических весах CAUW 120 D. Эмиссионные измерения были реализованы непосредственно с использованием плазмохимического реактора с помощью спектрометров фирмы Avantes AvaSpec, рабочий интервал длин волн — 200–1000 нм [1].

В ходе ряда экспериментов были получены зависимости убыли массы, скорости травления от времени обработки, давления газа, тока разряда, температуры образца. В эмиссионных спектрах были обнаружены атомарные и молекулярные компоненты.

Литература

1. Пирс Р., Гейдон А. Отождествление молекулярных спектров. — М.: изд. иностр. лит., 1949. — 540 с.

УДК 546.264, 539.2

Модельно-аналитическое исследование электромеханических свойств гибридных органосиликатных пленок

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

При помощи моделирования из первых принципов и аналитических расчетов была получена информация о влиянии концентраций терминальных метильных и бензольных мостиковых групп в органосиликатном диэлектрике на механические и диэлектрические характеристики.

Ключевые слова: low-k; диэлектрическая постоянная; моделирование из первых принципов; мостиковые группы; терминальные группы.

На сегодняшний день одной из важнейших задач микроэлектронной промышленности является увеличение быстродействия работы интегральных схем (ИС). Долгое время этого удавалось достичь путем масштабирования активных элементов. Тем не менее время задержки в системе металлизации начинает все сильнее и сильнее превалировать над временем переключения транзистора [1].

Резистивно-емкостная задержка препятствует дальнейшему увеличению скорости работы элементов интегральных схем. Эту задержку можно уменьшить, заменив алюминиевый проводник медным, уменьшив сопротивление; ее также можно уменьшить, заменив межслойный диэлектрик на материалы с низкой диэлектрической постоянной, тем самым уменьшив емкость.

Для уменьшения диэлектрической проницаемость используются два основных метода. Первый — это легирование добавками, образующими менее полярные связи, чем Si-O. Второй — это уменьшение плотности путем увеличения пористости материала. Один из наиболее важных критериев современных low-k-диэлектриков — это механическая стабильность, потребность в которой обусловлена внедрением меди в качестве электрического проводника в разводку микросхем. На конференции IITC IEEE в Японии ведущими компаниями по производству микроэлектроники были озвучены требования в 5–6 ГПа для модуля Юнга. Из всего вышесказанного следует, что необходимо создать материал, обладающий повышенной механической прочностью, но при этом сохраняющий низкую диэлектрическую проницаемость. Для соблюдения подобного баланса требований можно влиять на три основных параметра исследуемого low-k материала, а именно пористость и концентрацию метильных групп, положительно влияющих на диэлектрическую проницаемость, а также концентрацию бензольных мостиковых групп, положительно влияющих на механические характеристики материала [2].

Основной целью этой работы является разработка способа определения физических характеристик гибридных органосиликатных пленок, в частности диэлектрической проницаемости и модуля Юнга, в зависимости от различных параметров состава материала, например соотношения концентраций, или замена одного

компонента на другой. Для расчета диэлектрической проницаемости диэлектрика с бензольными группами используется аналитический подход с применением уравнения Клаузиуса — Моссотти, в самой сложной вариации которого учитывается влияние как бензольных, так и метильных групп. Для оценки механической прочности были сформированы разные образцы с разной концентрацией бензольных групп 25, 45, 60, 100 %, для которых экспериментальным методом был установлен модуль Юнга [3]. Благодаря анализу экспериментальных данных удалось установить, что модуль Юнга слабо меняется при низкой концентрации и существенно возрастает при прохождении порога перколяции. Предложено феноменологическое объяснение: введение пористости делает матрицу пленки более эластичной, и матрица приобретает возможность более эффективной самосборки [4]. При помощи программного пакета Quantum ESPRESSO было проведено моделирование из первых принципов структуры исследуемого low-k-диэлектрика для анализа его электромеханических характеристик и сопоставления их с экспериментальными данными.

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. Ovchinnikov I. S., Vishnevskiy A. S., Seregin D. S., Rezvanov A. A. et al. Evaluation of Mechanical Properties of Porous OSG Films by PFQNM AFM and Benchmarking with Traditional Instrumentation // Langmuir, 2020. Vol. 36. № 32. P. 9377–9387.
3. Резванов А. А. и др. Гибридные органосиликатные low-k-диэлектрики с бензольными мостиковыми группами с повышенной механической прочностью и малым размером пор для современной BEOL металлизации // РФФИ, 2023. — С. 13.
4. Fujita S., Inagaki S. Self-organization of organosilica solids with molecular-scale and mesoscale periodicities // Chemistry of Materials, 2008. Vol. 20. № 3. P. 891–908.

УДК 538.975

Электронные свойства сверхтонких слоев MoS_2, полученных методом сульфидизации

Козодаев М. Г., к. ф.-м. н., Маркеев А. М., д. т. н.
Центр коллективного пользования уникальным научным оборудованием в области нанотехнологий, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
kozodaev.mg@mipt.ru

Разработан АСО-процесс роста пленок MoO_3, позволяющий получать химически чистые сплошные пленки толщиной менее 3 нм. Показано, что их последующая сульфидизация приводит к образованию MoS_2, морфология которого определяется толщиной исходной оксидной пленки. На основе полученных пленок MoS_2 толщиной 2,5 и 3,5 нм были изготовлены полевые транзисторы и исследованы их основные характеристики. Показано, что толщина и морфология MoS_2 существенно влияют на электронный транспорт, но основным лимитирующим параметром является контактное сопротивление в областях стока-истока.

Ключевые слова: дихалькогениды переходных металлов; атомно-слоевое осаждение; сульфидизация; полевой транзистор; электронный транспорт; подвижность носителей; контактное сопротивление.

Двумерные дихалькогениды переходных металлов (TMDC), в частности MoS_2, в настоящее время привлекают большой интерес из-за их впечатляющих электрических и оптических свойств [1–2], но реализация их полного потенциала осложнена ввиду ряда причин. В частности, помимо новой физики этих материалов в последнее время также стали широко обсуждаться и вопросы их синтеза [3]. На текущий момент большинство экспериментальных работ направлено на получение сплошных монослойных пленок методом MOCVD, поскольку они представляют наибольший интерес для полевых транзисторов. Несмотря на превосходное качество получаемых пленок, процессы MOCVD чрезвычайно чувствительны к входным параметрам, что осложняет их воспроизводимость [4]. В этой связи существенный интерес представляют альтернативные методы синтеза, в частности сульфидизация предварительно выращенной «затравочной» пленки [5]. Благодаря своей простоте и экономичности данный способ выглядит привлекательным с точки зрения производства. Как правило, пленки TMDC, полученные сульфидизацией, являются нанокристаллическими и их электронные свойства уступают таковым, полученным при помощи MOCVD. Тем не менее для многих задач электронные свойства играют второстепенную роль [6], поэтому нанокристаллические пленки TMDC по своей сути являются существенно иным объектом для исследования и заслуживают особого внимания.

Вторым критически важным моментом технологии двумерных слоев TMDC является создание к ним качественных металлических контактов. Несовпадение уровней Ферми металла стока-истока и пленки TMDC приводит к формированию барьеров, препятствующих инжекции носителей, что обуславливает нелинейность

вольт-амперных характеристик и наличие контактных сопротивлений [7]. Данная проблема имеет статус открытой не только для «идеальных» монокристаллических флейков MoS_2 ввиду стохастического разброса их свойств, но и даже для более сложных нанокристаллических пленок. Подходам к решению обозначенной проблемы на текущий момент посвящено всего несколько работ [8].

Соответственно, в текущей работе мы изучили электрические свойства полевых транзисторов на основе нанокристаллических пленок MoS_2, полученных методом сульфидизации MoO_3, и оценили влияние контактного сопротивления на их характеристики. Показано, что увеличение толщины пленки MoS_2 на 1 нм приводит к увеличению тока в выключенном состоянии примерно на два порядка величины, то есть ухудшает электростатический контроль пленки затвором, в то время как ток во включенном состоянии практически не изменяется и определяется исключительно контактным сопротивлением. Исследование температурной зависимости вольт-амперных характеристик показало, что величины барьеров сток-исток/MoS_2 зависят от толщины MoS_2, то есть инжиниринг контактов не является инвариантным.

Работа выполнена при поддержке проекта государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 075-03-2024-117 от 17.01.2024).

Литература

1. Choi W., Choudhary N., Han G. H., Park J., Akinwande D., Lee Y. H. Recent development of two-dimensional transition metal dichalcogenides and their applications // Materials Today, 2017. 20 (3). P. 116–130.
2. Sebastian A., Pendurthi R., Choudhary T. H., Redwing J. M., Das S. Benchmarking monolayer MoS_2 and WS_2 field-effect transistors // Nature Communications, 2021. 12, 693.
3. Robinson J. A. Perspective: 2D for beyond CMOS // APL Materials, 2018. 6, 058202.
4. Lee D. H., Sim Y., Wang J., Kwon S.-Y. Metal-organic chemical vapor deposition of 2D van der Waals materials-The challenges and the extensive future opportunities // APL Materials, 2020. 8, 030901.
5. Song J.-G., Park J., Lee W., Choi T., Jung H., Lee C. W., Hwang S.-H., Myoung J. M., Jung J.-H., Kim S.-H. et al. Layer-controlled, wafer-scal. and conformal synthesis of tungsten disulfide nanosheets using atomic layer deposition // ACS Nano, 2013. 7. P. 11333–11340.
6. Sangwan V. K., Jariwala D., Kim I. S., Chen K.-S., Marks T. J., Lauhon L. J., Hersam M. C. Gate-tunable memristive phenomena mediated by grain boundaries in single-layer MoS_2 // Nature Nanotechnology, 2015. 10. P. 403–406.
7. Briggs N., Subramanian S., Lin Z., Li X., Zhang X., Zhang K., Xiao K., Geohegan D., Wallace R., Chen L.-Q., Terrones M., Ebrahimi A., Das S., Redwing J., Hinkle C., Momeni K., Van Duin A., Crespi V., Kar S., Robinson J. A. A roadmap for electronic grade 2D materials // 2D Materials, 2019. 6, 022001.
8. Mahlouji R., Verheijen M. A., Zhang Y., Hofmann J. P., Kessels W. M. M., Bol A. A. Thickness and Morphology Dependent Electrical Properties of ALD-Synthesized MoS_2 FETs // Advanced Electronic Materials, 2022. 8, 2100781.

УДК 67.02

Технологии повышения воспроизводимости джозефсоновских переходов Al/AlOx/Al для сверхпроводниковых интегральных схем

Коршаков Н. Д.[1,2], к. т. н., Москалев Д. О.[1,2], к. т. н., Соловьева А. А.[1,2], Москалева Д. А.[1,2], Телеганов М. И.[1], Андрощук М. В.[1], к. т. н., Родионов И. А.[1,2]

[1] НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана
105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18
[2] ВНИИА им. Н. Л. Духова
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22

Разработана масштабируемая технология формирования джозефсоновских переходов на 100-миллиметровых пластинах. Даны рекомендации по выбору технологических режимов процесса электронно-лучевого испарения. Проведено исследование влияния термического воздействия на электрические характеристики джозефсоновских переходов.

Ключевые слова: сверхпроводниковые интегральные схемы; джозефсоновские переходы; теневое осаждение; термический отжиг.

Сверхпроводниковые интегральные схемы на базе джозефсоновских переходов являются наиболее перспективной платформой для реализации квантового процессора благодаря их совместимости с традиционными планарными процессами микроэлектроники. За последние несколько лет на ее основе были продемонстрированы: твердотельный квантовый процессор на 54 кубитах Sycamore (компания Google) [1], 127-кубитный процессор Eagle и 1121-кубитный процессор Condor (компания IBM) [2, 3]. Основополагающим элементом сверхпроводниковых интегральных схем является джозефсоновский переход (ДП), конструктивно представляющий собой трехслойную структуру Al/AlOx/Al. Изготовление алюминиевых ДП осуществляется с применением мостовой технологии Долана, актуальной проблемой которой является воспроизводимость электрических характеристик данных структур.

В работе представлена комплексная оптимизация процесса теневого осаждения джозефсоновских переходов (ДП) для масштабирования сверхпроводниковых интегральных схем на 100-миллиметровые пластины. На основании экспериментальных исследований роста тонких пленок под углом для формирования высококачественного нижнего электрода (RMS 1 ~ нм, LER < 1,3 нм) в работе даны рекомендации по выбору технологических режимов процесса электронно-лучевого испарения: комбинация малых углов осаждения (от 0° до 30°) и толщины нижнего электрода [4]. Разработана математическая модель процесса теневого осаждения, позволяющая вносить корректировки в линейные размеры отверстия в двухслойной резистивной маске для компенсации неравномерного распределения потока испаряемого материала. Проведено исследование влияния термического воздействия на электрические характеристики ДП.

Предложенные в работе методы позволяют формировать структуры с величиной стандартного отклонения критического тока менее 4,5% для площади

переходов от 0,025 мкм² и менее 11,4 % для площади 0,01 мкм² по пластине диаметром 100 мм и управлять значениями критического тока, уменьшая его в 0,5 раз и увеличивая до 3 раз по чипу.

Литература

1. Arute F. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor // Nature, 2019. Vol. 574. № 7779. P. 505–510.
2. Chow J., Dial O., Gambetta J. IBM Quantum breaks the 100-qubit processor barrier // IBM Research Blog, 2021.
3. Choi C. Q. Ibm's quantum leap: The company will take quantum tech past the 1,000-qubit mark in 2023 // IEEE Spectrum, 2023. Vol. 60. № 1. P. 46–47.
4. Moskalev D. O. et al. Optimization of shadow evaporation and oxidation for reproducible quantum Josephson junction circuits // Scientific Reports, 2023. Vol. 13. № 1. P. 4174.

УДК 538.97

Формирование металлических микроразмерных структур методом сухой аэрозольной печати с лазерным спеканием

Долгов В. А., Корнюшин Д. В., Борисов В. И., Иванов М. С., Каменева Е. И., Ворошилова В. А., Иванов В. В.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Представлены результаты по формированию высокопроводящих микроразмерных структур толщиной и шириной от 0,5 и 70 мкм соответственно методом сухой аэрозольной печати с одновременным спеканием импульсным лазерным излучением, удельное сопротивление которых составляет 220 % от кристаллического серебра.

Ключевые слова: печатная электроника; наночастицы; импульсный газовый разряд; сухая аэрозольная печать; лазерное спекание.

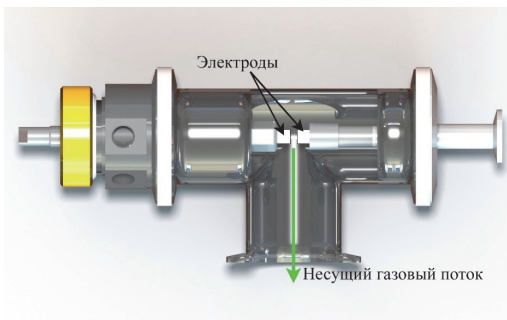
Методы печатной электроники демонстрируют быструю экспансию во множестве отраслей производства электронных устройств. Применение чернил для печати электронных компонентов является общепринятым, однако требует проведения ряда технологических операций для производства чернил, а также дальнейшей сушки после печати. Развивающаяся перспективная технология сухой аэрозольной печати позволяет совместить все необходимые стадии технологического процесса формирования металлического микроразмерного рисунка в одном устройстве.

Микроструктуры формировались из наночастиц серебра, синтезируемых в газоразрядной ячейке (рис. 1*а*). Импульсный газовый разряд между серебряными электродами инициируется в потоке инертного газа, выполняющего функцию транспорта наночастиц. В процессе транспортировки в целях получения укрупненных сферических наночастиц со средним размером порядка 70 нм из дендритоподобных агломератов со средним размером 200 нм используется лазерный оптимизатор, в котором в потоке аэрозоля агломераты под действием импульсного лазерного излучения с длиной волны 1064 нм трансформируются в сферические наночастицы, что позволяет достичь более плотной упаковки частиц при печати. Сферические наночастицы фокусируются в коаксиальном сопле с использованием фокусирующего газового потока, позволяющего получать ширину наносимой микроструктуры кратно меньше выходного диаметра сопла (рис. 1*б*). В процессе осаждения наночастиц на подложки в атмосфере динамического вакуума производилось параллельное их спекание импульсным лазерным излучением с длиной волны 527 нм.

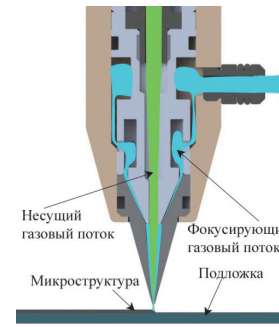
Варьированием ряда параметров: скорости печати от 20 до 5000 мкм/с, количества проходов печати от 1 до 12, частоты следования лазерных импульсов от 10 до 2000 Гц и их энергии от 0 до 250 мкДж, определялись оптимальные параметры формирования высокопроводящих микроструктур.

Микроструктуры толщиной от 0,5 мкм и шириной от 70 мкм формировались на подложках из различных материалов (кремний, стекло). Абсолютное сопротивление получаемых структур измерялось четырехконтактным методом. Профили сечений микроструктур, позволяющие рассчитать удельное сопротивление,

исследовались с использованием оптического конфокального 3D-профилометра Sensofar S-neox. Качество спекания микроструктур исследовалось с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-7001F путем изучения структуры поверхности и поперечного сечения на сломе. Характерные РЭМ-снимки представлены на рис. 2.

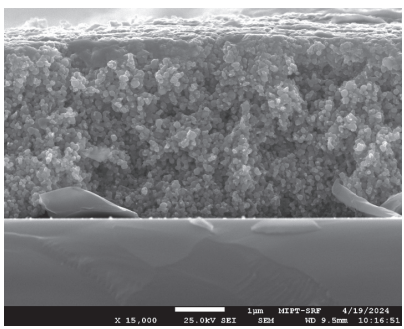


а

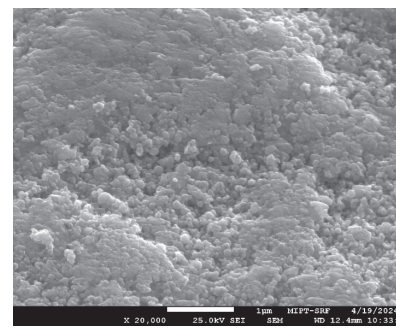


б

Рис. 1. Схематическое изображение синтеза наночастиц в газоразрядной ячейке (*а*) и сфокусированного осаждения наночастиц с использованием коаксиального сопла (*б*)



а



б

Рис. 2. РЭМ-снимки поперечного сечения микроструктуры на сломе (*а*) и поверхности микроструктуры (*б*)

По результатам исследований выявлено, что для получения высокопроводящих микроструктур сферическими наночастицами серебра со средним размером 70 нм необходимо производить формирование со скоростью 2000 мкм/с за восемь проходов с параллельным спеканием импульсным лазерным излучением с параметрами 1000 Гц, 200 мкДж и диаметром пучка 300 мкм. Таким образом, с использованием метода сухой аэрозольной печати и параллельного процесса спекания лазерным излучением было достигнуто удельное сопротивление 3,535 мкОм·см, что составляет 222 % от удельного сопротивления кристаллического серебра.

В результате уменьшения скорости формирования, количества проходов, частоты следования импульсов лазерного излучения и их энергии наблюдается повышение удельного сопротивления вплоть до 390–700 % от удельного сопротивления кристаллического серебра.

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

Литература

1. 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.

УДК 621.382.323

Исследование и разработка технологических процессов для уменьшения длины затвора ПТШ

Маркус Д. В., Рогачёв И. А., Игнатьев О. И.
АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

Разработан процесс анизотропного травления диэлектрика для формирования узкой щели в диэлектрике с использованием пристеночного диэлектрика. Разработана технология уменьшения линейных размеров Т-образного затвора ПТШ. Показана возможность сформировать затвор с длиной 250 нм, используя проекционную фотолитографию.
Ключевые слова: анизотропное травление; полевой транзистор Шоттки; оптическая фотолитография; пристеночный диэлектрик.

В настоящее время широко используются монолитные интегральные схемы (МИС) в различных системах связи и в области СВЧ измерительной техники, работающие в миллиметровом диапазоне длин волн. Активные элементы в таких МИС представляют собой СВЧ-транзисторы, в основном это полевые транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ) длиной 50–250 нм. Особое значение имеют работы по оптимизации технологии производства ПТШ, поскольку они являются одним из важнейших компонентов СВЧ-устройств [1].

Основное направление работы по снижению линейных размеров без использования более совершенных литографических систем — различные методы профилирования фото- или электронно-резистивной маски, поскольку органические резисты позволяют регулировать свои свойства в широких пределах, используя различные проявители, режимы засветки и термообработки, различные обработки в химических растворах или плазме кислорода.

Другим направлением выступает разработка процессов самосовмещения, где, используя проекционную фотолитографию с низкой разрешающей способностью, различными методами уменьшают технологические размеры зоны травления [1, 2, 3].

Наиболее перспективными являются разработки в области использования пристеночного диэлектрика для уменьшения длины технологической линии, поскольку они не требуют массы сложных операций, однако чувствительны к точности технологических процессов.

Результатом работ стала технология уменьшения длины затвора 1000 нм до 250 нм без использования электронно-лучевой литографии, что может существенно ускорить производство полевых транзисторов при применении разработанной технологии. Высокая скорость травления позволяет быстро формировать окно под напыление затвора, а сниженное воздействие ионной бомбардировки не повреждает активный слой полупроводника в зоне травления.

Для стабильности разработанной технологии и повторяемости параметров разработаны новые процессы равномерного послойного осаждения низконапряженного нитрида кремния и анизотропного травления нитрида кремния с контролем параметров через Парето-диаграммы и регрессионный анализ.

Литература

1. Vega R. Schottky Field Effect Transistors and Schottky CMOS Circuitry. Rochester Institute of Technology, 2006. 44 p.
2. Савченко Л., Петров М. Нанопрофилирование резистивной маски при создании Т-образного затвора СВЧ ПТШ // Вестник новгородского государственного университета, 2017. — № 7 (105). — С. 31–36.
3. Арыков В. С., Гаврилова А. М., Дедкова О. А., Кагадей В. А., Лиленко Ю. В. Формирование субмикронного затвора GaAs ПТШ с использованием четырехслойного диэлектрического макета // Микроэлектроника, 2012. — Т. 41. — № 3. — С. 181–187.

УДК 621.3.049.77

Результаты по опробованию отечественных ПАВ в технологии получения безметального проявителя, применяемого в микроэлектронных производствах современного уровня (180–90 нм)

Сеньченко Н. С.[1], Варламов Д. А.[1], Щербаков Н. А.[1], Курбатов В. Г.[2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, б/1
nsenchenko@niime.ru
[2] Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1

В работе представлена необходимость применения поверхностно-активных веществ для безметальных проявителей, используемых для технологических процессов получения ИС с проектными нормами 180 нм и ниже. Изложены результаты по опробованию различных экспериментальных составов ПАВ в проявителе в лабораторных условиях. Представлено сравнение с импортным образцом ПАВ. Проведена апробация составов в технологии получения безметального проявителя на опытно-промышленной установке.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества; безметальный проявитель; гидроксид тетраметиламмония; микроэлектроника; интегральные схемы.

Применение высокочистых полупроводниковых и вспомогательных материалов, модернизация технологических процессов при изготовлении современных интегральных схем и приборов способствуют развитию микроэлектроники. Переход к новому уровню проектных норм сопровождается освоением новых материалов и настройкой технологических процессов. С уменьшением топологических норм возрастают требования, предъявляемые к реагентам, используемым для фотолитографии. Высокочистый безметальный проявитель должен отвечать высоким требованиям по концентрации основного вещества — тетраметиламмония гидроксида (ТМАГ) — 0,26111 ± 0,0005 моль/л, по концентрации примесей элементов — Na, Ca < 2 ppb, Al, Mg, K, Cu, Ni, Cr, Zn < 1 ppb, а также иметь регламентированное содержание частиц размером > 0,3 мкм. В составе безметального проявителя используются поверхностно-активные вещества, необходимые для увеличения технологичности процесса — улучшения смачиваемости и однородности растекания проявителя по гидрофобной поверхности фоторезиста, увеличения скорости проявления, получения дорожек с лучшими показателями по стабильности и воспроизводимости размеров, что приводит к уменьшению брака при производстве ИС. Несмотря на малое содержание ПАВ в составе проявителя, не превышающее 0,01 масс. %, к ним предъявляются высокие требования по чистоте для обеспечения нормативных показателей проявителя [1–2].

В лабораторных условиях были проведены исследования различных экспериментальных образцов поверхностно-активных веществ для безметального проявителя отечественного производства, предоставленных ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

В рамках исследования были приготовлены экспериментальные образцы проявителя с экспериментальными образцами ПАВ. В приготовленных образцах было измерено динамическое поверхностное натяжение, а также построены зависимости поверхностного натяжения от времени образования пузырька. В ходе работы было выполнено сравнение полученных результатов с данными по импортному ПАВ.

В ходе проведенных лабораторных испытаний были получены растворы безметального проявителя с различными образцами ПАВ, для которых построены зависимости поверхностного натяжения от времени образования пузырька (рис. 1). При сравнении экспериментальных образцов ПАВ с импортным аналогом установлено, что образец ПАВ (№ 28) имеет наиболее близкие характеристики по динамическому поверхностному натяжению с импортным аналогом.

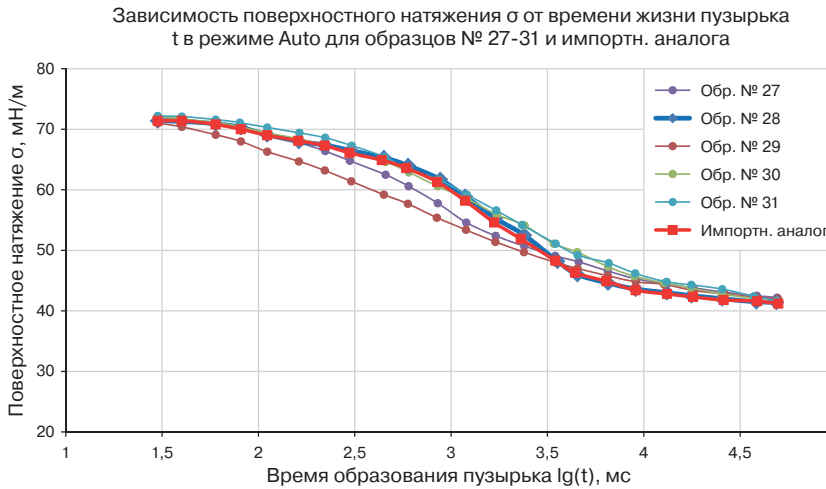


Рис. 1. Зависимости поверхностного натяжения от времени жизни пузырька для различных ПАВ в составе безметального проявителя

Проведенная апробация образца ПАВ № 28 как наиболее близкого к импортному аналогу в технологии получения безметального проявителя по результатам анализа показала, что степень чистоты по примесям элементов используемого состава отвечает предъявляемым требованиям, степень привнесения примесей минимальна и не оказывает существенного влияния на качество изготавливаемого проявителя.

Полученные в ходе работы образцы безметального проявителя с экспериментальным образцом ПАВ № 28 были опробованы в технологическом процессе при производстве ИС. По результатам технологического опробования было получено заключение об успешном проведении испытаний.

1. Разработанный проявитель с применением отечественного ПАВ удовлетворяет границам спецификации по дефектности при применении его на рабочих пластинах. Были получены сопоставимые результаты с проявителем, в составе которого применялся ПАВ импортного производства.

2. Внешний вид критических элементов в центре и на краях пластин при использовании проявителя с отечественным ПАВ и импортным аналогом сравним друг с другом, отличия минимальны и находятся в пределах естественного колебания процесса.
3. Проявитель с отечественным ПАВ удовлетворяет требованиям формирования фоторезистивной маски по технологии 180–90 нм.

Литература

1. Сеньченко Н. С., Варламов Д. А., Щербаков Н. А., Ранчин С. О. Отработка технологии получения безметального проявителя для микроэлектронных производств современного уровня (180–90 нм) // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-2 (119). — С. 505–507.
2. 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.

УДК 658.5.012.1

Исследование продукции в целях предупреждения или выявления дефектности на различных этапах производства микроэлектроники

Рудометов Я. А.[1,2], Нелюбин И. В.[1,2], Волоховский А. Д.[1]
[1] ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе рассмотрено решение задачи контроля дефектности с помощью внедрения автоматических методов исследования. Описан маршрут исследования дефектов с использованием различных методов измерений. Показаны примеры решения технологических проблем.
Ключевые слова: дефектность; микроскопия; метрология; интегральная электроника.

При масштабировании размеров элементов топологического рисунка в процессе производства изделий интегральной электроники ужесточаются требования к дефектности для определения выхода годных изделий. Исторически контроль дефектности на производстве осуществлялся с помощью метода оптической микроскопии. Путем визуального осмотра участков пластины вычислялась плотность дефектов. Для субмикронных технологических норм такой способ исследования невозможен, так как оператор не в состоянии просмотреть значимую площадь пластины в требуемом увеличении. Поэтому для контроля дефектности были введены автоматические методы.

После каждого основного блока технологических операций (фотолитографии, осаждения, травления, полировки) проводятся операции обнаружения макро- и микродефектов с помощью автоматических инспекционных станций, основанных на светлопольных и темнопольных микроскопах и позволяющих в автоматическом режиме выявлять участки топологической структуры, отличающиеся от остальных аналогичных участков на пластине. Для детального исследования обнаруженных дефектов применяются специализированные установки растровой электронной микроскопии, позволяющие выйти на обнаруженный дефект с требуемой точностью. Оборудование, применяемое для контроля дефектности, должно обеспечивать автоматическое определение и классификацию дефектов на кремниевых пластинах диаметром 200 и 300 мм с топологическим рисунком и без него, иметь высокую производительность. Основными типами дефектов при производстве изделий интегральной электроники являются частицы, микроцарапины и свойственные технологическим операциям дефекты, такие как перетравы и остатки материала [1, 2].

В работе кратко рассмотрены установки автоматического контроля дефектности, принципы их работы, а также области применения. Благодаря их внедрению в технологический цикл решены задачи контроля дефектности, а именно

обнаружения дефектов, их классификации и детального анализа. Целями контроля дефектности являются поиск и устранение корневых причин их возникновения.

Приведены примеры решенных технологических проблем после основных операций производственного маршрута. На основе полученных данных был создан атлас дефектов, позволяющий быстро найти причину возникновения дефектов, обратившись к предыдущему опыту.

Проводя анализ экономической эффективности, можно утверждать, что при обнаружении дефектов на кремниевой пластине на ранних этапах технологического маршрута потери могут быть сравнимы со стоимостью чистой кремниевой пластины. При обнаружении дефектов на более поздних стадиях маршрута или невозможности обнаружения дефектов вовсе потери возрастут многократно.

Внедрение операций автоматического контроля дефектности позволяет повысить выход годных на производстве изделий интегральной электроники, разработать рекомендации и регламенты для проведения технологических процессов для предотвращения проявления дефектности, а также не потерять ресурсы, время и денежные средства на производство.

Литература

1. Hao H. et al. Surface Defect Classification in Silicon Wafer Manufacturing Using Linear-Based Channeling and Rule-Based Binning // Journal of Material Sciences & Engineering, 2021. Vol. 10:8.
2. Hao H., Kari U. Surface Defect Classification in Silicon Wafer Manufacturing Using the Linear-Based Channeling and Rule-Based Binning Algorithms // Advanced Materials Research, 2022. 1170(9):1–10.

УДК 533.933

Влияние технологических параметров процесса на энергетический спектр ионов в индуктивно-связанной плазме: моделирование и исследование IEDF в смесях с аргоном

Халилуллин Р. Р.[1,2], Кузьменко В. О.[1], Мяконьких А. В.[1]
[1] Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
[2] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

В работе проведено моделирование функции распределения ионов по энергиям в индуктивно-связанной плазме при различных параметрах процесса в смеси Ar/Xe. Результаты показали, что важен точный контроль параметров процесса для достижения селективности параметров процесса, их синергии и контроля распыления.

Ключевые слова: индуктивно-связанная плазма; функция распределения ионов по энергиям; ВЧ-смещение; смесь Ar/Xe; распыление.

В современных приложениях микро- и наноэлектроники селективность процессов травления и их синергия играют важную роль, особенно в контексте атомно-слоевого травления. Эффективность этих процессов зависит не только от средней энергии ионов, но и от ширины их энергетического спектра. Поиск возможностей управления шириной энергетического спектра при травлении является одной из ключевых задач для успешной реализации наноразмерных структур, поскольку ионно-стимулированные реакции травления материалов в непрерывных и циклических процессах важны при микроструктурировании и создании микро- и наноэлектроники [1]. В литературе имеются сведения о широком спектре процессов атомно-слоевого травления [2], которые могут быть оптимизированы подбором параметров разряда. Например, в работе [3] изменением внешних параметров разряда удалось повысить синергию процесса атомно-слоевого травления при контролируемом и одинаковом потоке ионов.

В данной статье исследуется функция распределения ионов по энергиям (IEDF) в плазме аргона и смеси аргона с благородными газами в реакторах с индуктивно-связанной плазмой (ICP) при различных технологических параметрах процесса. Для исследования была разработана численная гидродинамическая модель плазменного слоя, учитывающая подвижность ионов под воздействием электрического поля [4] для расчета при низких давлениях. Расчеты проводились с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics на основании концентраций электронов и их температур, полученных из эксперимента методом зонда Ленгмюра, а также температуры газа, измеренной методом оптической актинометрии в установке плазмохимического травления Oxford Plasmalab System 100. Функция распределения ионов по энергиям рассчитывалась модифицированной моделью трассировки частиц методом, близким по условиям к методу Монте-Карло.

В ходе работы было изучено влияние различных параметров процесса и проведена серия расчетов при различных внешних (задаваемых) условиях разряда,

а также при различных условиях, контролирующих потоки и энергии бомбардирующих ионов, определяемых режимом работы генератора смещения. Результаты показали, что IEDF сильно зависит от амплитуды и частоты напряжения смещения. Зависимость IEDF выражена слабее при изменении давления и концентрации в камере реактора. При проведении моделирования с различными параметрами напряжения смещения был проведен сравнительный анализ распределения энергий ионов в плазме смеси аргона и ксенона. Выяснено, что изменения параметров напряжения смещения сильнее влияют на поведение ионов аргона, чем на ионы ксенона, что отражается на скорости распыления образца соответствующими ионами.

Полученные результаты необходимы для оптимизации процессов обработки материалов в микро- и наноэлектронике, а также для разработки новых и перспективных процессов травления. Благодаря контролю энергии ионов, достигающих пластины, можно получить высокие параметры селективности травления и синергии атомно-слоевых процессов структурирования.

Работа проведена в молодежной лаборатории функциональных диэлектриков в рамках государственного задания ФТИАН им. К. А. Валиева РАН Минобрнауки Российской Федерации по теме № FFNN-2022-0020.

Литература

1. Bogdanova M., Lopaev D. et al. Virtual IED sensor for df rf CCP discharges // Plasma Sources Sci. Technol., 2021. Vol. 30. № 7.16. № 6 (2). P. 632–639.
2. Kuzmenko V., Lebedinskij Y., Miakonkikh A., Rudenko K. Selective atomic layer etching of Al_2O_3, AlN_x and HfO_2 in conventional ICP etching tool // Vacuum, 2023. Vol. 207. Art. № 111585. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111585.
3. Kuzmenko V., Melnikov A., Isaev A., Miakonkikh A. Revealing the controlling mechanisms of atomic layer etching for high-k dielectrics in conventional inductively coupled plasma etching tool // Journal of Vacuum Science and Technology, 2024. A, 42, (accepted).
4. Robertson S. and Sternovsky Z. Monte Carlo model of ion mobility and diffusion for low and high electric fields // J. Phys. Rev., 2003. E. 67.

УДК 621.3.049.77

Исследование аморфных диэлектрических пленок интегральных микросхем методами электронной микроскопии

Романенко П. М.[1,2], Румянцев А. В.[1], Волков Р. Л.[1], Макеева О. В.[2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
computer500001999@mail.ru

CVD-методикой были получены и методами ПРЭМ и РСМА исследованы применяемые в КМОП-технологии производства ИС с проектными нормами ⩾130 нм аморфные диэлектрические пленки с оценкой их идентификации в составе многослойной структуры и последующим анализом в целях модернизации технологических процессов.

Ключевые слова: CVD; аморфные диэлектрические пленки; электронная микроскопия; границы раздела; состав; барьерные свойства; оксид кремния; оксинитрид кремния; нитрид кремния; стехиометрия пленки.

В настоящий момент мировая микроэлектронная отрасль сталкивается в процессе запуска новых производственных площадок с огромным числом проблем, требующих анализа и решения. Среди них необходимо выделить связанные с разработкой и обеспечением воспроизводимости параметров отдельных технологических процессов в рамках маршрутов формирования изделий — зоной ответственности инженеров-технологов направлений производственного цикла. В результате решения этих задач должна быть поставлена технология кристального производства с требуемыми топологическими нормами.

Одной из наиболее востребованных в мире технологий производства различного рода и назначения ИС является полупроводниковая КМОП-технология [1]. Помимо прочих технологических процессов производственного цикла в ней, как на этапе FEOL, так и в особенности на стадии BEOL, активно используется CVD-метод формирования различных пленок — химическое осаждение из газовой фазы [2, 3].

В рамках данной работы методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа было проведено исследование сформированных в ООО «НМ-Тех» в результате PECVD- и HDP-CVD-методик диэлектрических ФС, применяемых в КМОП-технологии. Слои с толщинами около 200 нм изучались в конфигурации полученной в результате послойного осаждения на кремниевой подложке ориентации (100) многослойной структуры. Для обеспечения ее адгезионной стойкости до осаждения сухим термическим окислением на подложке был сформирован слой оксида кремния SiO_2 толщиной около 100 нм. В ЦКП «ДММН» (МИЭТ) на структуру посредством магнетронного напыления был нанесен слой хрома толщиной около 250 нм для устранения нежелательного «эффекта зарядки» диэлектриков под воздействием электронного пучка в процессе подготовки образца для исследования с использованием ФИП в электронно-ионном микроскопе Helios NanoLab 650. После его прецизионного утонения с контролем протекания процесса в неразрушающем электронном режиме диэлектрическая структура была

подвергнута воздействию высокоэнергетических электронов (при ускоряющем напряжении 200 кВ) в просвечивающем электронном микроскопе Titan Themis 200, оснащенном корректором сферической аберрации. Электронно-микроскопическое изображение многослойной диэлектрической структуры, полученное в режиме ПРЭМ, приведено на рис. 1.

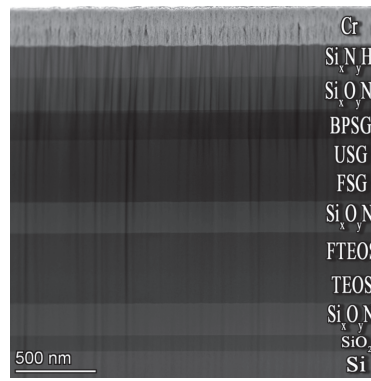


Рис. 1. Состав многослойной диэлектрической структуры

В результате исследования часть диэлектрических слоев была идентифицирована по контрасту между собой на ПРЭМ-изображениях, были изучены границы раздела всех слоев структуры, а также получены и проанализированы данные рентгеновского микроанализа при помощи сопряженного с ПЭМ энергодисперсионного спектрометрического детектора. В рамках работы были косвенным образом подтверждены высокие барьерные свойства оксинитрида кремния $Si_xO_yN_z$ и нелегированного силикатного стекла USG. Помимо этого, сделаны выводы об адгезионных свойствах слоев структуры, степени стехиометричности состава слоя нитрида кремния $Si_xN_yH_z$, а также посредством анализа верхней границы раздела неотожженного при высокой температуре слоя борофосфоросиликатного стекла BPSG выявлено структурное изменение его приповерхностной области глубиной примерно до 25 нм, что служит доказательством необходимости обязательного применения его отжига в технологических маршрутах изготовления ИС.

Литература

1. Королев М. А., Крупкина Т. Ю., Ревелева М. А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: в 2 ч. Ч. 1: Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование: Учебное пособие / Под общ. ред. Чаплыгина Ю. А. 4-е изд. — М.: Лаборатория знаний, 2020. — 400 с.
2. Киреев Ю. В., Столяров А. А. Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2006. — 192 с.
3. Васильев В. Ю. Методы и возможности in-line контроля тонкопленочных материалов в производстве субмикронных интегральных микросхем: Учебное пособие. — Новосибирск: НГТУ, 2023. — 128 с.

УДК 621.382

Разработка технологии низкотемпературной диффузионной сварки тонких кремниевых чипов и пластин через соединительные слои на основе меди и серебра

Чертов А. В., Калашников С. А., Краснов П. С., Козлов В. А.
АО «ПК «ФИД-Техника»
194223, г. Санкт-Петербург, просп. Тореза., 68, лит. В
s.kalashnikov@fidtech.ru

Рассмотрены особенности технологического процесса и специального технологического оборудования для низкотемпературной диффузионной сварки металлизированных полупроводниковых пластин и приборных чипов в процессах их сборки с использованием соединительных слоев на основе меди и серебра.

Ключевые слова: диффузионная сварка; магнетронное напыление; гальваническое осаждение; сборка; пластины; чипы.

Технология диффузионной сварки (ДС) основана на явлении твердофазного перемешивания и прочного соединения атомов «свариваемых» материалов за счет их взаимной диффузии в местах плотного контакта материалов под воздействием давления и нагрева. ДС не использует плавления соединяемых материалов вблизи плоскости образуемого «сварного» шва. Классическая ДС осуществляется при относительно небольших значениях давления, но при высокой температуре (обычно — не менее половины от температуры плавления соединяемых материалов). Благодаря своим многочисленным достоинствам данная технология широко используется в современном производстве сложных композиционных материалов, изделий для авиационной, космической, электротехнической и электронной промышленности.

В полупроводниковой микроэлектронике технология ДС также нашла свои сферы применения. Наиболее известными из них являются различные комбинации технологии диффузионной и термокомпрессионной сварки для присоединения проволочных и ленточных проводников к кристаллам, а также для сборки и герметизации элементов микросхем. В этих процессах обычно используются варианты сравнительно низкотемпературной сварки с нагревом до температур не выше 250–500 °C, но с приложением давлений до 100 МПа. При этом площадь соединяемых ДС материалов микроэлектроники обычно мала и редко превышает 10–20 мм^2. В то же время, для применений ДС в других областях полупроводниковой электроники, например — для монтажа кристаллов силовых полупроводниковых приборов (СПП), диффузионная сварка должна обеспечивать возможность проведения прочного соединения материалов на существенно большей площади.

В настоящее время для высоконадежной сборки Si и SiC кристаллов СПП большой площади взамен пайки разработана и используется технология формирования металлических соединительных слоев на основе метода спекания наночастиц металлов Ag, Au или Cu (sintering — в англоязычной литературе). Данный метод по своей сути также является вариантом низкотемпературной ДС и сферы его применений быстро расширяются, однако в России данная технология получила

пока весьма ограниченное применение ввиду отсутствия производства отечественных материалов для этого процесса.

В компании АО «ПК «ФИД-Техника» для сборки кристаллов СПП была разработана собственная оригинальная технология низкотемпературной диффузионной сварки металлизированных полупроводниковых пластин и чипов, не требующая применения материалов на основе наночастиц. Данная технология включает следующие операции: механическую полировку поверхности приборных пластин с использованием алмазных суспензий до достижения шероховатости $R_a < 3$ нм, химическую очистку полированной поверхности, ее металлизацию Cr/Ni/Cu методами магнетронного напыления и гальваническое наращивание пористого слоя Ag толщиной ~2 мкм. Диффузионная сварка осуществлялась с применением разработанного ранее для спекания и описанного в работе [1] специального прессового оборудования. Нагрев образцов при ДС производился при температурах 250–300 °С с приложением давлений 10–50 МПа в течение времени от 3 до 10 минут. Величина усилия на сдвиг кристаллов при таком способе ДС составляла 30–50 МПа. Технология обеспечивала возможность получения толщин сварного шва менее 10 мкм и минимизацию его электрического и теплового сопротивления.

Внедрение данной технологии в опытном производстве позволило осуществлять сборку одновременно до 50 последовательно соединенных в «столбы» кремниевых кристаллов импульсных СПП толщиной ~50 мкм и площадью до 2 $см^2$ в одном процессе. Это обеспечило возможность предельно минимизировать паразитную индуктивность, тепловое и электрическое сопротивление таких сборок в сравнении с любыми другими методами их изготовления.

Литература

1. Оборудование для сборки чипов полупроводниковых приборов методом низкотемпературного спекания наночастиц серебра // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — С. 240–241.

УДК 661.7

Перспективы развития отечественных технологий переработки сырья и получения материалов на основе редких и редкоземельных металлов для микроэлектроники

Лебедева Д. А., Ивановских К. В., Потемкина О. В., Щелконогов М. А.
АО «Гиредмет» им. Н. П. Сажина
111524, г. Москва, ул. Электродная, 2, стр. 1
DaALebedeva@rosatom.ru

В докладе рассмотрены перспективные направления развития отечественных технологий переработки сырья и получения различных материалов для микроэлектроники на основе редких и редкоземельных металлов.
Ключевые слова: редкие металлы; редкоземельные металлы; металлоорганические соединения; микроэлектроника.

В работе представлен обзор современных подходов к технологиям получения материалов на основе редких и редкоземельных металлов, необходимых для прогресса микроэлектронной индустрии. Особое внимание уделено вопросам синтеза металлоорганических соединений для компонентной базы отечественной микроэлектроники. Рассмотрены перспективные направления развития импортозамещающего производства данных веществ в целях обеспечения предприятий необходимыми прекурсорами для микроэлектроники.

Одной из наиболее актуальных задач в области создания металлоорганических полупроводниковых и других материалов для микроэлектроники является совершенствование методик направленного синтеза высокочистых соединений с заданными свойствами и характеристиками. Важнейшую роль в создании конечных продуктов играет качество исходного сырья.

В настоящее время АО «Гиредмет» является лидером в области разработки технологий получения высокочистых соединений редких и редкоземельных металлов. Разработаны технологии получения более 170 галогенидов более 48 элементов периодической системы для:

- металлургии;
- микроэлектроники;
- волоконной оптики;
- оптоэлектроники;
- ядерной энергетики;
- катализаторов для органического синтеза и синтеза элементоорганических соединений.

При этом используется широкий спектр физико-химических методов отчистки получаемых материалов: направленная кристаллизация, дистилляция, ректификация, зонная плавка. Разработанные методы позволяют получать соединения редких и редкоземельных металлов высокой степени чистоты от 99,9 до 99,999999 % (3N–8N). Очевидно, что высокая чистота этих веществ позволяет использовать их для синтеза координационных соединений на их основе с органическими лигандами.

В докладе рассмотрены перспективные направления развития отечественных технологий переработки сырья и получения различных материалов для микроэлектроники на основе редких и редкоземельных металлов.

УДК 620.3, 621.794.449, 621.3.049.779

Разработка масштабируемой технологии формирования наноразмерных структур на основе волноводов нулевой моды для одномолекулярного секвенатора ДНК

Кугук А. К.[1], Барбашева А. А.[1], Муравьева Л. Н.[1], Коршаков Н. Д.[1,2], Алибеков Р. Ш.[1], Шувалова А. С.[1], Баклыков Д. А.[1,2], Соловьева А. А.[1,2], Рыжков В. В.[1], Родионов И. А.[1,2]

[1] НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана
105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18
[2] ВНИИА им. Н. Л. Духова
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22

Разработана технология изготовления наноразмерных структур в тонких пленках алюминия методом реактивного ионного травления. Исследованы механизмы деградации тонких пленок в зависимости от методов пред- и постобработки образцов, а также предложены способы минимизации коррозионных изменений полученных структур.

Ключевые слова: реактивное ионное травление; волновод нулевой моды; коррозия; реакционная ячейка; одномолекулярное оптическое секвенирование в реальном времени; электронно-лучевое испарение; электронно-лучевая литография; секвенирование.

Секвенирование является одним из ключевых инструментов в развитии генетических технологий. Один из наиболее продвинутых методов секвенирования — одномолекулярное оптическое секвенирование в реальном времени (ООС) в волноводах нулевой моды (ZMW — Zero-Mode Waveguide) — оптических структурах диаметром 100 нм, сформированных в тонких пленках алюминия. ООС подразумевает применение одноразовых ячеек, таким образом, требуется масштабируемая технология их изготовления. Физические принципы работы ООС требуют соблюдения жестких допусков на толщину и сплошность структурированных пленок.

Оптимальным с точки зрения технологичности, масштабируемости и качества структур процессом для формирования ZMW является реактивное ионное травление (РИТ) через органическую маску, формируемую методами электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ).

В ходе работ были оптимизированы следующие технологические операции:

- электронно-лучевое испарение алюминия и предобработка подложек;
- ЭЛЛ;
- РИТ;
- удаление органической маски.

В результате серии экспериментов разработан технологический маршрут изготовления чипов секвенатора, позволяющий вдвое увеличить выход годных образцов и уменьшить дефектообразование как в процессе их изготовления, так и при последующей транспортировке и хранении.

Исследование проводилось в нанотехнологическом центре МГТУ им. Баумана (НОЦ «Функциональные Микро/Наносистемы», ID 74300).

Литература

1. Levene M. J. et al. Zero-mode waveguides for single-molecule analysis at high concentrations // Science, 2003. Vol. 299. № 5607. P. 682–686.
2. Lee W. Y., Eldridge J. M., Schwartz G. C. Reactive ion etching induced corrosion of Al and Al-Cu films // Journal of Applied Physics, 1981. Vol. 52. № 4. P. 2994–2999.
3. Powell R. A. (ed.). Dry etching for microelectronics. Elsevier, 2012.
4. Moreau W. M. Semiconductor lithography: principles, practice. and materials. Springer Science & Business Media, 2012.

УДК 621.383.525

PIN-фотодетекторы коротковолнового ИК-диапазона на основе гетероструктур InGaAs/InAlAs/InP с метаморфными буферными слоями

Баранцев О. В.[1], Василькова Е. И.[1], Пирогов Е. В.[1], Воропаев К. О.[2], Васильев А. А.[2], Карачинский Л. Я.[1], Новиков И. И.[1], Соболев М. С.[1]
[1] СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А
[2] АО «ОКБ-Планета»
173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. 1н

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии выращены гетероструктуры 2,2–2,5 мкм PIN-фотодиодов InGaAs/InP с метаморфными буферными слоями InAlAs. Исследованы структурные и электрофизические характеристики кристаллов PIN-фотодиодов.

Ключевые слова: инфракрасные фотодетекторы; молекулярно-пучковая эпитаксия; метаморфные буферные слои.

Фотодетекторы спектрального диапазона 2,2–2,5 мкм имеют широкий спектр применений. Этот диапазон длин волн может использоваться для дистанционного зондирования местности и наблюдения в темное время суток, в приборах пищевой промышленности, сельского хозяйства для анализа газов и органических веществ [1]. Однако для регистрации излучения данной длины волны необходима активная область гетероструктуры из узкозонного полупроводникового материала. Наиболее часто встречающейся в приборах ближнего инфракрасного диапазона является решеточно-согласованная пара материалов $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ и InP. Но для достижения необходимой ширины запрещенной зоны мольная доля индия должна быть увеличена до 83 %. Для роста слоя $In_{0,83}Ga_{0,17}As$ на поверхности InP во избежание появления в активной области большого количества дислокаций несоответствия необходимо выращивание переходных метаморфных буферных слоев (МБС).

Метаморфные буферные слои осуществляют плавное согласование постоянных решеток в гетероструктуре и способствуют релаксации возникающих при росте упругих напряжений. Одним из способов создания таких слоев является постепенное изменение компонентного состава материала буферного слоя, что равносильно изменению температуры эпитаксиальных источников химических элементов, образующих слой. В рамках данного проекта исследуются гетероструктуры с МБС состава $In_xAl_{1-x}As$. Для определения оптимальной технологии синтеза данных слоев варьируются параметры их роста: профиль изменения состава, температура роста, длительность и температура термического отжига.

Эффективность использования каждого типа метаморфного буферного слоя оценивается с помощью методов рентгенодифракционного анализа, просвечивающей электронной микроскопии. Анализируются вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики кристаллов PIN-фотодиодов, изготовленных методом взрывной фотолитографии. Важной характеристикой фотодетекторов является темновой ток — ток, протекающий в приборе при отсутствии внешнего излучения [3]. Одной из ключевых функций метаморфных буферных слоев является

значительное снижение величины темнового тока. На данный момент получены образцы, в которых значение темнового тока составляет 10^{-5} А при напряжении смещения −1 В, а плотность дислокаций в поглощающем слое достигает ~$5 \cdot 10^{8}$ см$^{-2}$.

Литература

1. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. Детекторы коротковолнового ИК-диапазона на основе InGaAs (обзор) // Успехи прикладной физики, 2014. — Т. 2. — № 2.
2. Li Ping, Li Tao, Deng Shuangyan, Li Xue, Shao Xiumei, Tang Hengjing, Gong Haimei, Dark current analysis of mesa type In0.83Ga0.17As p-i-n photodiodes with different annealing treatment, Infrared and Laser Engineering, 2016. Vol. 45. № 5.

УДК 621.3.049.75

Разработка и анализ методики для создания токопроводящих структур на поверхности пластиков путем лазерного структурирования

Сафонов Т. С., к. т. н. Рябков Е. Д.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
timsafonov@yandex.ru

В данной работе были исследованы и разработаны новые аддитивные методики производства токопроводящих элементов на пластиковых подложках на основе методов лазерного структурирования и химического меднения без применения дорогостоящих химических компонентов и драгоценных металлов.

Ключевые слова: токопроводящие элементы; пластиковые подложки; лазерное структурирование; химическое меднение.

В настоящее время наблюдается огромный рост интереса к разработке, созданию и производству устройств на основе гибкой электроники. Одним из ключевых технологических элементов гибкой электроники является технология сборки электронных схем путем установки ее элементов на гибкую пластиковую подложку, на которую предварительно должны быть нанесены токопроводящие структуры. Важными применениями гибкой электроники являются создание носимых сенсорных систем для человеческого тела [1], развитие технологий отслеживания на основе гибких датчиков радиочастотной идентификации (RFID — Radiofrequency Identification) на гибкой пластиковой основе [2] и производство интегрированных трехмерных электронных систем, в которых происходит совмещение корпуса устройства и основания для электронной схемы [3].

На данном этапе развития гибкой электроники технологиям производства токопроводящих структур на пластике необходимо преодолеть следующие проблемы:

- неаддитивность, то есть ограниченность и негибкость технологий с фиксированным шаблоном печати;
- сложности масштабирования, то есть невозможность быстрого перехода от штучного производства к масштабному выпуску систем и наоборот;
- высокая стоимость производства электроники на гибком пластике из-за использования дорогого допированного пластика, растворов с драгметаллами или сложных в использовании и дорогих лазеров.

В ходе выполнения данной работы был предложен новый аддитивный метод нанесения меди на пластиковые поверхности, который по сравнению с существующими методами не требует использования фиксированного шаблона, а также использование специальных композитных материалов или соединений драгоценных металлов. Кроме того, отдельно стоит отметить быстроту и масштабируемость созданного процесса: скорость сканирования лазерным пучком поверхности диэлектрика достигает десятков сантиметров секунду, а последующая стадия

химического меднения позволяет последовательно увеличивать количество получаемого материала в единицу времени без использования дорогостоящего оборудования.

Разработанная методика включает в себя три этапа:

- на поверхность пластика наносится раствор поверхностного активатора, который был создан на основе доступной фосфорномолибденовой кислоты;
- образец подвергается лазерному структурированию с использованием установки со специально созданной лазерной головкой на основе ультрафиолетового лазерного диода;
- химическое меднение активированной области с помощью реакции восстановления ионов меди с формальдегидом.

Большой интерес представляет анализ граничной области между медью и пластиком для изучения состава каталитических структур и объяснения механизма их взаимодействия с раствором химического меднения. По результатам элементного анализа с использованием электронной микроскопии было обнаружено, что при лазерном структурировании нанесенного активатора образуется монокарбид молибдена, который обладает металлической проводимостью и способностью адсорбировать водород, что является ключевым в процессе химического меднения на поверхности пластика. Также были изучены области достаточно глубокого залегания меди, образованной после химического меднения, что позволило хорошо увидеть граничную область между медью, пластиком и модифицированной поверхностью с монокарбидом молибдена. Также с помощью измерения электрического сопротивления было показано, что полученные медные структуры обладают высокой электрической проводимостью и могут быть использованы при создании электронных устройств с высокой плотностью монтажа.

Литература

1. Khairullina E. M. et al. Laser-assisted surface activation for the fabrication of flexible non- enzymatic Cu-based sensors // Microchimica Acta, 2022. 189, 259.
2. Finkenzeller K., Muller D. RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication, Wiley Telecom, 2010.
3. Франке Й. 3D MID. Материалы, технологии, свойства / Пер. под ред. И. А. Волкова. — СПб: Профессия, 2014.

УДК 621.3

Исследование процессов фокусирования и осаждения наночастиц через электростатическую матричную линзу

Масленников Д. В., Патарашвили А. Н., Ефимов А. А., к. т. н.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9

В работе исследованы процессы фокусирования и осаждения наночастиц через электростатическую матричную линзу при варьировании формы и размера отверстий в линзе, значений размера и заряда аэрозольных наночастиц и плотности поверхностного заряда линзы, а также времени осаждения наночастиц.
Ключевые слова: наночастицы; электростатическая матричная линза; генератор искрового разряда; сухая аэрозольная печать.

Технология сухой аэрозольной печати с применением электростатической фокусировки аэрозольных наночастиц является новым и перспективным направлением для исследований. Развитие и использование данной технологии позволяет сократить стоимость и время разработки электронных устройств на 1–2 порядка по сравнению с кремниевой электроникой, в основе которой лежит использование многостадийных литографических процессов. К тому же с применением технологии сухой аэрозольной печати возникает возможность создания принципиально новых изделий и материалов, в числе которых гибкие СВЧ-антенны, газовые сенсоры, SERS-активные материалы [1], а также различные функциональные покрытия.

На размеры и токопроводящие свойства формируемых структур влияют такие параметры системы, как напряженность поля вблизи подложки при отсутствии электростатической линзы; поверхностный заряд, возникающий на линзе в результате осаждения ионов или приложения напряжения; расстояние между линзой и подложкой; размер отверстий в линзе. Помимо этого, значительное влияние оказывают свойства самих наночастиц: их размер, форма, величина заряда, скорость движения и концентрация. В целях исследования влияния параметров системы на характеристики формируемой структуры проведено три серии экспериментов по осаждению заряженных аэрозольных наночастиц на кремниевую подложку с использованием различных электростатических линз.

Первая серия экспериментов проведена с использованием линзы, произведенной с применением технологии оптической литографии; варьировались такие параметры системы, как размер, форма и количество фокусирующих отверстий линзы. В качестве диэлектрической основы линзы использовался фоторезист SPR220-7.0 (Microresist Technology GmbH, Германия) толщиной 9,6 мкм, наносящийся методом центрифугирования. В слое фоторезиста выполнялись отверстия прямоугольной и круглой формы с характерными размерами от 1 до 16 мкм.

В качестве электростатической линзы во второй серии экспериментов использовался пластиковый диэлектрический трафарет с шириной отверстия 120 мкм и толщиной 400 мкм. Использование данного типа линзы позволило провести исследование влияния различных дефектов отверстия в линзе и времени осаждения наночастиц на геометрические параметры формируемой структуры.

Заключительная серия экспериментов с использованием проводящей матричной линзы проведена в целях изучения влияния величины плотности поверхностного заряда линзы, а также значений размера и заряда наночастиц на параметры структуры. Линза представляла собой металлическую пластину толщиной 120 мкм с матрицей 35×33 из круглых отверстий размером 280 мкм и расстоянием между центрами 390 мкм. Использование проводящей линзы позволило изменять плотность поверхностного заряда на линзе путем варьирования подводимого к линзе напряжения при условии, что подложка заземлена. С увеличением разности потенциалов между подложкой и линзой удалось сформировать структуру с минимальным размером 14 мкм при ширине отверстия 280 мкм, что демонстрирует высокую эффективность процесса фокусировки наночастиц с использованием проводящей матричной линзы (рис. 1).

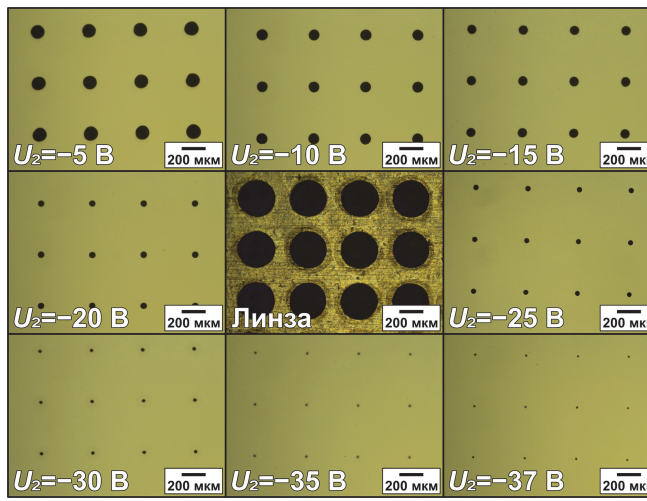
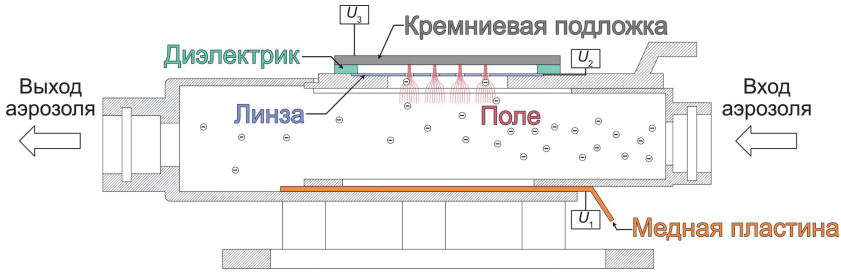
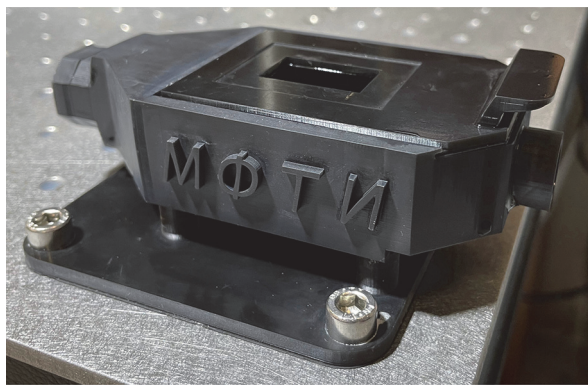


Рис. 1. Фотографии структур, напечатанных через проводящую матричную линзу при варьировании потенциала на линзе U_2

Для проведения экспериментов разработан и изготовлен испытательный стенд, состоящий из источника наночастиц, зарядного устройства для униполярной зарядки наночастиц [2] и герметичной камеры для печати наночастицами. Данный стенд обеспечивает возможность в широком диапазоне изменять ряд основных параметров наночастиц: концентрацию, размер, форму, скорость, элементный состав и значение электрического заряда. Изготовлена простая и удобная в эксплуатации камера для печати с параллельной подачей аэрозоля (рис. 2), обеспечивающая высокую эффективность фокусировки, а также универсально подходящая для всех типов линз.



а



б

Рис. 2. Чертеж камеры печати в разрезе (*а*); фотография камеры печати (*б*)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10127, https://rscf.ru/project/22-79-10127.

Литература

1. Ivanov V. et al. Aerosol Dry Printing for SERS and Photoluminescence-Active Gold Nanostructures Preparation for Detection of Traces in Dye Mixtures // Nanomaterials, 2022. Vol. 12. № 3. P. 448.
2. Ефимов А. et al. Efficient Charging of Aerosol Nanoparticles by Corona-needle Charger with Improved Design for Printing of Metallic Microstructures // International Journal of Engineering, 2024. Vol. 37. № 10. P. 1926–1935.

УДК 621.315.592

Технологические особенности формирования эпитаксиальных структур кремния для высокоэффективных СВЧ-диодов

Дубкова А. С.[1,2]
[1] *АО «НПП «Исток» им. Шокина»*
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
Dubkova.a.s@mail.ru
[2] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе рассмотрены технологические приемы, позволяющие методом эпитаксии кремния из газовой фазы при пониженной температуре получать структуры с толщиной активных областей менее 0,1 мкм и значительным уровнем легирования в диапазоне от 10^{13} до 10^{19} см$^{-3}$.
Ключевые слова: кремний; газофазная эпитаксия; СВЧ-диоды; ЛПД.

Кремниевые СВЧ-диоды, работающие в мм-диапазоне длин волн, предъявляют строгие требования к многослойным эпитаксиальным структурам, на которых они создаются. Тонкие слои должны различаться не только уровнем легирования, но и типом проводимости. Поскольку СВЧ-диоды работают в жестких режимах, слои также должны быть бездефектными.

Решение поставленной задачи осуществляется путем применения низкотемпературного процесса газофазной эпитаксии при пониженном давлении в реакторе с использованием пиролиза моносилана. Осаждение при пониженном давлении улучшает качество растущих кристаллических слоев и позволяет снизить температуру эпитаксии. При температурах роста слоя ниже 1000 °С значительное влияние на профиль распределения примеси по толщине эпитаксиального слоя оказывает эффект поверхностной сегрегации примеси. С учетом наличия сегрегации примеси варьировались режимы предварительного запуска легирующей добавки — диборана и арсина в реактор (в целях насыщения приповерхностного слоя), роста и отжига после роста (для уменьшения влияния на наращивание последующих слоев) [1, 2].

Было обнаружено, что уровень легирования p-слоев, граничащих с p^+-слоем, почти не зависит от уровня легирования подложки p^{++} ($4 \cdot 10^{19}$–$1{,}5 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$), но зависит от температуры наращивания и чем выше температура, тем выше уровень. Это совпадает с написанным ранее в работе [3]: автолегирование бором уменьшается при понижении температуры осаждения слоя, а автолегирование мышьяком — увеличивается. Также было замечено, что профиль легирования переходных областей p^+-слоя зависит не только от режима наращивания слоя, но и от режимов предварительного запуска лигатуры в реактор и отжига слоя. И есть отличия при легировании слоев бором и мышьяком или фосфором. Использование мышьяка в качестве легирующей примеси позволяет получать слои с высоким уровнем легирования более тонкими.

Для получения эпитаксиальной структуры кремниевого лавинно-пролетного диода $p^{++}pp^+pnn^+nn^{++}$-типа были проведены исследования по подбору технологических параметров роста высоколегированных слоев, различающихся типом проводимости. В работе удалось получить тонкие слои с концентрацией примеси бора

и мышьяка в p^+- и в n^+-слоях — $2 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$, что выше, чем ранее полученные значения [4]. Толщина высоколегированных слоев составляет 0,09 мкм.

Для изготовления кремниевых СВЧ-диодов с улучшенными характеристиками, большей мощностью и расширенным в сторону высоких частот рабочим диапазоном необходимы эпитаксиальные структуры с тонкими (0,1 мкм и менее) *n*- и *p*-слоями. Получение таких структур возможно газофазной эпитаксией при пониженном давлении 10–20 кПа и температуре 850–950 °С в реакторе путем пиролиза моносилана. При этом необходимо учитывать влияние эффекта сегрегации примесей в приповерхностных слоях во время наращивания. Закономерности легирования *n*- и *p*-слоев различаются. В зависимости от приборных задач получение тонких слоев требует технологической оптимизации всех этапов наращивания. Исследования поверхностной сегрегации примеси бора и мышьяка при оптимизации режимов наращивания тонких слоев кремния будут продолжены.

Литература

1. Величко О. И. Явление сегрегации примесных атомов в области залегания p-n-перехода // Доклады БГУИР, 2016. — № 6 (100). — С. 30–34.
2. Шенгуров В. Г., Чалков В. Ю., Шенгуров Д. В., Денисов С. А. Выращивание методом молекулярно-лучевой эпитаксии кремниевых слоев *n*-типа проводимости на сильнолегированных бором подложках // Физика и техника полупроводников, 2009. — Т. 43. — № 2. — С. 193–196.
3. Chung Keith H. Silicon-based epitaxy by chemical vapor deposition using novel precursor neopentasilane: dissertation candidacy for the degree of doctor of philosophy. Princeton, 2010. 149 p.
4. Дубкова А.С., Рябов В. Н., Тарасов И. В., Хахин Н. Б. Эпитаксиальные структуры кремния для СВЧ-приборов // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника, 2022. — № 2 (553). — С. 58–63.

УДК 535.33

Исследование свойств пленок из наночастиц алюминия, полученных методом сухой аэрозольной печати

Санатулина А. Ф., Новоселов А. К., Мало Д., Лизунова А. А.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследованы оптические свойства тонких пленок на основе наночастиц алюминия, полученных методом сухой аэрозольной печати на подложках из чистого кварцевого стекла и на пленках из полупроводниковых нанокристаллов ZnO. Получены пленки из наночастиц алюминия с различной оптической плотностью.

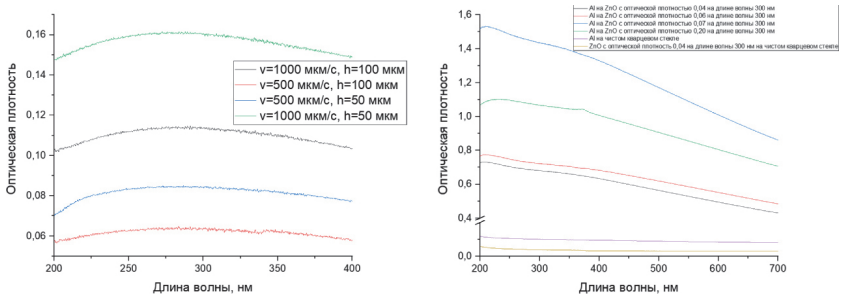
Ключевые слова: наночастицы алюминия; сухая аэрозольная печать; оптическая плотность.

В последние годы был предложен новый подход к аэрозольной печати, который не требует использования жидких чернил и основан на использовании газоразрядного генератора аэрозолей в качестве источника наночастиц [1]. В ходе работы был проведен синтез наночастиц алюминия с использованием газового разряда при таких условиях: поток газа 90 мл/мин; напряжение 1,5 кВ; конденсатор 107 нФ, с дальнейшей аэрозольной печатью при различных параметрах на подложках из чистых кварцевых стекол и пленках из полупроводниковых нанокристаллов ZnO различных оптических плотностей.

На спектрофотометре JASCO V-770 определены спектры поглощения пленок алюминия (рис. 1*а*), полученные при различных параметрах печати: скорости движения подложки и отступа между линиями пленки. Было обнаружено, что при увеличении скорости в два раза с 500 до 1000 мкм/с при постоянном отступе между линиями 100 и 50 мкм оптическая плотность полученных пленок на длине волны 300 нм увеличивается с 0,06 до 0,11 и с 0,08 до 0,16 соответственно. Можно предположить, что увеличение оптической плотности пленок происходит из-за сдувания аэрозолем уже нанесенных наночастиц, так как при скорости 500 мкм/с аэрозоль дольше пребывает в определенном месте, чем при скорости 1000 мкм/с. А при уменьшении отступа между линиями в два раза с 100 до 50 мкм при постоянной скорости 500 и 1000 мкм/с оптическая плотность полученных пленок на длине волны 300 нм увеличивается с 0,06 до 0,08 и с 0,11 до 0,16 соответственно. Увеличение оптической плотности пленок происходит из-за пересечения наносимых линий при уменьшении отступа между этими линиями.

Во втором варианте экспериментов наночастицы алюминия наносились на пленки из полупроводниковых нанокристаллов ZnO различных плотностей (рис. 1*б*) для исследования эффекта плазмонного усиления фотолюминесценции ZnO в присутствии наночастиц алюминия. Использовались следующие параметры печати наночастиц алюминия на пленки из полупроводниковых нанокристаллов ZnO: скорость 1500 мкм/с и отступ между линиями 100 мкм. Так, пленки из наночастиц алюминия, наносимые на пленки из полупроводниковых нанокристаллов ZnO следующих оптических плотностей на длине волны 300 нм: 0,04; 0,06; 0,07; 0,20, имеют соответствующие оптические плотности после вычитания оптических

плотностей пленок из полупроводниковых нанокристаллов ZnO: 0,68; 0,72; 1,44; 1,07. При этом пленка из наночастиц алюминия при таких параметрах имела оптическую плотность, равную 0,10 на длине волны 300 нм. Таким образом, выявлено, что оптическая плотность пленки из наночастиц алюминия при нанесении на пленки из полупроводниковых нанокристаллов ZnO значительно больше, чем при нанесении такой же пленки на чистое кварцевое стекло.



а *б*

Рис. 1. Спектры поглощения: *а*) пленок из наночастиц алюминия, полученных при различных параметрах печати на чистых кварцевых стеклах; *б*) пленок из наночастиц алюминия, нанесенных на пленки из полупроводниковых нанокристаллов ZnO с различными плотностями

Таким образом, методом сухой аэрозольной печати были получены пленки из наночастиц алюминия при различных параметрах печати на подложках из чистого кварцевого стекла и на пленках из полупроводниковых нанокристаллов ZnO различных оптических плотностей. Были изучены свойства таких пленок и выявлено, что оптическая плотность пленки увеличивается при увеличении скорости движения подложки с 500 до 1000 мкм/с и увеличивается при росте отступа между линиями с 100 до 50 мкм. Было выявлено, что пленки из наночастиц алюминия имеют большую оптическую плотность при нанесении на пленки из полупроводниковых нанокристаллов ZnO, чем при нанесении на чистое кварцевое стекло.

Литература

1. Efimov A. A. et al. Investigation of sintering of silver lines on a heated plastic substrate in the dry aerosol jet printing // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. Vol. 1124. № 8. P. 081041.

УДК 621.382

Исследование метода синтеза оксида графена для приложений силовой электроники

Кузнецова В. В., Спиридонов С. В., Морозов М. В., Дробышев С. В.
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ
420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10
smailshka1998@mail.ru

В работе рассмотрена возможность использования оксида графена в качестве активного вещества суперконденсатора. Проведен анализ существующих методов синтеза порошковых материалов на основе оксида графена. В результате апробации синтеза получены тестовые образцы, исследованы их ключевые морфологические и структурные свойства.
Ключевые слова: конденсаторы; суперконденсаторы; оксид графена; материалы электроники.

Стремление к миниатюризации электронных компонентов приводит к необходимости поиска новых материалов и технологических подходов. В области силовой электроники перспективным направлением работ является улучшение активного вещества электродов конденсаторов и суперконденсаторов. Уменьшение размеров достигается за счет применения материалов с большими показателями удельной емкости, что требует сочетания особых электрохимических свойств и высокой удельной площади поверхности. В настоящее время рассматривается возможность использованияе материалов на основе графена, таких как оксид графена (ОГ) и восстановленный оксид графена (ВОГ) [1, 2]. Благодаря расслоению атомарных слоев наблюдается развитая поверхность и высокая способность к захвату и удержанию заряда. Низкое сопротивление обеспечивает хорошие показатели рабочих токов.

В ряде публикаций [3, 4, 5] продемонстрированы прототипы конденсаторов на основе ОГ и ВОГ. Заявляются показатели емкости до 1045 Ф/г, плотности энергии до 15 Вт/кг и плотности мощности до 4 кВт/кг. Наибольшей сложностью при разработке таких конденсаторов является проработка получения чистых материалов с заданной морфологией и составом. В представленной работе рассмотрен синтез оксида графена модифицированным методом Хаммера [6]. Несмотря на хорошую известность, существующие модификации позволяют получать структуры со значительно различным качеством [7]. В ходе апробации собственного подхода проведена характеризация свойств синтезированных образцов. Подтверждено наличие развитой поверхности с выраженным расслоением графеновых структур. Стехиометрическое соотношение элементов и структурный анализ свидетельствуют о низком содержании примесей и посторонних фаз.

Литература

1. Raza W., Ali F., Raza N., Luo Y., Kim K. H. et al. Recent advancements in supercapacitor technology // Nano Energy, 2018. Vol. 52. P. 441–473.
2. Gautham Prasad G., Shetty N., Thakur S., Rakshitha, Bommegowda K. B. Supercapacitor technology and its applications: a review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 561. № 1. P. 012105.

3. Liu X., Shang P., Zhang Y., Wang X., Fan Z. et al. Three-dimensional and stable polyaniline-grafted graphene hybrid materials for supercapacitor electrodes // Journal of Materials Chemistry A, 2014. Vol. 2. № 37. P. 15273–15278.
4. Jana M., Khanra P., Murmu N. C., Samanta P., Lee J. H. et al. Covalent surface modification of chemically derived graphene and its application as supercapacitor electrode material // Physical Chemistry Chemical Physics, 2014. Vol. 16. № 16. P. 7618–7626.
5. Tseng L. H., Li W. C., Wen T. C. The effectiveness of graphene oxide added in activated carbon for superior supercapacitor performance // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2023. Vol. 143. P. 104684.
6. Selvakumar D., Sivaram H., Alsalme A., Alghamdi A., Jayavel R. Facile synthesize of free standing highly conducting flexible reduced graphene oxide paper // Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2016. Vol. 27. P. 6232–6241.
7. Park S., An J., Potts J. R., Velamakanni A., Murali S. et al. Hydrazine-reduction of graphite-and graphene oxide // Carbon, 2011. Vol. 49. № 9. P. 3019–3023.

УДК 621.3.049

Технология изготовления магнитных Холл-структур на поверхности чешуек графита

Силина С. К.[1], Турпак А. А.[1], Шишелов А. Ф.[1], к. ф.-м. н., Давыденко А. В.[1], к. ф.-м. н., Куркина И. И.[2]

[1] ДВФУ, Лаборатория пленочных технологий
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
silina.sk@dvfu.ru
[2] СВФУ, лаборатория «Графеновые технологии»
677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58

В данной работе была отработана технология нанесения Холл-структур на микроскопические чешуйки графена и графита методом проекционной фотолитографии и плазменного травления. Полученные структуры были исследованы на наличие эффекта передачи углового момента от кристаллической решетки в магнитный слой с помощью электронов проводимости (Spin-orbit torque или SOT-эффект).

Ключевые слова: SOT-эффект; Холл-структуры; фотолитография.

SOT-эффект определяется спин-орбитальным взаимодействием — связью между спиновым и орбитальным движением электрона в атоме. Когда электрон движется вокруг ядра атома, его орбитальное движение создает магнитное поле. Это магнитное поле взаимодействует со спином электрона, вызывая изменение энергии его спиновой ориентации. Данный эффект оказывает большое влияние на магнито-транспортные свойства наносистем. С помощью спин-орбитального взаимодействия можно преобразовать зарядовый ток в спиновый и, таким образом, управлять намагниченностью систем посредством пропускания вдоль них зарядового тока. Такой способ управления ориентацией намагниченности является перспективным для создания устройств энергонезависимой магнитной оперативной памяти (MRAM), гибридных устройств «логика-в-памяти» (logic-in-memory) и нейроморфных вычислителей [1]. SOT-эффект позволяет перемагничивать среды с перпендикулярной и комбинированной анизотропиями. Эти преимущества делают SOT-эффект привлекательным для приложений как со стороны исследователей, так и индустрии.

Первоначально SOT-устройства состояли из трехслойных структур, в которых между слоями тяжелого метала и диэлектрика был расположен слой ферромагнетика. На сегодняшний момент известно о большом количестве SOT-устройств на основе различных классов материалов. Для изготовления энергонезависимой магнитной памяти интересны такие материалы, как топологические изоляторы, Ван-дер-Ваальсовские материалы, дихалькогениды переходных металлов, а также интересен графен в сочетании с вышеперечисленными материалами [2].

Методы подготовки тонких двумерных материалов включают в себя механическое отслаивание, химическое осаждение и магнетронное распыление. В настоящий момент механическое отслаивание является одним из основных способов получения атомарно тонких чешуек двумерных материалов, пригодных для исследования SOT-эффекта из-за сохранения высокого качества их кристаллической

структуры. Одним из первых материалов, который получали механическим отслаиванием от объемного материала, был графен и тонкие слои графита [3].

Главной целью данной работы является отработка полного технологического цикла напыления функциональной пленки на поверхность двумерной чешуйки и изготовление из нее Холл-структуры. В данный технологический цикл входит напыление слоев Pt(40 Å)/Co(7 Å)/Pt(30 Å) на установке магнетронного напыления на поверхность чешуек, создание Холл-структур с помощью проекционной фотолитографии и ионно-плазменного травления, изучение качества структур с помощью сканирующего электронного микроскопа и анализ магнитных свойств образцов с помощью Керр-микроскопии. Помимо установок, примененных для отработки технологического цикла, были использованы и другие установки для контроля процесса изготовления Холл-структур, например атомно-силовая микроскопия.

На первом этапе были отработаны параметры экспозиции проекционной фотолитографии, при которых достигалась максимальная резкость засвеченной области в фоторезисте. При этом пленка фоторезиста засвечивалась полностью по всей толщине. На втором этапе на подложку оксидированного кремния с чешуйками графита была осаждена магнитная пленка Pt/Co/Pt. Пленка, осажденная на поверхность чешуйки, демонстрировала перпендикулярную магнитную анизотропию. На третьем этапе из пленки на чешуйке графита была сформирована Холл-структура. Магнитные свойства Холл-структуры сравнивались с магнитными свойствами неструктурированной пленки на графите.

В результате была отработана технология изготовления Холл-структур из пленок, выращенных на поверхности чешуек графита. Данная технология будет использована при работе с чешуйками любых перспективных двумерных материалов, в том числе для измерения аномального Холл-эффекта и величины SOT-эффекта в исследуемых структурах.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-00065.

Литература

1. Огнев А. В. Управление спин-орбитальным крутящим моментом и перемагничиванием в магнитных гетероструктурах на основе топологических материалов и их приложение.
2. Ткачев С. В., Буслаева Е. Ю., Губин С. П. Графен — новый углеродный наноматериал // Неорганические материалы, 2011. — Т. 47. — № 1. — С. 5–14.
3. Novoselov K. S. et al. Electric field effect in atomically thin carbon films // Science, 2004. Vol. 306. № 5696. P. 666–669.

УДК 621.382.233

Изготовление высоковольтного диода с использованием кремниевых структур со сквозными каналами *p*-типа

Царева Е. А.[1], Скиданов А. А.[1], Коновалов А. В.[1], Веневцев С. М.[1], Середин Б. М.[2], д. т. н.
[1] АО «ВЗПП-МИКРОН»
394033, г. Воронеж, Ленинский просп., 119А
[2] ЮРГПУ им. М. И. Платова
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

Разработана технология изготовления диода с использованием кремниевых структур со сквозными каналами *p*-типа (КССК). Следующим этапом является усовершенствование технологии для изготовления высоковольтного прибора. Для этого была разработана топология нового устройства, рассчитана система охранных колец, проработан производственный маршрут.
Ключевые слова: термомиграция; кремниевые структуры со сквозными каналами; диод.

Основным процессом создания сквозных каналов *p*-типа является термомиграция (перекристаллизация алюминия сквозь толщину кремниевой пластины), которая позволяет создавать изолированные кремниевые структуры произвольной формы. На основе данных структур был разработан диод обратной полярности.

Такой прибор позволит упростить технологию сборки силовых модулей, повысит тепловую, динамическую стабильность параметров и общую надежность изделия при лучших технико-экономических показателях в сравнении с технологией аналогичных приборов, изготовленных по технологии с защитной фаской или плавающими охранными кольцами.

В настоящее время на предприятии ведется работа по освоению конструкции диода с обратной полярностью расположения анодного и катодного вывода, изготовляемого с использованием пластин со сквозными каналами *p*-типа. Были получены образцы диодов с пробивными напряжениями 260–270 В, что соответствует уровню напряжения пробоя плоского *p*-*n*-перехода для используемой марки кремния. Таким образом, полученные результаты позволяют приступить к разработке высоковольтного диода на основе кремниевой структуры со сквозными каналами *p*-типа. Для этого была разработана новая топология, рассчитана система охранных колец в САПР Silvaco TCAD и проработан производственный маршрут.

Разработка и освоение данной конструкции проводились на предприятии АО «ВЗПП-Микрон» совместно с ЮРГПУ имени М. И. Платова.

УДК 538.97

Влияние параметров импульсного лазерного излучения на процессы модификации наночастиц металлов в аэрозольном потоке

Ворошилова В. А., Корнюшин Д. В., Борисов В. И., Долгов В. А., Иванов М. С., Иванов В. В.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследована эффективность спекания импульсным лазерным излучением агломератов размером 200 нм аэрозольных наночастиц золота в потоке инертного газа, синтезированных в импульсном газовом разряде, до квазисферических наночастиц размером 115 нм в зависимости от параметров лазерного излучения.
Ключевые слова: сферические наночастицы; агломераты наночастиц; лазерное спекание; эффективность спекания; аэрозольная печать.

В ряде технологических машин микроэлектроники, используемых для нанесения металлических слоев и плазмонных наноструктур, перенос металла осуществляется в форме наночастиц (НЧ), которым свойственно объединяться в агломераты в процессе перемещения в аэрозольном потоке. Осаждение агломератов на подложку может приводить к появлению нежелательной пористости формируемого слоя. Спекание агломератов (модификация) позволяет формировать НЧ квазисферической формы контролируемого размера, что необходимо для их плотной укладки в целях получения наибольшей проводимости элементов микроэлектроники и для формирования плазмонных наноструктур.

В данной работе исследована модификация импульсным лазерным излучением агломератов аэрозольных НЧ золота в потоке инертного газа, синтезированных в импульсном газовом разряде (рис. 1). В качестве источников лазерного излучения были выбраны два лазера: CNI AO-S-1064 и лазер-компакт Tech-1053 с длинами волн 1064 и 1053 нм соответственно. Модификация агломератов НЧ производилась в ячейке лазерной модификации с длиной рабочего канала 180 мм и диаметром 3 мм. Средний размер первичных агломератов и модифицированных НЧ исследовался с использованием анализатора дифференциальной электрической подвижности TSI SMPS 3936.

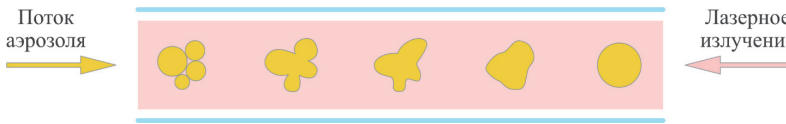


Рис. 1. Схематическое изображение процесса модификации агломератов лазерным излучением

Согласно теоретической оценке, расчетное время остывания сферической НЧ золота диаметром 50 нм в воздухе составляет около 1 мкс [1, 2]. Энергия импульса лазерного излучения, воздействующего на первичные агломераты НЧ, затрачивается на их модификацию и теплоотдачу в окружающий газ. Использование

лазерного излучения с высокой частотой следования импульсов (>1000 Гц) является нецелесообразным по причине нагрева транспортного газа в рабочем канале ячейки лазерной модификации, которое приводит к повторной агломерации модифицированных НЧ. Таким образом, в проведенных исследованиях НЧ золота в ячейке лазерной модификации не накапливают энергию между лазерными импульсами, так как период следования импульсов составляет не менее 1 мс.

На рис. 2 представлен график зависимости среднего размера НЧ в потоке от плотности энергии излучения и частоты следования импульсов для CNI-1064 и Tech 1053. Основываясь на результатах, можно сделать вывод, что существует минимальная энергия единичного импульса, необходимая для процесса модификации агломератов НЧ. Кроме того, в целях минимизации потерь энергии на процессы теплопередачи и нагрева транспортного газа требуется лазерное излучение с меньшей длительностью и количеством импульсов излучения.

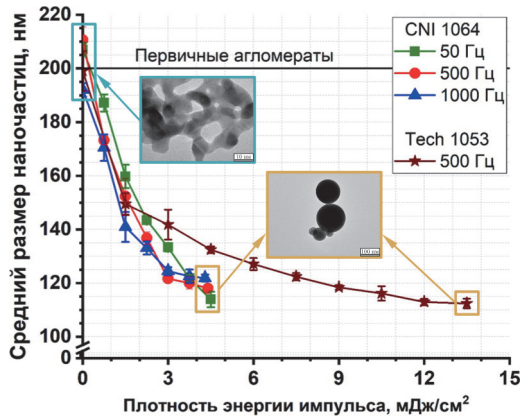


Рис. 2. График зависимости среднего размера наночастиц от плотности энергии излучения источников излучения CNI 1064 и Tech 1053 и вставки ПЭМ-снимков агломератов и модифицированных НЧ

По результатам исследований установлено, что с уменьшением длительности импульса лазерного излучения с 15 до 5 нс, используемого в процессах модификации НЧ, понижается пороговое значение плотности энергии импульса с 13,5 до 4,5 мДж/см^2, необходимое для модификации агломератов НЧ в уединенные квазисферические наночастицы.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание) № 075-03-2024-107, номер проекта FSMG-2022-0034.

Литература

1. Evans P. Surface Plasmon Enhanced Heating of Gold Nanoparticles: A Plasmonic Optical Switch. Doctoral Dissertations, 2007.
2. Xi Q., Li Y., Zhou J., Li B., Liu J. Role of Radiation in Heat Transfer from Nanoparticles to Gas Media in Photothermal Measurements // Int. J. Mod. Phys. C, 2019. 30, 1950024. DOI: 10.1142/S0129183119500244.

УДК 666.1.056.2

Разработка и оптимизация метода сенсибилизации и дальнейшей металлизации полимерных изделий, полученных с использованием аддитивных технологий

Карзакова В. С., Тюрина С. А., к. т. н., Демин В. Л., к. т. н.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

Проведен анализ тенденций развития в области металлизации 3D печатных полимерных изделий в целях получения металлического покрытия. Проведены опыты по получению таких покрытий на напечатанных образцах.
Ключевые слова: химическое осаждение металлов; металлические покрытия; 3D-печать; материалы для 3D-печати.

На сегодняшний день 3D-печать полимерными материалами является наиболее широкоприменяемой технологией аддитивного производства. Благодаря относительной дешевизне материалов и отсутствию необходимости применения оснастки в производстве штучных изделий можно быстро производить изделия совершенно разной формы. Однако зачастую свойства получаемых изделий не могут удовлетворять предъявляемым требованиям.

Чтобы придать изделиям повышенную устойчивость к свету, истиранию и задать им специальные свойства, могут применяться композиционные материалы или наноситься защитные и функциональные покрытия.

Такой подход применим при изготовлении проточных химических реакторов, деталей микророботов и других изделий, значительно снижая производственные затраты [1, 2].

Согласно обзорной статье, в период с 2012 по 2022 гг. в базе данных SCOPUS было опубликовано около 20 500 документов, касающихся металлических покрытий. В настоящее время направление металлизации полимеров вновь приобрело актуальность [3].

Отчасти это может быть связано с появлением нового подхода, применимого в 3D-печати. Вместо последовательного нанесения слоев сенсибилизатора и активатора в случае химического осаждения или нанесения проводящего слоя + металлизации в гальванической ванне, как в случае электрохимического процесса, было предложено модифицировать печатный материал в целях придания им восстановительной способности.

Это решение может сократить временные затраты при производстве, а также повысить гибкость процесса при печати модифицированным материалом поверх обычного за счет исключения целых этапов и необходимости использования оснастки при селективной печати. В некоторых случаях технология предусматривает получение покрытий из разных металлов [4].

Во время нашего исследования мы сосредоточены на достижении следующих целей:

- выбор соединения для модификации печатного материала;
- получение опытных образцов покрытия на модифицированном материале;

- изучение свойств модифицированного материала, его способность к хранению;
- изучение процессов, протекающих на каждом этапе получения покрытия;
- выбор качественных и количественных методов оценки свойств получаемых покрытий.

Литература

1. Kucherov F. A., Romashov L. V., Ananikov V. P. Development of 3D+G printing for the design of customizable flow reactors // Chemical Engineering Journal. 2022. Vol. 430. Part 1. Article ID 132670. ISSN 1385-8947. DOI: 10.1016/j.cej.2021.132670.
2. Perera A. T. K., Wu K., Wan W. Y., Song K., Meng X., Umezu S., Wang Y., Sato H. Modified polymer 3D printing enables the formation of functionalized micro-metallic architectures // Additive Manufacturing, 2023. Vol. 61. Article ID 103317. ISSN 2214-8604. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103317.
3. Muraliraja R., Anthoni Sagaya Selvan R., Selvakumar A., Franco M., Tamilarasan T. R., Sanjith U., Wei Sha, Jothi Sudagar. A review of electroless coatings on non-metals: Bath conditions, properties and applications // Journal of Alloys and Compounds, 2023. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.170723.
4. Xiao J., Zhang D., Zheng M., Bai Y., Sun Y., Zhang L., Guo Q., Yang J. 3D printing of metallic structures using dopamine-integrated photopolymer // Journal of Materials Research and Technology, 2022. Vol. 19. P. 1355–1366. ISSN 2238-7854. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.009.

УДК 67.02

Разработка технологии изготовления воздушных мостов для сверхпроводниковых интегральных схем

Телеганов М. И.[1], Смирнов Н. С.[1,2], Коршаков Н. Д.[1,2], к. т. н., Родионов И. А.[1,2]
[1] НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана
105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18
[2] ВНИИА им. Н. Л. Духова
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22

Разработана технология изготовления воздушных мостов для сверхпроводниковых интегральных схем. Добавление мостов на схему позволяет реализовать пересечения сигнальных линий и избавиться от паразитных мод. Приводится характеризация сверхпроводящих свойств мостов и диапазон оптимальных размеров.

Ключевые слова: сверхпроводниковые воздушные мосты; СВЧ-электроника; сверхпроводниковые интегральные схемы.

Сверхпроводниковые копланарные волноводы и резонаторы на их основе широко применяются в сверхпроводящих системах: квантовых вычислительных схемах, модулях квантовой памяти [1], параметрических усилителях [2], работающих в гигагерцевом диапазоне. Классический вид копланарного волновода состоит из микрополосковой линии, отделенной по двум сторонам слоями заземления.

При наличии в сверхпроводниковой интегральной схеме несимметричных элементов, а также разрывов может произойти возбуждение паразитных мод, приводящих к рассогласованию элементов и к дополнительным потерям. Для подавления негативных эффектов, а также для реализации пересечений сигнальных линий необходимо соединять элементы схемы при помощи воздушных мостов, представляющих собой арочную структуру из сверхпроводящего материала. Относительно недавно был разработан процесс изготовления сверхпроводниковых мостов с использованием операции травления перемычки моста [3].

Использование мостов в сверхпроводниковых схемах накладывает ряд ограничений:

1) материал моста должен быть из сверхпроводящего материала;
2) необходимо полностью удалить диэлектрик между мостом и базовым слоем схемы;
3) недопустимо использование аморфных материалов в качестве жесткого поддерживающего слоя;
4) необходимо подобрать режим очистки, обеспечивающий чистоту схемы и устойчивость воздушных мостов.

Данные ограничения связаны с высокой чувствительностью сверхпроводниковых схем к загрязнениям и аморфным материалам, вносящим диэлектрические потери. При этом использование в качестве материала моста сверхпроводящего металла устраняет электрические потери от него.

В работе приводится технологический процесс изготовления мостов, включающий в себя предобработку поверхности, формирование моста, финальную очистку. Рассматривается влияние геометрических параметров мостов на их устойчивость. Также приводятся измерения таких сверхпроводящих параметров, как

критическая температура и критический ток. Полученный технологический процесс позволяет изготавливать воздушные мосты с шириной от 7 мкм и длиной от 17 до 70 мкм. Измеренный критический ток моста вблизи температуры абсолютного нуля составляет 13,8 мА.

Данные работы проводились в НОЦ ФМН. В результате была разработана технология изготовления алюминиевых воздушных мостов для сверхпроводниковых интегральных схем.

Литература

1. Sardashti K. et al. Voltage-tunable superconducting resonators: a platform for random access quantum memory // IEEE Transactions on Quantum Engineering, 2020. Vol. 1. P. 1–7.
2. Xue H. et al. Fabrication and characterization of all-Nb lumped-element Josephson parametric amplifiers // Chinese Physics B, 2021. Vol. 30. № 6. P. 068503.
3. Chen Z. et al. Fabrication and characterization of aluminum airbridges for superconducting microwave circuits // Applied Physics Letters, 2014. Vol. 104. № 5.

УДК 621.315.61

Маскирующие слои для плазмохимического травления толстых диэлектрических слоев слабоотвержденного Cyclotene 3022-63

Аворник Т. В., Гусева Е. А., Аворник О. Ф., Алмазов О. Б.
АО «ОКБ-Планета»
173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. 1н
avorniktv@okbplaneta.ru

Проведен подбор маскирующего слоя для проведения плазмохимического травления (ПХТ) слабоотвержденного диэлектрика Cyclotene. Отмечены особенности данного материала и его взаимодействие с маской. Определен оптимальный маскирующий слой.

Ключевые слова: Cyclotene; диэлектрик; ПХТ; маскирующий слой; алюминий; титан; фоторезист.

Активное развитие СВЧ электроники в настоящее время предъявляет все более жесткие требования к миниатюризации компонентов, улучшению их быстродействия и качества. Одним из основных способов решения этих задач является применение технологии 3D-интеграции — создания многослойных, объемных структур.

Для отработки технологий 3D-интеграции было разработан квазимонолитный модуль на основе кремниевого интерпозера. Для межслойной изоляции был применен диэлектрик на основе полимеризованного бензоциклобутена (BCB) — Cyclotene 3022-63 компании Dow Chemical, позволяющий получить диэлектрическую пленку толщиной до 26 мкм. Он обладает низкой диэлектрической проницаемостью и уровнем электрических потерь, высокой стойкостью к травителям и хорошими планаризующими свойствами.

Несмотря на все преимущества, высокая механическая напряженность пленки вызывала значительное искривление пластины [1] и в процессе создания многослойной структуры возникали трещины и происходило разрушение структуры. Для снижения напряженности диэлектрика было уменьшено время его отверждения. Изменение степени полимеризации повлияло на один из основных этапов формирования многослойной структуры — плазмохимическое травление межслойной изоляции. В данной работе описан подбор маскирующего слоя для ПХТ слабоотвержденного Cyclotene.

На начальном этапе использовалась маска алюминия, обладающая хорошей стойкостью к травлению во фторидной плазме. Тем не менее применение алюминия является компромиссным решением, так как необходимо учитывать и негативные явления [2]: возникновение «козырька» в верхней части отверстий и образование «травы» на дне отверстий [3]. Применение алюминиевой маски для ПХТ слабоотвержденного Cyclotene вызвало деформацию его поверхностного слоя.

Следующим этапом стало применение фоторезистивной маски на основе толстопленочного позитивного фоторезиста SUN-1170p компании Suntific. Основным недостатком является сложность контроля прозрачного фоторезиста на прозрачном диэлектрике на этапах проявления и ПХТ. Из-за развитого рельефа

многослойной структуры возникает разнотолщинность фоторезиста и диэлектрика, которая осложняет контроль процессов и приводит к утонению фоторезиста у краев отверстий. При ПХТ маска в этих местах быстро стравливается и открывает Cyclotene, поверхность которого начинает подтравливаться. Удаление даже нанометрового слоя Cyclotene вызывает значительное ухудшение его адгезионных свойств и отслоение металлизации в дальнейшем в местах воздействия плазмы.

Отсутствие воспроизводимого результата при использовании фоторезистивной маски свидетельствовало о необходимости применения маскирующего слоя на основе металла. В качестве замены алюминия был выбран титан. При напылении титана без нагрева подложки произошла деформация поверхности. В то же время при напылении титана на установке УРМ 3.279.017 с нагревом подложки пленки диэлектрика и металла оставались ровными. Так как маска титана толщиной 0,5 мкм позволяла стравить не более 14 мкм Cyclotene, то в результате был подобран оптимальный маскирующий слой — комбинация титана толщиной 0,5 мкм и один слой фоторезиста Sun 1170p.

Литература

1. Self-Priming Low Stress Aqueous Developable Benzocyclobutene (AD-BCB) Photodielectric Material for Ad-vanced Wafer Level Packaging. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/d4e4/08de364324372ae508ef570df5d021483118.pdf (дата обращения: 27.03.24).
2. Красников Г. Я., Гущин О. П., Кузнецов П. И., Есенкин К. С., Рубинас О. Р., Горнев Е. С., Каширин П. А., Колобова Л. А., Руденко К. В., Мяконьких А. В. Исследование и разработка процессов формирования топологии в толстых полимерных пленках бензоциклобутена (BCB) // Электронная техника. Серия 3, 2016. — № 2 (162).
3. Chen Q., Zhang D., Tan Z., Wang Z., Liu L., Lu J. Thick benzocyclobutene etching using high density SF_6/O_2 plasmas // Journal of Vacuum Science & Technology B, 2011. 29, 011019.

УДК 621.019.34

Повышение надежности микросхем через многофакторный подход и интеграцию системы менеджмента качества

Мкртчян Г. А.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34

Микросхемы в микромодульном исполнении широко используются в авиации, космосе и медицине, но их производство часто сталкивается с высоким уровнем брака. Основные причины включают технологические ошибки и недостаточный контроль качества. Для повышения надежности требуется новая формула коэффициента качества производства, учитывающая многофакторный подход и элементы СМК.

Ключевые слова: коэффициент качества производства; СМК; надежность; многофакторный подход.

На сегодняшний день одним из ключевых элементов современной электроники являются микросхемы в микромодульном исполнении. Эти устройства, благодаря своей компактности и высокой плотности интеграции, находят широкое применение в различных отраслях, включая авиацию, космос и медицину.

Однако производство микросхем сталкивается с рядом проблем, одной из которых является высокий уровень брака. Согласно статистике, процент дефектных микросхем может достигать значительных величин, что оказывает негативное влияние на надежность конечных изделий. Основные причины брака включают в себя технологические ошибки, такие как неправильное размещение компонентов и проблемы с пайкой, использование некачественных или поддельных комплектующих элементов, а также недостаточный контроль качества на различных этапах производства. Эти факторы могут привести к коротким замыканиям, перегреву и другим сбоям в работе микросхем [1, 2].

Один из ключевых показателей надежности — это коэффициент качества производства (K_a), который определяет уровень требований к разработке и изготовлению аппаратуры. Ранее для его оценки уже применялись математические модели, основанные на интегральном коэффициенте K_a, предполагающем соблюдение всех условий научно-технической документации, однако этот метод оказался недостаточно точным, так как требования научно-технической документации часто нарушаются. В связи с этим возникает необходимость использования более сложного подхода, который учитывает разнообразные факторы, влияющие на отказы.

Существует много методов многофакторного расчета показателей надежности, таких как MIL-HDBK-217 и Telcordia SR-332, которые рассчитывают важный параметр надежности — интенсивность отказов. Эти методики при расчете учитывают конструктивные, производственные и другие виды отказов. К сожалению, они не берут в расчет коэффициент качества производства. На отечественных предприятиях коэффициент качества производства принимается во внимание, но сам по себе он не учитывает многофакторность, в отличие от данных методик. Поэтому важно интегрировать многофакторный подход с учетом коэффициента качества производства для повышения точности оценки надежности микросхем.

Важную роль в снижении уровня брака играет система менеджмента качества (СМК), подразумевающая процедуры входного и выходного контроля. Входной контроль включает проверку качества компонентов и материалов перед началом производственного процесса, тогда как выходной контроль направлен на проверку готовых изделий. Внедрение СМК как части многофакторного анализа поможет предприятиям лучше учитывать все факторы, влияющие на надежность, что позволяет более точно прогнозировать и предотвращать возможные отказы.

Таким образом, внедрение новой формулы, основанной на многофакторном подходе, который уже включает в себя элементы СМК, станет важным шагом на пути к улучшению качества и надежности микросхем.

Литература

1. Мишанов Р. О. Исследование признаков, видов, причин и механизмов отказов микросхем, выполненных по МОП-технологии // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2017. — Т. 2. — С. 228–234.
2. Varol S., Odougherty P. A Predictive Analysis of Electronic Control Unit System Defects Within Automotive Manufacturing // Journal of Failure Analysis and Prevention, 2022. Vol. 22. № 3. P. 918–925.

УДК 658.5.012.7

Контрольно-измерительное оборудование, применяемое при производстве изделий микроэлектроники

Нелюбин И. В.[1,2], **Волоховский А. Д.**[1]
[1] *ООО «НМ-Тех»*
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org
[2] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Работа представляет собой обзор основных методов контроля параметров технологических процессов, типично применяемых при производстве изделий микроэлектроники с субмикронными топологическими нормами. Рассмотрены типовая конструкция и устройство установок, реализующих данные методы.
Ключевые слова: контроль процессов; оборудование; критические размеры; толщина пленок; метрология.

В субмикронной технологии производства изделий микроэлектроники контроль технологических процессов приобретает ключевое значение. С организационной точки зрения контроль техпроцессов на производстве объединяет в себя две составляющие: измерительные методики, включая операции контроля различных параметров полупроводниковых приборов и структур, а также обеспечение контрольно-измерительным оборудованием, реализующим измерительные методики. Непрерывное развитие микроэлектронной технологии («скейлинг», применение новых материалов, усложнение конструкции полупроводниковых приборов) обуславливает постоянное увеличение количества параметров изделий, подлежащих контролю. Кроме того, продолжается ужесточение требований к методам контроля, а именно требований высокой точности и воспроизводимости результата измерений, оперативности получения результата, высокой производительности и степени автоматизации и др.

В табл. 1 представлены основные параметры приборов и структур, а также соответствующее оборудование, используемое в производственном цикле.

Таблица 1. Измеряемые параметры и соответствующие методики измерений

Параметр	Методы измерений
Толщина пленок	Эллипсометрия, угловая рефлектометрия, спектрофотометрия (в едином исполнении); фотоакустическая методика
Размеры элементов	Автоматизированная растровая электронная микроскопия (CD-SEM), оптическая скаттерометрия (OCD)
Глубина канавок, высота ступенек, наклон стенок	Оптическая скаттерометрия (OCD), профилометрия, атомно-силовая микроскопия
Доза легирования	Термоакустическая методика
Концентрация примесей	Рентгеновская флуоресцентная спектроскопия
Рассовмещение литографических слоев	Интерферометрия белого света

В работе кратко рассмотрены установки, реализующие вышеуказанные методы измерений, а также принципы их работы. Показаны особенности измерительного оборудования, сочетающего в себе сразу несколько измерительных методик (комплементарные измерения). Ярким примером подобного оборудования является установка для контроля толщин прозрачных пленок, включающая в себя эллипсометрию (в различных модификациях), угловую рефлектометрию и спектрофотометрию видимого и ультрафиолетового диапазона. Учет возможностей и ограничений каждой из данных методик позволяет наиболее эффективно применять эти методики для операций контроля процессов осаждения многокомпонентных пленок и пленок сложного состава [1]. Также показано устройство установки для контроля толщин непрозрачных (металлических) пленок, реализующей фотоакустическую методику измерения толщины [2].

Рассмотрены особенности устройства установки оптической скаттерометрии. Данная методика построена на основе стандартной интерферометрической техники (спектральная эллипсометрия), и позволяет анализировать картины дифракции от периодических структур в целях восстановления их трехмерного профиля [3]. Отмечены преимущества в простоте оборудования в сравнении со стандартными инструментами контроля критических размеров (CD-SEM).

Также показаны особенности оборудования, применяемого для контроля процессов фотолитографии (рассовмещение слоев), ионной имплантации, травления, а также концентрации остаточных металлических загрязнений.

Литература

1. Fujiwara H. Spectroscopic ellipsometry: principles and applications. John Wiley & Sons, 2007.
2. Thomsen C., Maris H. J., Tauc J. Picosecond acoustics as a non-destructive tool for the characterization of very thin films // Thin Solid Films, 1987. Vol. 154. № 1–2. P. 217–223.
3. Chen X., Liu S., Gao W. Optical scatterometry for nanostructure metrology // Metrology, Precision Manufacturing, 2019. P. 1–37.

УДК 004.891.3:621.382.2/.3

Разработка комплекса оптической инспекции топологии микроэлектронных компонентов

Чученков Д. А., Васильченко Д. В., д. т. н. Ромащенко М. А.
Воронежский государственный технический университет
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
kipr@vorstu.com

В статье представлена разработка автоматизированного комплекса оптической инспекции топологии микроэлектронных компонентов, предназначенного для обнаружения и маркировки дефектов кристаллов полупроводниковых пластин. Комплекс включает устройство позиционирования, камеру высокого разрешения и специализированное программное обеспечение (ПО) с использованием алгоритмов машинного обучения. Разработка позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, повысить точность и скорость определения дефектов.

Ключевые слова: микроэлектроника; автоматизированная оптическая инспекция; искусственный интеллект; дефектоскопия; полупроводниковая пластина.

В современном мире стремительный рост микроэлектронной промышленности вызывает необходимость развития технологического оборудования. Отсутствие современных отечественных устройств для производства микроэлектроники не позволяет соответствовать современным стандартам. Зависимость от импорта специализированного оборудования делает предприятия уязвимыми к внешним экономическим и политическим воздействиям.

Микроэлектронная промышленность стремится к миниатюризации. Это обусловлено потребностью в создании более компактных, производительных и энергоэффективных электронных устройств. С уменьшением размеров компонентов возрастают требования к точности и разрешающей способности технологического оборудования. Отклонения от норм и дефекты в производимой продукции могут существенно повлиять на функциональные характеристики и надежность конечного продукта [1].

Автоматизированная оптическая инспекция (АОИ) в производстве микроэлектроники является важным инструментом для обеспечения качества и надежности изготовляемого изделия. Современные системы АОИ позволяют проводить точный контроль на всех этапах производственного процесса, оперативно выявляя мельчайшие дефекты. Такой подход значительно снижает количество брака, что ведет к сокращению производственных издержек и повышению производительности. Высокая скорость и точность автоматизированных систем инспекции позволяют проводить массовую проверку продукта, обеспечивая его соответствие строгим стандартам качества и норм [2].

Разрабатываемый комплекс предназначен для автоматизированного обнаружения и классификации дефектов кристаллов на полупроводниковых пластинах. Программное обеспечение комплекса использует алгоритмы машинного зрения, в частности сверточную нейронную сеть на базе архитектуры ResNET. Для работы ПО требуется провести предварительное обучение. При этом оператор продолжает

свою обычную работу за компьютером, дополняя ее указанием дефектной области и обозначением типа дефекта. Данные действия производятся посредством интерфейса специализированного программного обеспечения (рис. 1). В процессе работы комплекс накапливает необходимые данные, тем самым обучаясь для последующего распознавания и классификации дефектов в автоматическом режиме.

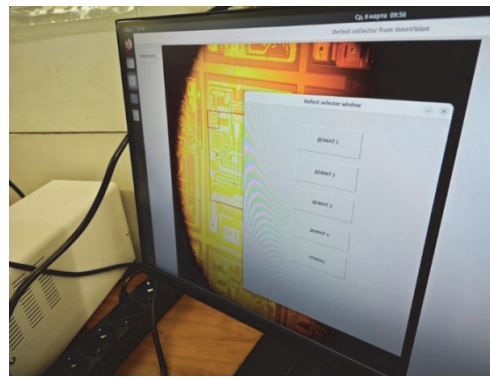


Рис. 1. Классификация дефектов в ПО

Принцип работы заключается в следующем: оператор устанавливает стол в нулевые координаты, далее размещает полупроводниковую пластину и запускает процесс сканирования. Модуль позиционирования передвигает стол с заданным шагом. Камера высокого разрешения получает изображение участка пластины и передает его в ПО для дальнейшей обработки (рис. 2).

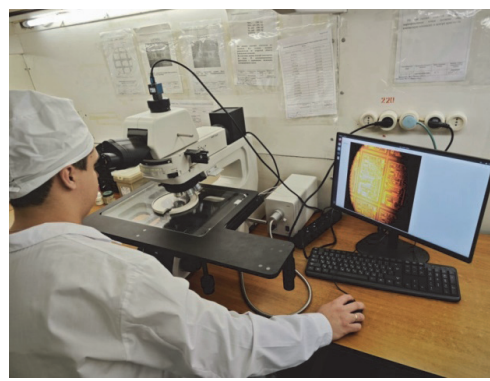


Рис. 2. Получение изображения

В результате создается карта дефектов, по которой система позиционирования автоматически маркирует области с дефектами.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие результаты. Разработан модуль автоматического позиционирования стола микроскопа (рис. 3). Создано специализированное программное обеспечение и алгоритм обработки изображения на основе методов искусственного интеллекта. Использование автоматического позиционирования и способа определения дефектов с помощью искусственного интеллекта позволит минимизировать человеческий фактор и увеличить скорость обработки изготовляемой продукции.

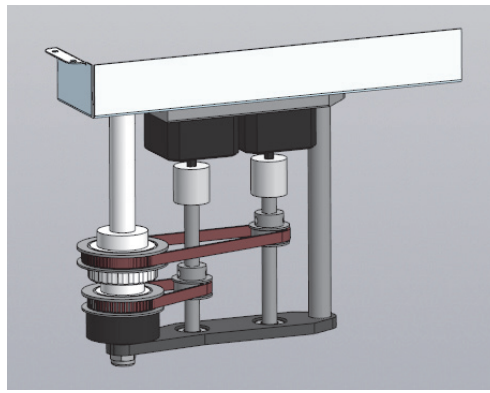


Рис. 3. Модуль автоматического позиционирования

Работа выполнена при финансовой поддержке федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках конкурса «Старт-23-1» (очередь II) (договор № 5049ГС1/89569 от 24.10.2023).

Литература

1. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие. 9-е изд., стер. — СПб.: издательство «Лань», 2021. — 480 с.: ил. ISBN 978-5-8114-0368-4.
2. Ромащенко М. А., Васильченко Д. В. Разработка аппаратной части комплекса оптической дефектовки топологии электронных компонентов // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2024. — Т. 20. — № 2. — С. 110–115. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.2.017. EDN CLRIYQ.

УДК 621.383.52

Фотодетекторы УФ-диапазона на основе ультратонких слоев GaN

Шубина К. Ю., к. ф.-м. н., Синицкая О. А., Эннс Я. Б., к. т. н., Мизеров А. М., к. ф.-м. н.
Алфёровский университет
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8/3 лит. А
rein.raus.2010@gmail.com

Изготовлены и исследованы УФ-фотодетекторы типа металл — полупроводник — металл на основе ультратонких эпитаксиальных слоев GaN. Приведены характеристики полученных фотодетекторов и краткое описание технологии их изготовления. Показаны варианты фотодетекторов с симметричным и асимметричным барьером Шоттки.
Ключевые слова: GaN; МПЭ ПА; УФ-фотодетекторы; структура металл — полупроводник — металл.

На сегодняшний день УФ-фотодетекторы (ФД) являются базовыми компонентами оптоэлектроники. Область их применения достаточно широка: от УФ-дозиметрии и контроля состояния УФ-излучателей до мониторинга озонового слоя и различных систем безопасности [1]. Одними из перспективных материалов для изготовления УФ ФД являются III-N-материалы, в частности GaN. Они обладают рядом преимуществ: за счет изменения состава, а значит, и ширины запрещенной зоны твердых растворов (Al)GaN (от 3,4 до 6,2 эВ), возможно управлять диапазоном спектральной чувствительности ФД, высокая подвижность носителей заряда обеспечивает хорошее быстродействие, а исключительная радиационная, тепловая и химическая стойкость позволяют приборам на основе III-N-полупроводников работать в жестких условиях и агрессивных средах [2].

Одним из факторов, сдерживающих активное внедрение полупроводниковых приборов на основе III-N-материалов, является крайне высокая стоимость III-N-подложек. В связи с этим в настоящее время III-N-гетероструктуры выращивают на решеточно-рассогласованных подложках, что приводит к высокой плотности дефектов, в частности дислокаций, в эпитаксиальных слоях. Для повышения качества эпитаксиальных слоев III-N используют различные буферные слои, темплейты, а также проводят предэпитаксиальную модификацию решеточно-рассогласованных подложек, что, в свою очередь, ведет к усложнению конструкции и удорожанию приборных гетероструктур. В то же время в последние годы в области сенсорики и детектирования излучения все большее внимание привлекают тонкие эпитаксиальные слои III-N-материалов, обладающие развитой морфологией поверхности, выращенные непосредственно на решеточно-рассогласованных подложках. Это объясняется не только простотой их получения, но и увеличенной площадью поверхности материала для эффективного взаимодействия со средой или излучением, а значит, повышенной чувствительностью по сравнению с планарными структурами при тех же размерах отдельного чувствительного элемента [3].

В рамках данной работы ультратонкие слои GaN с развитой морфологией поверхности были синтезированы методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота (МПЭ ПА) непосредственно на подложках Al_2O_3, были

изучены их морфология и свойства. На основе синтезированных эпитаксиальных слоев GaN были сформированы видимослепые УФ-фотодетекторы конструкции металл — полупроводник — металл с встречно-штыревой геометрией электродов с помощью стандартных подходов фотолитографии. Было создано два типа ФД: с симметричным барьером Шоттки с металлизацией Ni/Au и асимметричного типа, где один контакт омический Ti/Al/Ni/Au, а второй — Шоттки Ni/Au. Были исследованы характеристики полученных ФД и проведено их сравнение.

Работы выполнены при поддержке Фонда содействия инновациям (договор 12ГУПКЭС18/91736 от 27.12.2023).

Литература

1. Rogalski A., Bielecki Z., Mikołajczyk J., Wojtas J. Ultraviolet Photodetectors: From Photocathodes to Low-Dimensional Solids // Sensors, 2023. Vol. 23. № 9. P. 4452.
2. Morkoç H. Handbook of Nitride Semiconductors and Devices Vol. 1: Materials Properties, Physics and Growth. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. 1257 p.
3. Goswami L., Pandey R., Gupta G. Epitaxial growth of GaN nanostructure by PA-MBE for UV detection application // Applied Surface Science, 2018. Vol. 449. P. 186–192.

УДК 004.4

Разработка маршрутов проектирования смарт-датчиков для автономных и космических систем

Аряшев С. С.[1,2], Верник П. А.[3], к. т. н. Краснюк А. А.[2,4], Рощин Д. А.[1,2]
[1] АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы»
125285, г. Москва, ул. Беговая, 13, подвал пом. 6, комн. 1
aryashev@npc-ses.ru
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
aakrasnyuk@mephi.ru
[3] АНО «Институт стратегий развитий»
107031, г. Москва, ул. Петровка, 15/13, стр. 5
center@isd.center
[4] ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН НИЦ «Курчатовский институт»
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
petrovk@cs.niisi.ras.ru

Рассмотрены особенности разработки маршрутов проектирования (МП) на основе САПР с открытым исходным кодом для автономных смарт-измерительных и детектирующих систем. Смарт-измерительные и детектирующие системы должны обеспечить контроль наличия, в частности, патогенных микроорганизмов и вирусов на борту МКС и автономных аппаратов, работающих в комплексе с модулями управления на основе искусственного интеллекта (ИИ).

Ключевые слова: автономные системы; смарт-датчики; MPW; Open Source CADs.

Наличие радиационного фактора на борту пилотируемых и стационарных космических аппаратов создает предпосылки возможных патологических мутаций как вирусов, бактерий, так и генома основных форм живых организмов, что может иметь непредсказуемые последствия при контакте с объектами на поверхности Земли. Развитие технологий ИИ позволяет перейти к созданию автономных интеллектуальных (смарт-) датчиков широкого спектра действия. Представляет интерес развитие МП на основе САПР с открытым исходным кодом, позволяющим разрабатывать исследовательские проекты смарт-систем для космических приложений, в частности, в молодежных лабораториях университетов и в учебных дизайн-центрах для реализации по топологическим нормам КМОП 130–250 нм и запусками в рамках Multi-Project Wafer.

В процессе разработки маршрутов проектирования были выполнены следующие мероприятия:

1) изучение методологии и практик автоматизированного проектирования СБИС;
2) исследование и подбор САПР с открытым исходным кодом согласно единому реестру российского программного обеспечения;
3) освоение правил маршрута проектирования для интегральных транзисторных структур КМОП и КНИ КМОП;

4) ознакомление с бактериальным и вирусным содержанием на пилотируемых космических аппаратах;
5) определение состава и форм исполнения автономных смарт-измерительных и детектирующих систем;
6) разработка тестовых структур МП в САПР с открытым исходным кодом для автономных смарт-измерительных и детектирующих систем;
7) разработка лабораторного практикума для студентов вузов по автономным интегральным преобразователям.

Работа выполнялась в рамках программы «Сириус.Лето» при поддержке АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы», ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, РТУ МИРЭА, НИЯУ МИФИ.

Маршрут проектирования и правила проектирования используют решения для Open Source ПО: OpenROAD, OpenLANE или Qflow, а также отечественных САПР от НПК «Технологический центр» «Ковчег» для базовых матричных кристаллов (БМК) и базовых кристаллов (БК). Лабораторный практикум соответствует требованиям ФГОС 3+ и содержит учебно-методический материал для студентов вузов.

Результаты проделанной работы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты работы «Разработка маршрутов проектирования смарт-датчиков для автономных и космических систем»

№ п/п	Наименование этапа	Полученный результат
1	Освоение САПР схемотехнического проектирования	Подготовлены исходные данные для разработки тестовых структур; Изучены биокибернетические требования для пилотируемых КА. Разработаны ИМКД (исходные материалы для оформления ЭКД) для тестовых структур. Проведены опытные запуски САПР для проектирования.
2	Разработка и модельные испытания тестовых структур	Разработаны рабочие КД и ТД для лабораторного практикума. Разработаны программная, логическая модели. Разработаны тесты функционального контроля и контроля электрических параметров тестовых заданий лабораторного практикума. Передан в ДЦ РТУ МИРЭА проект лабораторного практикума.

Литература

1. Обзор современных САПР для ПЛИС. — URL: https://russianelectronics.ru/files/39084/Pages17- 29%20from%20chip10-11_2008.pdf.
2. Стаховский В. В. Системы автоматического проектирования. Основная функция САПР. Требования, необходимые для создания САПР // Международный студенческий вестник, 2020. — № 1. — URL: https://eduherald.ru/ru/article/view?id=19884.

УДК 004.4

Результаты создания маршрута контролируемого проектирования доверенной ЭКБ

Верник П. А.[1], Аряшев С. С.[2]
[1] АНО «Институт стратегий развития»
107031, г. Москва, ул. Петровка, 15/13, стр. 5
Center@isd.center
[2] АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы»
125285, г. Москва, ул. Беговая, 13, подвал пом. 6, комн. 1

Обосновывается актуальность и приводятся результаты работ по созданию компонентов отечественных САПР для маршрута контролируемого проектирования доверенной ЭКБ, в том числе системы управления жизненным циклом и средств обеспечения доверенности при производстве СБИС на недоверенных фабриках.

Ключевые слова: доверенная ЭКБ; контролируемое проектирование; САПР; управление жизненным циклом.

Для электронной промышленности открывается новый рынок специальной электронной компонентной базы (ЭКБ) для доверенных аппаратно-программных платформ, предназначенных для стратегических объектов и систем цифрового управления критической информационной инфраструктурой [1].

Актуальной является задача создания отечественных средств проектирования и управления проектами по разработке доверенной ЭКБ, а также инструментов обеспечения доверенности с учетом производства кристаллов на недоверенных фабриках.

Разработка сверхбольших интегральных схем (СБИС) является сложным процессом, включающим множество итерационно повторяющихся обменов данными между отдельными инструментами, базами данных и системами. Оптимизация этого процесса может быть достигнута применением системы управления жизненным циклом ЭКБ, что позволит также сократить в разы время вывода изделий на рынок.

В 2021–2024 гг. в рамках государственных мер поддержки отечественных разработчиков средств производства электроники АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы» и НИЦ «Курчатовский институт» — ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН был создан и в настоящее время проходит испытания опытный образец системы доверенного проектирования, построенной на основе собственных оригинальных решений.

Основными компонентами данной системы являются:

- система управления проектами и жизненным циклом изделий ЭКБ контролируемого маршрута «Золотой чип»;
- электронная база данных (БД) доверенных библиотек элементов и сложнофункциональных (СФ) блоков;
- программный комплекс подготовки конструкторской документации (КД) СБИС, верификации топологии и электрической принципиальной схемы СБИС, сборки проектов для мультизапусков;
- система поддержки маршрута контролируемого проектирования для испытаний и сертификации готовых СБИС при их изготовлении на недоверенном производстве.

Совокупность компонентов системы доверенного проектирования решает следующие задачи:

- проектирование СБИС;
- управление и проектами и их отслеживание;
- контроль качества;
- верификация и подготовка к производству;
- производство изделий;
- управление комплексными проектами;
- управление продажами изделий.

Структурная схема системы доверенного проектирования представлена на рис. 1.

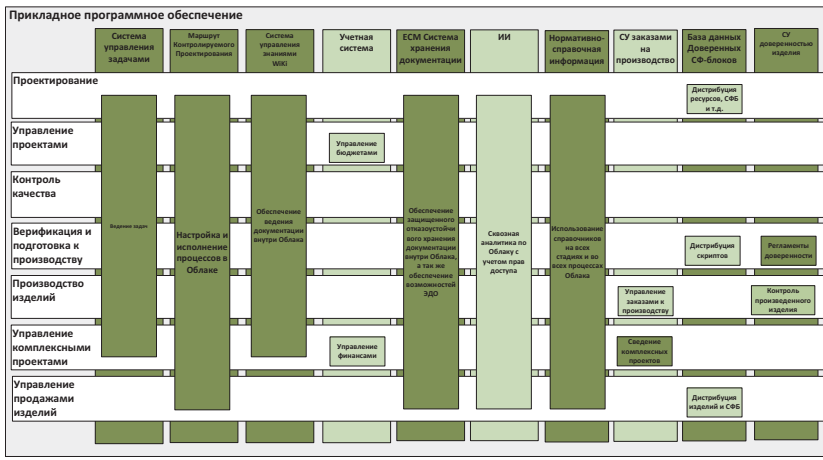


Рис. 1. Структурная схема системы доверенного проектирования

Система доверенного проектирования имеет облачную гибридную структуру с защищенным доступом через веб-интерфейс, что позволяет обеспечить ее гибкость и реализовать управление контролируемым проектированием.

Обеспечение доверенности разрабатываемых изделий реализуется на всех этапах проектирования, передачи на производство и испытания готовых образцов.

Литература

1. Попов С. А. «Микроэлектроника-2022» глазами связиста // Первая миля, 2022. — № 7. — С. 20–26.
2. Механик А. Г. Гром грянул, пора перекреститься // Стимул, 7 марта 2022. — URL: https://stimul.online/articles/sreda/grom-gryanul-pora-perekrestitsya (дата обращения: 16.08.2023).
3. Власов С. Е. Государством созданы условия для формирования отечественной инфраструктуры проектирования изделий радиоэлектроники // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2021. — № 3. — С. 14–19.

УДК 004.312.44

Топологическое моделирование элемента ПЛИС с комбинированным кодированием

Васенин И. А.
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29
rector@pstu.ru, Vasenin.Ioann@yandex.ru

В статье предлагаются элементы с комбинированным кодированием переменных или связей, которые обеспечивают снижение задержки при вычислении логической функции или минимизацию конфигурационной памяти для мультиплексора маршрутизации связей. С помощью ПО Microwind было проведено топологическое моделирование предложенных элементов, которое подтвердило их эффективность по показателям временной задержки, потребляемой мощности и занимаемой площади кристалла.
Ключевые слова: ПЛИС; LUT; позиционное кодирование; унитарное кодирование; новый элемент; топологическое моделирование; оценки сложности.

При разработке цифровой аппаратуры все активнее используются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Актуальность подтверждается ростом использования ПЛИС в том числе в областях критического применения — медицине, авионике, космической технике, аппаратуре управления АЭС, военной технике, ежегодно возрастает число научных публикаций в различных журналах по данной тематике. Количество реализуемых логических функций увеличивается в одном элементе ПЛИС, а число таких элементов достигает десятков миллионов. Однако при увеличении числа функций снижается быстродействие элемента, поэтому повышения быстродействия при реализации такого же числа элементов является важной задачей. При росте числа элементов происходит увеличение числа связей, что приводит к возрастанию конфигурацинной памяти межсоединений.

В работе представлены результаты топологического моделирования элемента с комбинированным кодированием, либо переменных при вычислении логической функции, либо связей мультиплексора маршрутизации. При этом достигается снижение временной задержки вычислений логической функции порядка 20% либо уменьшение конфигурационной памяти мультиплексора маршрутизации до 25%. Предлагаемый элемент защищен патентом РФ.

Литература

1. Тюрин С. Ф., Васенин И. А., Советов С. И. Логические элементы ПЛИС FPGA на основе комбинированного кодирования переменных // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления / Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, Information Technologies, Control Systems, 2023. — № 46. — С. 83–107.
2. Васенин И. А., Тюрин С. Ф. Унитарное программирование LUT таблиц для ПЛИС // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. Материалы XIV Междунар. интернет-конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (16 нояб. — 31 дек. 2022 г.) / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. — Пермь: ПНИПУ, 2023. — С. 100–107.

3. Васенин И. А., Тюрин С. Ф. Топологическое моделирование элемента ПЛИС с комбинированным кодированием входных переменных // Автоматизированные системы управления и информационные технологии. Материалы всерос. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 7–9 июня 2023 г.). — Т. 1 / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. — Пермь: изд-во ПНИПУ, 2023. — С. 44–49.
4. Vasenin I. A., Sovetov S. I., Oputin N. E., Tyurin S. F. Advanced Logic Gates for FPGAs // Proceedings of the 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), June 29 — July 3, Russia, 2023 [Electronic resource] / IEEE, IEEE Russia Siberia Section. Danvers: IEEE, 2023. P. 110–115. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/10225215 (дата обращения: 31.08.2023). DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225215.
5. Vasenin I., Tyurin S. F. One-hot Programming LUT for FPGAs // Proceedings of the Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (theory and practical applications) [Electronic resource]: November 20, 2023 St. Petersburg Russia 2023 / IEEE Russia North-West section, St. Petersburg Electrotechn. Univ. “LETI”. [s. l.]: IEEE, 2023. P. 132–135. URI: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10424393 (дата обращения: 14.02.2024). DOI: 10.1109/MDP60436.2023.
6. Патент на изобретение RU 2811404, Программируемое логическое устройство № 2023120319: заявл. от 02.08.2023, опубл. 11.01.2024 / Тюрин С. Ф., Васенин И. А., Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Советов С. И.; заявитель и правообладатель — Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

УДК 004.94:621.3.049.77

Сохранение конфигурации топологии IP при иерархической миграции

Михайлова Е. А.[1,2]
[1] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
mea5022@mail.ru
[2] *ООО «НМ-Тех»*
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

Статья посвящена разработке алгоритмов сохранения и улучшения конфигурации топологии ячейки при иерархической миграции. Рассматриваются общий маршрут иерархической миграции, проблемы поддержания электрической связности при автоматизированном переходе в новый технологический узел, а также решения, направленные на повышение качества топологии.
Ключевые слова: топология ИС; миграция топологии; автоматизация; САПР; иерархическая миграция; иерархическая топология; сохранение формы; сохранение симметрии; алгоритмы.

Миграция топологии — эффективный инструмент повторного использования спроектированных СФ-блоков путем автоматизированного переноса топологии из одного технологического узла в другой [1]. В процессе миграции комплексно решаются следующие задачи:

- выполнение конструкторско-технологических ограничений (КТО) целевой технологии;
- минимизация площади топологии;
- сохранение электрической связности между экземплярами ячеек в иерархии;
- сохранение заложенной инженером-топологом конфигурации топологии, к которой относятся: симметрия, регулярность, требуемая длина, ширина или форма проводников, и т. д.;
- исправление искажений, возникших при переходе на новые технологические нормы (улучшение топологии);
- выполнение рекомендованных правил проектирования (направленных на повышение процента выхода годных).

Основным этапом миграции, на котором происходит непосредственно переход к новым правилам проектирования, является сжатие топологии под контролем графа ограничений. При построении графа учитываются все КТО, что покрывает первую задачу из списка выше, а решением этого графа достигается минимизация площади, что относится ко второй задаче. Однако готового решения для остальных пунктов не существует. В настоящей работе рассмотрены подходы к решению задачи сохранения и улучшения исходной конфигурации, а также принципы сохранения электрической связности для иерархических СФ-блоков.

Для решения задачи сохранения конфигурации, которая определяется формой, размерами и взаимным расположением фигур, требуется базовый механизм сохранения расстояния. Данный механизм реализован в модифицированном алгоритме минимизации длины проводников [2], являющемся одним из шагов сжатия

топологии под контролем графа ограничений. Модифицированный алгоритм наряду с минимизацией длин проводников позволяет выдерживать заданные расстояния между парами сторон фигур.

Имея базовый механизм сохранения расстояний, можно не только выдерживать исходные расстояния между сторонами, но и задавать требуемые, а также, соответственно, улучшать исходную конфигурацию, к примеру выравнивать сегменты фигуры или вставлять избыточные контактные окна.

Помимо размеров фигур и расстояний между ними, при миграции иерархической топологии СФ-блоков необходимо сохранять электрическую связность между ячейками в иерархии. Миграция иерархической топологии выполняется снизу вверх по иерархии [3], а между ячейками одного уровня строится взаимосвязь на основе их взаимодействия в топологии; таким образом, по мере восхождения к более высокому уровню иерархии усложняется процесс подключения ячеек друг к другу. Следовательно, возникает необходимость сохранения исходного расположения точек подключения. Такой подход позволяет минимизировать влияние ячеек друг на друга и избежать конфликтов при решении графа.

Для сохранения симметрии и регулярности выделяются регулярные и симметричные группы объектов во входной топологии, а после применения новых КТО добавляются дополнительные требования на расстояния между сторонами, чтобы сохранить симметрию/регулярность. Для сохранения размеров, формы и взаимного расположения фигур предлагается сохранять ширину и длину сегментов фигуры, выравнивание горизонтальных/вертикальных сегментов фигур, расстояние между фигурами и включение одной фигуры в другую.

В настоящей работе рассматриваются общий маршрут миграции иерархической топологии, алгоритмы решения отдельных задач, возникающих в ходе его реализации, а также примеры использования механизмов сохранения и улучшения конфигурации топологии.

Литература

1. Калашников В. С., Керре А. Л., Розенфельд В. П., Семёнов М. Ю., Смирнов Ю. Г., Сотников М. А., Царапкин С. Ф. Ускорение перехода на отечественный технологический процесс с использованием автоматизированной миграции СФ-блоков // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2023. — С. 31–36.
2. Qianying Tang, Jianwen Zhu, Two-Dimensional Layout Migration by Soft Constraint Satisfaction // Sixth International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED'05), 2005. P. 35–39.
3. Розенфельд В. П., Сотников М. А., Топузов И. Г., Улуханов Э. А., Широ Е. Г. Система сжатия и миграции топологии стандартных ячеек // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем — 2005. Сборник научных трудов / Под общ. ред. А. Л. Стемпковского. — М.:ИППМ РАН, 2005. — С. 121–127.

УДК 004.912:621.382

Внедрение современных методов разработки технической документации в средствах проектирования

Штрыков П. С., Седов В. В., Надин А. С.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
pshtrykov@niime.ru, vsedov@niime.ru, anadin@niime.ru

В данной работе рассматривается проблематика разработки технической документации в базовых текстовых редакторах, а также предложено ее решение в виде перехода на упрощенный язык разметки Markdown.
Ключевые слова: PDK; Markdown; HTML; автоматизация; техническая документация.

Введение

В процессе разработки PDK одним из важных этапов является разработка технической документации. Большинство текстовых редакторов не приспособлены к совместной и параллельной работе над документами. С ростом объема поддерживаемой технической документации все актуальнее становится проблема работы в команде. Для решения данной проблемы предложен Markdown [1].

Разработка технической документации в Markdown

Markdown — упрощенный язык разметки, предназначенный для преобразования текста в HTML. Он популярен среди программистов и других пользователей благодаря своему интуитивно понятному синтаксису. Также используется такими популярными сайтами и приложениями, как Github, Discord, Telegram, WhatsApp и др.

Сегодня есть два превалирующих подхода к форматированию документов: визуальный WYSIWYG («Что видишь, то и получишь») и основанный на разметке.

В редакторах WYSIWYG пользователи работают непосредственно в презентационной форме документа. Этот подход в редактировании имеет ощутимые преимущества: такие инструменты легко понятны большинству, и они дают немедленный визуальный отклик.

Во втором подходе редакторы на языках с разметкой привносят еще один дополнительный слой — пользователи редактируют текст, который смешивается с командами. И уже компилятор преобразует текст с разметкой в презентационный формат. Несмотря на то, что инструмент разметки вносит в рабочий процесс сложность на первоначальном этапе, это предоставляет широкие возможности для автоматизации. Второй подход, в свою очередь, можно разбить еще на два — стандартный и облегченный.

Таблица 1. Градация редакторов и языков разметки

Подход форматирования	Визуальный	Разметка	Облегченная разметка
Редакторы	MS Office «Р7-Офис» LibreOffice	TeX XML Typst	Markdown Textile BBCode

Для разработки технической документации не приспособлены редакторы первой категории в соответствии с табл. 1, а стандартный язык разметки слишком сложный и обладает чрезмерным функционалом. Принимая во внимание популярность, простоту синтаксиса, универсальность, широкую поддержку от множества платформ, богатый набор инструментов и активное использование и развитие среди российских компаний и программистов, из языков упрощенной разметки был выбран именно Markdown.

Заключение

В работе авторами рассмотрена проблематика использования стандартных текстовых редакторов в разработке технической документации, исследованы и сформулированы достоинства и недостатки упрощенного языка разметки Markdown, а также его отличия от распространенных аналогов. Авторами предложена концепция внедрения Markdown в разработку документации PDK с последующей автоматизацией ее генерации.

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.

УДК 621.375

Быстродействующий КМОП операционный усилитель с широким динамическим диапазоном входных сигналов

Двинских П. Д.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
dvinskikh1975@gmail.com

В данной работе описан трехкаскадный быстродействующий КМОП операционный усилитель, который обеспечивает работу с сигналами в широком динамическом диапазоне входных напряжений. Благодаря своей симметричной структуре обеспечивается линейная работа усилителя в диапазоне напряжений от отрицательной шины питания до положительной. Операционный усилитель разработан с проектной нормой 180 нм и диапазоном рабочих напряжений от 0 до 1,8 В. Частота единичного усиления составляет 200 МГц, время установления выходного напряжения — 5 нс, коэффициент усиления в разомкнутом контуре — 64 дБ, запас по фазе — 60° и потребление — 1 мВт.
Ключевые слова: сложнофункциональный блок; КМОП-технология; операционный усилитель; аналоговая электроника; каскадные блоки; широкий динамический диапазон.

Операционный усилитель (ОУ) представляет собой универсальный блок, играющий важную роль в современной высокофункциональной аппаратуре. Эти устройства должны иметь набор параметров, удовлетворяющих разнообразным требованиям. ОУ используются как в цифровой технике, где важно быстродействие периферийных интерфейсов, так и в аналоговой электронике, где требуются высокая точность и линейность. Традиционные операционные усилители в составе сложнофункциональных блоков не обеспечивают широкого динамического диапазона входных сигналов без искажения их характеристик. Это ограничивает их применение в электронной технике. Операционные усилители, способные охватывать полный динамический диапазон входных сигналов, значительно расширяют возможности их использования как в аналоговой, так и смешанной аналого-цифровой аппаратуре.

Способность операционных усилителей работать с сигналами в диапазоне от отрицательной шины питания до положительной делает их универсальными для многих приложений, включая детекторную электронику. Благодаря поддержанию высокой точности и линейности во всем динамическом диапазоне такие усилители являются идеальными для использования в таких областях, как медицинская диагностика, научные исследования в области экспериментальной ядерной физики и физики высоких энергий, промышленная автоматизация, системы связи и другие направления исследований.

Конструкция операционного усилителя состоит из пяти основных блоков, показанных на рис. 1. Для решения проблемы с ограниченностью входного диапазона напряжений входной каскад построен на параллельно соединенных дифференциальных парах обоих типов проводимости. Для поддержания стабильности усиления входного дифференциального каскада была реализована схема gm-control для коррекции токов, протекающих в головном каскаде [1]. Колебания суммарной

крутизны входного каскада с использованием схемы gm-control не превышают 5%. В качестве нагрузки для входного дифференциального каскада используется свернутый каскодный усилитель. Для поддержания постоянного режима работы выходных активных элементов схемы используется схема задающего источника тока смещения. Выходной каскад операционного усилителя реализован по схеме усилителя мощности класса AB [2].

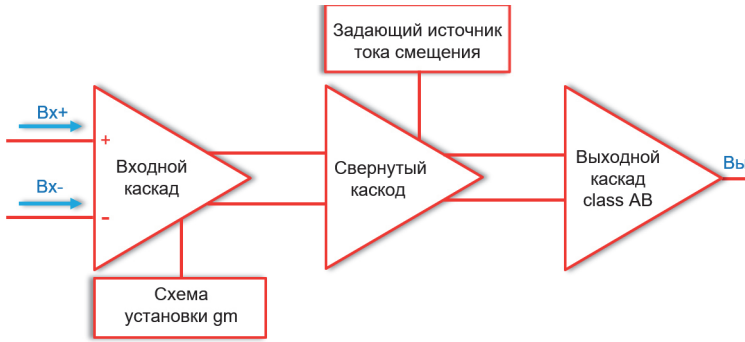


Рис. 1. Структурная схема операционного усилителя, работающего в широком диапазоне входных сигналов

Операционный усилитель имеет следующие характеристики:

- коэффициент усиления 60 дБ;
- запас по фазе 50°;
- частота единичного усиления 250 МГц;
- отклонение gm 1–5%;
- скорость нарастания выходного напряжения 300 В/мкс;
- время установления выходного сигнала 5 нс;
- потребляемая мощность 1 мВт;
- коэффициент ослабления синфазного напряжения 45 дБ;
- коэффициент влияния нестабильности источника 23 дБ.

Литература

1. Mohamed A. R., Ibrahim M. F. and Farag F. Automated design technique for constant-gm rail-to-rail for OTA input stage // 2012 24th International Conference on Microelectronics (ICM), Algiers, Algeria, 2012.
2. Del Cesta S., Catania A., Bruschi P. and Piotto M. A compact sub-1V class AB operational amplifier for low-voltage switched-capacitor circuits // European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD), Catania, Italy, 2017. 1–4 p.

УДК 621.382

Сложнофункциональный блок гибридного АЦП

Лобанков Д. С., Ямалиев С. И., Чербов А. Д., Норманов Д. Д., Аткин Э. В.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
DSLobankov@mephi.ru

Представлены результаты схемотехнической разработки гибридного АЦП с разрядностью 14 бит и частотой выборки 100 кГц, отличающегося малым энергопотреблением и занимаемой площадью. При проектировании использованы библиотеки КМОП 180 нм АО «Микрон». АЦП может быть использован для обработки сигналов матричных приемников.
Ключевые слова: АЦП; гибридный АЦП; матричные приемники; динамический компаратор; SAR; SLOPE.

В настоящее время большое распространение получили матричные приемники. Их используют во множестве направлений, таких как медицинская диагностика, системы видеонаблюдения, научные исследования и многие другие. Одной из важнейших частей таких устройств является аналого-цифровой преобразователь (АЦП), к которому предъявляются требования по разрядности и частоте выборки в зависимости от области применения приемника. Важной особенностью таких АЦП является параллельная обработка большого количества столбцов матрицы.

В данной работе основным требованием является возможность использования АЦП в канале. Это накладывает серьезные ограничения на выбор архитектуры. В итоге был выбран вариант гибридного АЦП в следующей конфигурации: АЦП последовательного приближения (SAR) [1] определяет старшие 5 бит, счетный АЦП (SLOPE) [2] считает младшие 9 бит. На рис. 1 изображена структурная схема канального 14-битного АЦП.

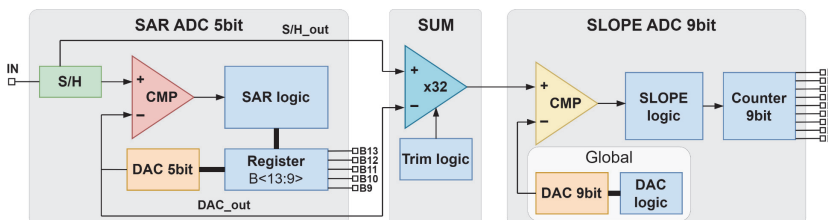


Рис. 1. Структурная схема АЦП

SAR АЦП выполнен по классической структуре. Одной из особенностей является использование динамического компаратора, что позволяет уменьшить энергопотребление схемы.

Для SLOPE АЦП в качестве источника линейно-возрастающего напряжения используется 9-битный емкостной ЦАП. Он является общим для всех каналов, что позволяет сэкономить место на кристалле. В схеме используется динамический компаратор с автокомпенсацией напряжения смещения, что позволяет уменьшить энергопотребление и повысить точность срабатывания.

Важным вопросом такой архитектуры является сшивка диапазонов SAR- и SLOPE-преобразователей. Для этого используется блок под названием SUM, который умножает разностный сигнал между входом и емкостной матрицей SAR на 32. Это позволяет растянуть измеряемый счетным АЦП сигнал до питания. Для обеспечения высокой точности преобразования предусмотрена тонкая подстройка блока. SUM представляет из себя операционный усилитель rail-to-rail по входу и выходу с емкостной обратной связью.

В результате была спроектирована схемотехника для сложнофункционального блока АЦП со следующими параметрами:

- разрядность 14 бит;
- ENOB 13,28 бит;
- частота дискретизации 100 кГц;
- напряжение питания 1,8 В;
- дифференциальная нелинейность 1 МЗР;
- интегральная нелинейность 1,5 МЗР;
- потребляемая мощность канального АЦП 400 мкВт.

Литература

1. Fredenburg J. and Flynn M. P. ADC trends and impact on SAR ADC architecture and analysis // 2015 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC), San Jose, CA, USA, 2015. P. 1–8. DOI: 10.1109/CICC.2015.7338380.
2. Ma Yan-Hua, Li Ji-Tong, Zhu Ming, Chang Yu-Chun. Optimal design of 10-bit single-slope ADC for CMOS image sensor based on swarm intelligent optimization algorithm // IET Circuits, Devices & Systems, 2021. 15. 10.1049/cds2.12070.

УДК 004.312

Разработка блока проверки целостности информации для встраиваемой флеш-памяти

Макеев Г.А.[1,2], Алексеев В.Д.[1,2], Васильев Е.С.[1]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
gmakeev@niime.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе представлен блок вычисления контрольной суммы CRC32 для содержимого флеш-памяти микроконтроллера с использованием языка описания аппаратуры SystemVerilog. Алгоритм реализован на базе комбинационной логики без использования сдвиговых регистров, что позволяет достичь высокого быстродействия при вычислении CRC для группы слов.
Ключевые слова: CRC32; SystemVerilog; флеш-память; микроконтроллер; целостность данных; контрольная сумма.

В современных защищенных микроконтроллерах в качестве энергонезависимого средства хранения информации используется встраиваемая флеш-память [1]. В флеш-памяти, как правило, размещаются операционная система, данные пользователя, секретные ключи для алгоритмов шифрования. Для хранения критических данных таких типов необходимо обеспечение механизмов защиты целостности информации в цифровой схеме микроконтроллера [2]. Эффективным способом обеспечения целостности данных, характеризующимся небольшими аппаратными затратами и высоким быстродействием, является добавление циклического избыточного кода (CRC) к блоку данных относительно небольшого объема [3]. На практике вычисление кода CRC в большинстве случаев реализуется в виде специализированного высокопроизводительного блока в структуре контроллера памяти [4].

Контроллер флеш-памяти инициирует начало операции вычисления избыточного кода, передавая адрес, данные строки и управляющие сигналы в блок вычисления CRC32. Контрольная сумма вычисляется для 32 слов строки, каждое из которых содержит 32 бита данных, и записывается в ее дополнительное слово. Блок принимает первое слово и с помощью комбинационной логики вычисляет для него избыточный код, используя в качестве значения по умолчанию код «0xFFFFFFFF», а после инкрементирует счетчик обработанных слов строки. Для следующего слова используется аналогичный алгоритм, однако в качестве начального значения CRC используется результат контрольной суммы для предыдущего слова. По описанному принципу выполняются вычисления для всех 32 слов строки, после чего блок передает контрольную сумму и сигнал завершения операции в контроллер, после же получения сигнала об успешном считывании CRC из блока счетчик обработанных слов сбрасывается.

На рис. 1 представлено условное графическое обозначение блока вычисления контрольной суммы CRC32 для строки флеш-памяти. Блок принимает запрос начала операции I_START_CRC_VALID и отвечает сигналом готовности O_START_CRC_READY. Сигнал I_ROW_ADDR задает адрес строки для вычисления избыточного кода, а блок формирует адрес слова O_WORD_ADDR для считывания

данных из флеш-памяти. Сигнал I_READ_VALID подтверждает завершение считывания данных и их готовность на входе I_READED_DATA для вычисления CRC. После вычисления контрольной суммы для всей строки блок разрешает сигнал O_CRC_VALID и передает избыточный код на выход O_CRC. Блок ожидает сигнал I_CRC_READY после завершения вычислений, чтобы передать данные и сбросить счетчик для начала новой операции. Вычисление избыточного кода для всей строки выполняется за 34 такта.

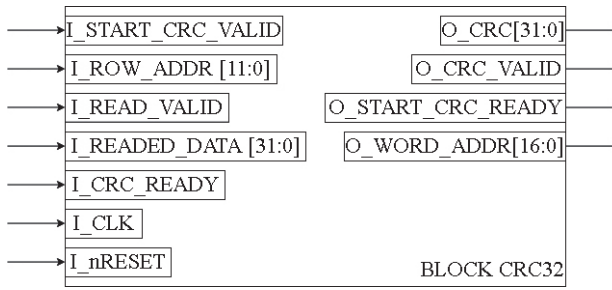


Рис. 1. Блок вычисления контрольной суммы

Предложено решение, при котором избыточный код реализуется для группы слов флеш-памяти общим объемом 1024 бита, и показано, каким образом реализованы вычисление и проверка данного кода. Таким образом, с применением описанных схемотехнических подходов удалось осуществить вычисление контрольной суммы для строки флеш-памяти с оптимальной производительностью и минимальными аппаратными затратами.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.
2. 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.
3. Philip Koopman, Cyclic Redundancy Code (CRC) Polynomial Selection For Embedded Networks // Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks, DSN-2004.
4. Harris D. M., Harris S. L. Digital Design and Computer Architecture. Morgan Kaufman, 2013.

УДК 621.382:004.087.2

Разработка сложнофункционального блока однократно программируемого ПЗУ на базе отечественной КМОП-технологии 90 нм

Ермаков И. В., Демин К. П.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
iermakov@niime.ru, kdemin@niime.ru

Разработан СФ-блок однократно программируемого ПЗУ с конфигурацией 64×39 и площадью 307×544 мкм^2 на базе отечественной КМОП-технологии уровня 90 нм. Для проверки в кремнии СФ-блока был разработан тестовый кристалл с последовательным интерфейсом ввода-вывода, содержащий восемь блоков памяти.

Ключевые слова: КМОП; однократно программируемое ПЗУ; СФ-блок.

В современных микросхемах для хранения данных используются сложнофункциональные (СФ) блоки памяти ОЗУ, ПЗУ, ЭСППЗУ или Flash [1, 2]. Каждый из видов памяти имеет свои достоинства, недостатки и области применения, поэтому в составе системы на кристалле используются блоки памяти различных видов. ПЗУ подразделяется на масочное, в котором программирование происходит на этапе производства, и однократно программируемое (OTP), которое может быть реализовано в виде пережигаемых током или лазером перемычек (Fuse) или пробиваемых конденсаторов (AntiFuse) [3]. Последнее представляется более перспективным, поскольку может быть запрограммировано с использованием одной дополнительной контактной площадки как на кристалле, так и в корпусе непосредственно пользователем в своих условиях, что гарантирует безопасность данных.

Для одной из самых современных отечественных КМОП-технологий уровня 90 нм был разработан СФ-блок однократно программируемого ПЗУ OTP AntiFuse с конфигурацией 64×39 и площадью 307×544 мкм^2. В состав блока памяти помимо матрицы ячеек входят управляющие цифровые и аналоговые схемы (рис. 1). Аналоговая часть обеспечивает генерацию и регулировку тока чтения, формирование и подачу защитного напряжения [4], а также пониженного напряжения питания на схему чтения. Цифровая часть осуществляет управление и переключение между режимами работы. Дешифратор выбирает строки в матрице [5]. Схема записи управляет программированием ячеек памяти, а схема чтения преобразовывает электрическое сопротивление ячейки памяти в логическое состояние. Для снижения энергопотребления в блоке памяти реализовано отключение питания аналоговой части в режиме ожидания. Время доступа при чтении составляет 500 нс. Для программирования используется дополнительный вывод VPP. Размер слова в операциях записи и чтения — 39 бит, из которых 32 бит информационных и 7 бит могут быть использованы для коррекции. Изначально блок памяти разработан под техпроцесс с напряжением питания 2,5 В, а затем был мигрирован под техпроцесс с напряжением питания 3,3 В. В процессе миграции были обнаружены и устранены неисправности, возникшие по причине использования транзисторов с более высоким пороговым напряжением. Спроектированный блок обладает необходимым

набором файлов для встраивания в другие проекты, поэтому его можно отнести к категории СФ-блоков.

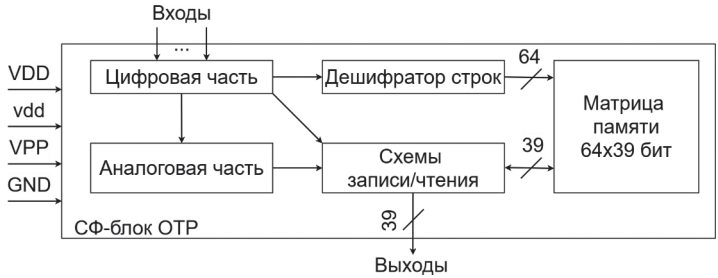


Рис. 1. Структурная схема СФ-блока OTP AntiFuse

Для проверки в кремнии и исследования характеристик СФ-блока был разработан тестовый кристалл с площадью 1650×1850 мкм^2. В целях более эффективного использования площади было решено разместить в ядре тестового кристалла восемь блоков OTP. Для уменьшения числа выводов и возможности общения с блоками памяти был реализован цифровой последовательный интерфейс обмена данных. Конфигурация и расположение контактных площадок тестового кристалла соответствуют 16-выводному корпусу под уже имеющуюся измерительную оснастку.

Литература

1. Красников Г. Я., Мещанов В. Д., Шелепин Н. А. Семейство микросхем ПЗУ информационной емкостью 4–64 Мбит для космических приложений // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2015. — № 2 (158). — С. 4–10.
2. Ermakov I. V., Losevskoy A. Y., Nuykin A. V., Shelepin N. A., Kravtsov A. S. Design and Study of a 65 Kb AntiFuse OTP ROM in a Standard 0.18 um CMOS Process // IEEE ElConRus, 2020. P. 112–115.
3. Ермаков И. В., Лосевской А. Ю., Нуйкин А. В. Электрически однократно программируемая энергонезависимая память на основе стандартной КМОП-технологии // Международный форум «Микроэлектроника-2019». Сборник докладов 5-й Международной научной конференции «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Наноиндустрия. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — С. 175–181.
4. Campardo G., Micheloni R., Novosel D. VLSI-Design of Non-Volatile Memories. Springer Berlin Heidelberg New York, 2010. 582 p.
5. Baker R. J. CMOS Circuit Design, Layout and Simulation // Sahibabad: Nisha Enterprises, 2013. 1044 p.

УДК 621.3

Разработка дизайна усилителя со сложенным каскодом по технологии КМОП 90 нм

Шумов А. Д., Певцов Е. Ф.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
shumov_sasha@bk.ru

В стиле полузаказного проектирования приведен пример проектирования топологии усилителя со сложенным каскодом с переключаемыми конденсаторами, изготавливаемыми по технологии КМОП 90 нм. Данный блок может быть использован для проектирования узлов более высокого уровня.
Ключевые слова: топология усилителя; системы автоматизированного проектирования СБИС; физический синтез; верификация проекта.

Введение

Каскодная топология, полученная путем размещения каскада с общим затвором в каскаде с общим истоком, сочетает в себе высокое входное сопротивление и большую проводимость схемы с общим истоком с качествами буферизации тока и лучшей частотной характеристикой схемы с общим затвором. Каскодная версия усилителя демонстрирует значительные улучшения параметров, а комбинация двух или более каскадов каскодных усилителей обеспечивает улучшенные характеристики [1]. Топология сложенного каскода с PMOS с общим затвором и NMOS с общим истоком представляет собой модифицированную концепцию каскода, обеспечивающую более высокий коэффициент усиления, высокое выходное сопротивление, лучший коэффициент входного синфазного сигнала (ICMR) и более высокий коэффициент подавления источника питания (PSRR).

Разработка узла усилителя

В рамках работы спроектированы схема усилителя с переключаемыми конденсаторами и источник опорного тока IREF.

Принципиальная схема усилителя со сложенным каскодом представлена на рис. 1. В ней транзисторы M17 и M46 представляют собой токовое зеркало, ток от IREF идет на транзистор M6, который работает в диодном включении. Дифференциальный каскад построен на транзисторах M29 и M31. В схеме также представлены переключаемые конденсаторы, которые используются для улучшения АЧХ усилителя.

Моделирование проводилось в утилите Analog Design Environment пакета Virtuoso (ADE) и симуляторе аналоговых схем Spectre. Для создания схемы тестовых воздействий в ADE используются файлы моделей аналоговых примитивов на языке spectre, а также сама моделируемая схема. Также спроектирован блок источника тока IREF, который подается на вход усилителя IBIAS.

Моделирование показало, что усилитель имеет следующие характеристики: полоса пропускания 275 КГц, усиление 59 дБ, частота среза 1,92 МГц, частота единичного усиления 200 МГц. Проведен анализ по технологическим «углам». Он показал, что микросхема сможет функционировать в диапазоне от –40 до +100 °С с медленными и быстрыми транзисторами с падением коэффициента усиления до 58 дБ.

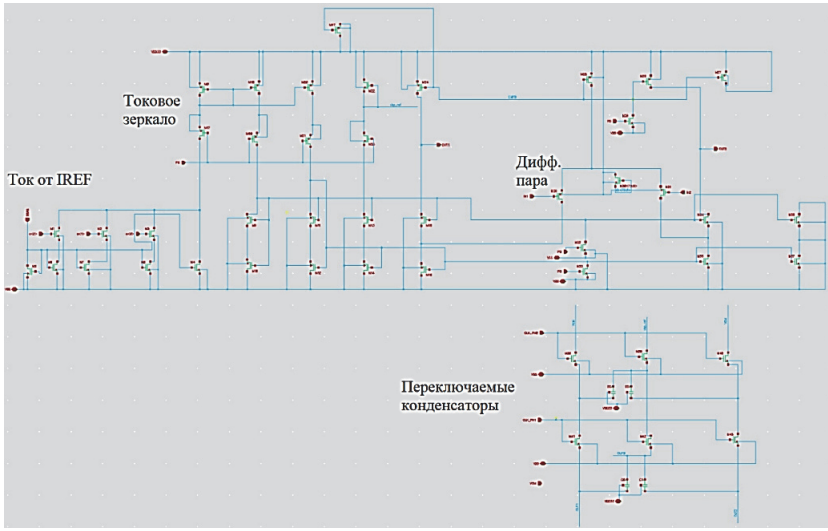


Рис. 1. Электрическая схема усилителя в базисе технологической библиотеки

Разработка топологического чертежа

В интегральной КМОП-технологии существует потенциальная опасность взаимного расположения элементов, приводящего к образованию паразитных тиристорных структур. Основным механизмом, который приводит к возможности включения тиристора, является инжекция неосновных носителей в карман или в подложку [2].

В данном проекте при разработке топологии выполнены следующие решения для предотвращения тиристорного эффекта:

- транзисторы *p*- и *n*-типа расположены зеркально друг относительно друга;
- вокруг и между структурами, которые в совокупности могут образовать паразитный тиристор, размещены охранные кольца;
- элементы, подверженные тиристорному эффекту, расположены на большом расстоянии друг от друга;

После размещения элементов схемы выполнена их трассировка. При соединении элементов использовались два слоя металлизации, которые обозначены голубым и фиолетовым цветом, и слой поликремния (красный цвет). Чтобы обеспечить соединение общих сигнальных шин при стыковке ячеек в строки и столбцы, металлизация шин проходит по всей длине узла (рис. 2).

На последнем шаге разработки топологии ячейки считывания проводятся физическая верификация и экстракция параметров проекта с использованием графического интерфейса САПР Mentor Graphics Calibre и Cadence Virtuoso. Проект выгружается в формат *.gds для последующего изготовления на фабрике — изготовителе.

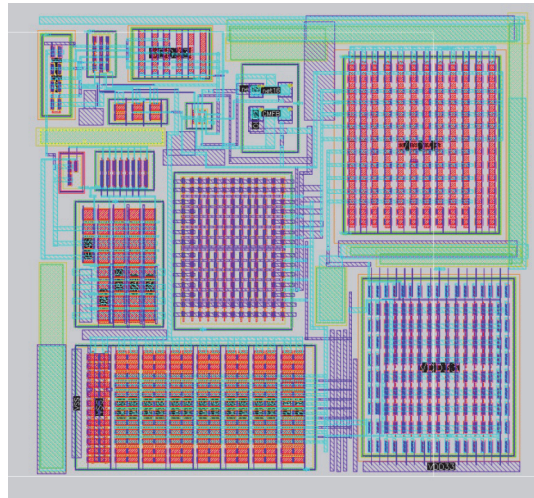


Рис. 2. Топологический чертеж усилителя со сложенным каскодом

Выводы

На основе реальной технологической библиотеки с топологическими нормами 90 нм спроектирован аналоговый блок усилителя с коэфициентом усиления 59 дБ и полосой пропускания 275 КГц, частотой среза 1,92 МГц, частотой единичного усиления 200 МГц. Проведен анализ по «углам», который показал, что микросхема может функционировать в тяжелых рабочих условиях с падением усиления не менее 58 дБ. При проектировании топологии особую роль играла защита микросхемы от включения паразитного тиристора и предотвращения эффекта защелкивания в микросхеме. Дальнейшим развитием проекта может стать разработка на более высоком уровне абстракции таких блоков, как компаратор, ЦАП, АЦП.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание для университетов №ФГФЗ-2023-0005. Рег. № 123052400076-8).

Литература

1. Baker R.J. CMOS: проектирование схем, компоновка и моделирование. John Wiley & Sons, 2019.
2. Эннс В.И., Кобзев Ю.М. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем: Краткий справочник разработчика. — Горячая линия — Телеком, 2005.

УДК 621.382.3

Разработка системы быстрых тестов для проверки качества и функциональности файлов и инструментов PDK

Насибуллин К. М., Загидуллина О. Р., Надин А. С.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
knasibullin@niime.ru

По мере разработки PDK возникает необходимость в сравнении исправлений и обновлений, внесенных после выпуска новой версии PDK. Для этих целей используются скрипты, программы, написанные с использованием языков программирования Tcl, Skill, Python, Shell и Perl операционной системы Linux. Одним из вариантов дальнейшего улучшения верификации является создание системы быстрых тестов, которые позволят сформировать обратную связь разработчикам после сборки или компиляции комплекта средств проектирования.
Ключевые слова: СБИС; PDK; верификация; тестирование; технологические библиотеки; маршрут верификации.

Комплект средств проектирования (PDK) — это набор файлов и моделей полупроводниковых приборов для определенной фабрики и технологического процесса, используемый при разработке СБИС.

Разработка PDK делится на два этапа — новая технология и новая версия PDK, при новой технологии параллельно с основной разработкой ведется QA разработкой для проверки командного файла, далее тестирование и отправка заказчикам, а при релизе новой версии PDK сначала — разработка, после — общее тестирование (ручное и автоматизированное) и отправка заказчикам.

Этап тестирования в среднем занимает от двух недель до месяца в зависимости от сложности технологии, и, если на этапе тестирования найдена ошибка, PDK передается заново в разработку и после исправления ошибки тестирование начинается сначала, таким образом, этап тестирования может увеличиться в несколько раз. Поэтому было решено внедрить в разработку систему быстрых тестов (рис. 1).

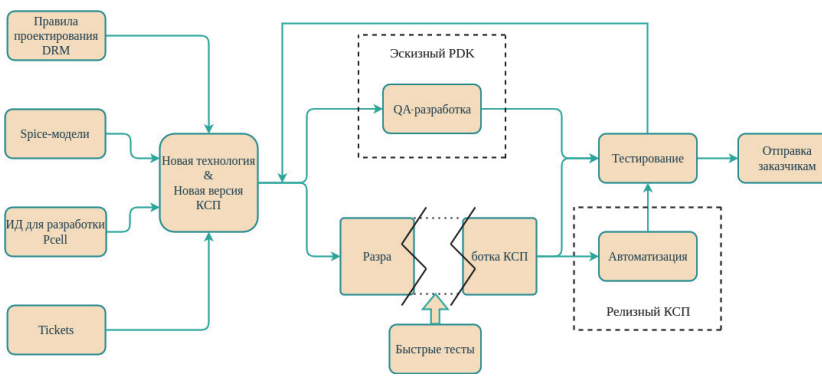


Рис. 1. Процесс разработки PDK с быстрыми тестами

Система быстрых тестов — это узконаправленные тесты, созданные для валидации корректности файлов, а также различных инструментов PDK после сборки или компиляции. Это автоматизированный код, который вызывает исполнение тестируемого модуля и проверяет один из результатов его работы.

Данный скрипт должен быть надежный, читаемый, поддерживаемый. Вместе с тем, что очень важно, этот код не должен иметь внешних зависимостей и обладать полным контролем над объектом тестирования. Именно это отличает быстрые тесты от интеграционных.

Если рассмотреть свойства системы быстрых тестов, то можно прийти к следующему набору качеств, которые такой тест должен иметь.

Исполняется автоматически и часто. Для этого тесты должны быть интегрированы в процесс. Библиотеки часто изменяются, и необходимо контролировать их качество с этой же частотой. Тесты должны исполняться в момент сборки. Лучше расширить список поводов для запуска тестов и включить в него ежедневные (ночные) запуски, запуск после сборки, запуск перед выгрузкой библиотеки в репозиторий.

Легкий во внедрении. Новые тесты должны легко внедряться в общий набор быстрых тестов.

Актуален (релевантен) в любое время. Это значит, что тест не теряет актуальность до тех пор, пока объект тестирования актуален (не подвергся изменениям или не удален).

Легко исполняемый. Каждый сотрудник отдела должен иметь возможность запустить тест. Это позволит любому быть уверенным, что после внесения изменений библиотека не повреждена.

Быстрый. Тесты должны исполняться за секунды. Это является гарантией того, что они будут исполняться часто.

Стабильный. Всегда должен быть один и тот же результат при каждом исполнении теста. Это одно из главных условий стабильности тестов.

Прост в анализе. Для облегчения анализа причин неуспешной проверки как минимум тест должен иметь понятную архитектуру и сообщать, какой результат актуальный, а какой ожидаемый.

Быстрое тестирование предлагает ряд преимуществ, которые улучшают эффективность разработки и обеспечивают надежность системы:

- удобство проведения тестов;
- раннее выявление ошибок;
- улучшение общего качества продукта;
- сокращение затрат времени и ресурсов;
- снижение рисков при интеграции компонентов.

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., Шелепин Н. А. Состояние и перспективы развития технологий и элементной базы СБИС с энергонезависимой памятью // Проектирование систем на кристалле: тенденции развития и проблемы: Тезисы докладов, Москва—Зеленоград, 19–21 октября 2010 года. Москва–Зеленоград: МИЭТ, 2010. — С. 55.

3. 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.
4. 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.
5. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.

УДК 621.3.049

Снижение влияния паразитных элементов в высокочастотных ЦАП большой разрядности

Колосков Д. Б., Глухов А. В., к. т. н.
АО «НЗПП Восток»
630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60
dimakoloskov2009@gmail.com

В работе описан процесс улучшения характеристик 14-битного сверхвысокочастотного ЦАП путем снижения негативного эффекта от паразитных топологических элементов. Результаты представлены в виде временной диаграммы выходных токов ЦАП.

Ключевые слова: ИС; ЦАП; статические характеристики; динамические характеристики; топология; паразитные элементы.

Современная сфера электронной техники остро нуждается в сверхвысокочастотных ЦАП и АЦП большой разрядности, при этом разработка таких устройств постоянно усложняется с ростом частоты и разрядности.

На предприятии АО «НЗПП Восток» в настоящее время разрабатывается сегментированный 14-разрядный ЦАП с частотой преобразования 1 ГГц. Технология проектирования — КМОП 180 нм. Проблемой является существенное негативное влияние паразитных топологических элементов (сопротивлений и емкостей) на статические и динамические характеристики ЦАП, как было показано в наших предыдущих работах [1, 2]. В целях снижения этого влияния были проведены итерационные работы по экстракции значений паразитных элементов из разработанной топологии устройства и последующей коррекции топологии. Корректировки включали в себя максимально возможное уменьшение геометрических факторов возникновения паразитных емкостей, например площади перекрытия металлических шин (метод минимизации), а также компенсацию паразитных сопротивлений добавочными сопротивлениями в симметричных ветвях схемы (метод компенсации).

Результаты работы проверялись при помощи компьютерного моделирования по SPICE-моделям 3-го уровня. При помощи программных средств был проведен динамический анализ переключения младшего разряда разрабатываемого ЦАП в трех случаях:

1) без учета топологических паразитных элементов;
2) с учетом топологических паразитных элементов для базового варианта топологии;
3) с учетом топологических паразитных элементов для скорректированного варианта топологии.

Результаты расчетов показаны на рис. 1 в виде временной диаграммы токов и напряжений. Из диаграммы видно, что кривая выходного тока ЦАП скорректированной версии опережает кривую базовой версии приблизительно на 25 пс (на уровне 75 % от установившегося значения), что соответствует 22 % от времени установления сигнала базовой версии. Кроме того, в отличие от выходного тока базовой версии ЦАП, значение установившегося тока скорректированной версии практически полностью совпадает с запланированным значением выходного тока

(т. е. без учета паразитных элементов). Можно сделать вывод о том, что выполнение коррекции топологии методами минимизации и компенсации позволило значительно сократить негативное влияние паразитных топологических сопротивлений и емкостей на характеристики ЦАП.

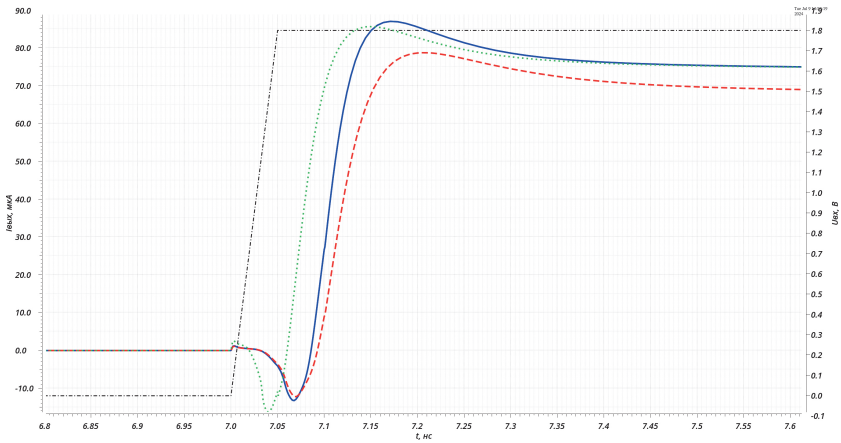


Рис. 1. Временна́я диаграмма токов и напряжений при переключении сигнала ЦАП. Черной линией показан входной сигнал, красной штриховой — выходной ток базовой версии ЦАП с учетом паразитных элементов, синей сплошной — выходной ток скорректированной версии ЦАП с учетом паразитных элементов, зеленой пунктирной — выходной ток ЦАП без учета паразитных элементов

Литература

1. Koloskov D., Dragunov V., Gluhov A. Application of Compensation Method for Layout Parasitic Elements Control in Precision DACs // 2023 IEEE 24th International Conference Of Young Professionals In Electron Devices And Materials (EDM), 2023. P. 420–423.
2. Колосков Д. Б., Драгунов В. П. Влияние топологических паразитных элементов на динамические характеристики сверхвысокочастотного 14-разрядного ЦАП // Наука. Технологии. Инновации. XVII Всероссийская научная конференция молодых ученых, Новосибирск. 2023. — С. 52–56.
3. Микушин А. В., Сажнев А. М., Сединин В. И. Цифровые устройства и микропроцессоры. — СПб: БХВ-Петербург, 2010. — 832 с.

УДК 004.318

Организация предсказателя адресов переходов для инструкций с косвенной адресацией в составе RISC-микропроцессора

Золотой Л. К.
АО «МЦСТ»
117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108
zolotoi.lk@phystech.edu

Разработан модуль предсказателя адресов переходов для инструкций с косвенной адресацией в составе прототипа микропроцессора МЦСТ-R2000+. Приведено краткое описание реализованных алгоритмов. Указаны пути возможного улучшения представленных алгоритмов, направленные на повышение точности предсказания.
Ключевые слова: косвенная адресация; предсказание адресов переходов для инструкций с косвенной адресацией.

В современных программах гораздо чаще стали встречаться инструкции с косвенной адресацией, что еще больше повышает значение точного предсказания их результатов (адреса перехода) для производительности микропроцессора. В отличие от переходов с прямой адресацией, где адрес перехода известен статически и существенно только условие перехода, для команд с косвенной адресацией необходимо обращение к регистрам для определения точного адреса перехода, который меняется в соответствии со значением регистра, поэтому требуется существенно другая организация модуля.

В работе рассматриваются следующие варианты организации устройства предсказателя адресов переходов для инструкций с косвенной адресацией, поддерживающие выполнение инструкций не по порядку (out of order): адреса переходов предсказываются в порядке дешифрации, результат предсказания может определяться не по порядку:

- буфер адресов переходов (Branch Target Buffer);
- двухуровневый предсказатель с глобальной историей переходов (two-level adaptive predictor with globally shared history buffer);
- гибридный предсказатель;
- предсказатель переходов с геометрической последовательностью длин историй переходов (Geometric history length BP).

Основу модуля предсказателя адресов переходов составляют три функциональных блока: блок памяти, блок генерации ключа доступа к памяти, блок обновления предсказаний. Память хранит адреса переходов и информацию, необходимую для формирования предсказания. Блок генерации отвечает за доступ к памяти за предсказанием и использование истории переходов. Блок обновления предсказаний обновляет адреса переходов и сопутствующую им информацию в блоке памяти, основываясь на данных, полученных из конвейера процессора.

При разработке модуля предсказателя переходов для инструкций с косвенной адресацией в составе прототипа микропроцессора МЦСТ-R2000+ были реализованы модели предсказателя — буфера адресов переходов и предсказателя с глобальной историей переходов, а также проведено сравнение эффективности их работы по результатам прохождения пакета тестов SPEC 2000. Предсказатель на основе

буфера адресов переходов показал среднее значение точности предсказаний 75%, предсказатель с глобальной историей переходов — 89%. Как итог, внедрение модуля предсказателя с глобальной историей в прототип привело к повышению его производительности при исполнении пакета тестов в среднем на 2%, на отдельных тестах — до 8%.

Литература

1. Hennessy J. L. and Patterson D. A. Computer Architecture: A Quantitative Approach. Morgan Kaufmann Publishers, 5th edition, 2011.
2. Karel Driesen and Urs Holzle. Accurate Indirect Branch Prediction // Proceedings of the 25th Annual International Symposium on Computer Architecture, 1998.
3. Karel Driesen and Urs Holzle // The Cascaded Predictor: Economical and Adaptive Branch Target Prediction // Proceedings of the 31st Annual International Symposium on Microarchitecture, 1998.
4. Seznec A. Analysis of the o-gehl branch predictor // Proceedings of the 32nd Annual International Symposium on Computer Architecture, 2005.

УДК 004.318

Эффективный по занимаемой площади метод реализации аппаратной поддержки криптографической защиты информации

Зубрицкий И. В.[1,2], **Альфонсо Д. М.**[1,2]
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] *АО «МЦСТ»*
117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108

В данной работе рассматривается метод по уменьшению площади, занимаемой модулями аппаратной поддержки криптографической защиты информации в микропроцессорах. Рассматриваются алгоритмы NIST FIPS 197 (AES) и ГОСТ 34.12 для 128-битных блоков («Кузнечик»).
Ключевые слова: криптографический алгоритм; аппаратная поддержка; AES; Кузнечик; поле Галуа; табличная замена.

Современные криптографические алгоритмы задействуют все более сложный математический аппарат, вследствие чего замедляется скорость обработки и передачи информации. В 2008 г. крупнейшая компания — разработчик микропроцессоров Intel добавила в свои продукты аппаратную поддержку стандарта шифрования NIST FIPS 197 (более известного как AES — Advanced Encryption Standard). Сравнение результатов производительности микропроцессоров на задачах шифрования и хеширования (табл. 1) [1] показывает, что для обеспечения необходимой скорости обработки информации микропроцессорам общего назначения требуется наличие в них аппаратной поддержки криптографических преобразований.

Таблица 1. Сравнение производительности процессора «Эльбрус-8СВ» с процессорами с аппаратной поддержкой криптографических преобразований [1]

Алгоритм	Время криптографического преобразования блока (тактов)		
	Без аппаратной поддержки («Эльбрус-8СВ»)	С аппаратной поддержкой (Intel)	
		+Iset. Ext. AES NI	+Iset. Ext. VAES NI CTR
«Кузнечик»	256	-	-
«Магма»	234	-	-
«Стрибог»	1124	-	-
AES	177	37	2,56

Для улучшения производительности микропроцессоров «Эльбрус» на задачах криптографии была реализована поддержка алгоритмов:

1) шифрование и расшифрование по стандарту NIST FIPS 197 (AES);

2) шифрование по стандарту ГОСТ 34.12 («Кузнечик»).

В результате работы поддержка стандарта шифрования AES была реализована в виде типового раунда шифрования/расшифрования (рис. 1). При реализации

стандарта NIST FIPS 197 основной задачей стала оптимизация по площади функций SubWord/InvSubWord и MixColumns/InvMixColumns. SubWord представляет собой табличную замену байтов [2], но ее непосредственная реализация в виде таблицы значений является излишне затратной по аппаратным ресурсам. В стандарте описан математический алгоритм формирования таблицы замены, в ходе которого используется операция нахождения обратного элемента в поле Галуа. Использование декомпозиции данной функции позволяет снизить аппаратные затраты при реализации функций SubWord/InvSubWord. Для оптимизации функций MixColumns/InvMixColumns требуется эффективная реализация умножения элементов в поле Галуа GF(2^8). Потенциал для оптимизации заключается в том, что для реализации алгоритма шифрования необходимо вычислять произведение не произвольных байтов, а произведение байтов шифруемого блока непосредственно на константы, зафиксированные в стандарте NIST FIPS 197 [3]. В таком случае при умножении элементам поля GF(2^m) можно сопоставить матрицы размера m×m с элементами поля GF(2). Таким образом, осуществляется замена непосредственного произведения в поле Галуа на связку из набора побитовых операций AND и XOR.

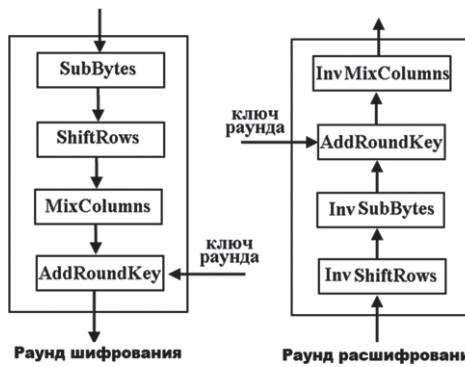


Рис. 1. Типовой раунд шифрования/расшифрования алгоритма AES

Поддержка стандарта ГОСТ 34.12 128 бит была реализована в виде операций, составляющих раунд шифрования. При аппаратной реализации стандарта ГОСТ 34.12 можно выделить две функции, которые требуют оптимизации: линейное преобразование и табличная замена в шифре «Кузнечик». Линейное преобразование состоит из 16 повторений определенной функции, которая сдвигает блок вправо на 1 байт, при этом в старший байт помещается результат определенной линейной функции от всех байтов блока, вычисленный в поле GF(2^8) [4]. Каждое такое преобразование можно представить в виде умножения на матрицу размером 16×16 с элементами поля GF(2^8). Аналогично оптимизации функций MixColumns/InvMixColumns алгоритма AES можно заменить элементы поля GF(2^8) на матрицы 8×8 с элементами GF(2), получив таким образом матрицу 128×128, состоящую из элементов поля GF(2). Тогда линейное преобразование алгоритма «Кузнечик» тоже заменяется набором битовых операций AND

и XOR. Оптимизация табличной замены алгоритма «Кузнечик» возможна благодаря исследованиям схемы возможного построения таблицы замены: основываясь на них, можно оптимизировать эту функцию аналогично оптимизации SubWord/InvSubWord алгоритма AES [5].

Литература

1. Советов П. Н. Перспективы аппаратного ускорения криптографии в процессорах архитектуры «Эльбрус» // XXIII научно-практическая конференция «РусКрипто-2021».
2. Federal Information Processing Standarts Publication 197 ADVANCED ENCRYPTION STANDART (AES) (2001).
3. Курганов Е. А. О глубине аппаратной реализации блочного шифра Кузнечик // Интеллектуальные системы // Теория и приложения, 2016. — 20:1. — С. 61–78.
4. ГОСТ 34.12-2018. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры. Государственный стандарт РФ.
5. Biryukov A., Perrin L., Udovenko A. The Secret Structure of the S-Box of Streebog, Kuznechik and Stribob. IACR Cryptol. ePrint Arch., 2015, 812.

УДК 621.3.049

Инструмент ускоренного высокоуровневого синтеза СФ-блоков обработки сигналов

Зарипов Р. А.[1], Зиновчик О. Ю. [1], к. ф. н., Чесноков В. Н.[1]
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1а, корп. 1

Разработан инструмент ускоренного высокоуровневого синтеза СФ-блоков для задач обработки потоковых сигналов. Инструмент генерирует Verilog-код СФ-блока из высокоуровневого описания на языке программирования Python. С помощью инструмента успешно синтезированы и проверены СФ-блоки с реализацией некоторых алгоритмов обработки изображений.
Ключевые слова: ускоренный синтез; генерация Verilog; Python.

Скорость эффективной реализации компактных СФ-блоков с низким энергопотреблением является ключом к высокой конкурентоспособности будущих устройств. Разработанный инструмент обеспечивает кратное ускорение процесса создания СФ-блоков для задач потоковой обработки сигналов. Ускорение достигается за счет автоматизации процесса дизайна СФ-блоков и их верификации. А именно: инструмент генерирует СФ-блок по описанию на языке программирования Python. Сгенерированный СФ-блок представлен в виде программы на языке описания аппаратуры Verilog. Таким образом, разработчик СФ-блока может сконцентрироваться на описании алгоритма на простом языке программирования Python, а не на деталях реализации на языке описания аппаратуры Verilog. Например, алгоритм повышения глобальной контрастности, описанный на рис. 1, синтезируется в несколько тысяч строчек кода на языке Verilog.

Отличительная особенность инструмента по сравнению с существующими инструментами HLS (High Level Synthesis) — сужение спектра решаемых задач, что позволяет качественнее и быстрее генерировать Verilog-код. Также инструмент создает бит-точную модель СФ-блока и оптимизирует промежуточные ширины данных.

Разработанный инструмент позволяет создавать СФ-блоки преимущественно для алгоритмов потоковой обработки данных. В этот класс задач входит обработка изображений, аудио, видео и радиосигналов. Специализация на потоковой обработке позволяет повысить качество генерируемых СФ-блоков.

Для верификации СФ-блоков обычно используется логический синтез или потактовая симуляция. Логический синтез сложных СФ-блоков и их потактовая симуляция может занимать часы. Разработанный инструмент генерирует бит-точную модель СФ-блока на языке программирования C++, что позволяет проверить сгенерированный блок за несколько секунд.

Разработанный инструмент уменьшает ширины данных промежуточных вычислений на основе анализа диапазонов значений и требуемой прецезионности индивидуально для каждой переменной. Разрядность широко распространенных чисел с фиксированной и плавающей точками может быть избыточной для конкретного алгоритма потоковой обработки. Например, для обработки HDR10 изображений достаточно использовать float разрядности 12 вместо типовой 32 [2].

```python
def p_(x, n=0):
    # ненормированный полином Лежандра на [0, 1]
    if n == 0:
        return 1
    if n == 1:
        return x * 2 - 1
    return ((2*n-1) *p_(x, n=1) *p_(x, n=n-1) - (n-1) *p_(x, n=n-2)) / n

def p(n, x, n=0):
    # нормированный полином Лежандра на [0, 1]
    return p_(x, n=3) *(2 *n + 1)**0.5

def q(x, n=0):
    # интеграл нормированного полинома Лежандра на [0, 1]
    if n == 0:
        return x
    return ( p_(n+1, x) - p_(n-1, x) ) / (2.5 + n)

def pqs(x, N=0):
    # набор из P() и Q() функций на [0, 1]
    return (
        [p(x, n=n) for n in range(N+1)],
        [q(x, n=n) for n in range(N+1)]
    )

def gtm(i: Flexfloat, N=3) -> Flexfloat:
    # глобальный полиномиальный тонмаппер
    ps, qs = pqs(i, N=N)
    cs = mean(ps)
    return sum_vector(cs * qs)
```

Рис. 1. Алгоритм повышения глобальной контрастности на языке программирования Python

С помощью инструмента успешно синтезированы следующие СФ-блоки: алгоритм повышения локальной контрастности изображения [3], алгоритм быстрого преобразования Фурье, алгоритм «дебаеризации».

Литература

1. Зиновчик О. Ю., Чесноков В. Н. Система сверхбыстрого проектирования IP ядер обработки видеоизображений для ПЛИС // Труды 65-й Всероссийской научной конференции МФТИ в честь 115-летия Л. Д. Ландау, 3–8 апреля 2023 г. Радиотехника и компьютерные технологии. — М: Физматкнига, 2023. — С. 11–12.
2. Zinovchik O. Y., Chesnokov V. N., Zaripov R. A. Highly Efficient HDR Signal Processing for ASICs Using the Flexfloat Data Type // 2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), 2024. P. 1–4.
3. Chesnokov V. Патент № 7302110, USA. PCT/GBO2/O1675. Image enhancement methods and apparatus. 11.2007.

УДК 621.319.55

Разработка прецизионного генератора опорной частоты 96 МГц

Гусихин И. В., Кудяков А. А.
АО НПЦ «ЭЛВИС»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14

В статье приведен отчет о разработке полностью интегрального генератора опорной частоты 96 МГц на основе RC-осциллятора. Технологическая норма — 28 нм. Рассмотрены методики калибровки частоты и методики компенсации температурной зависимости. Разработан осциллятор с потребляемой мощностью не более 240 мкВт и вариацией выходной частоты по отношению к внешним факторам не более 3%.
Ключевые слова: релаксационный RC-осциллятор; RC-осциллятор; генератор опорной частоты; на основе компаратора; калибровка частоты; температурная зависимость частоты; калибровка зависимости от вариации процесса; компенсация температурной зависимости.

На сегодняшний день полностью интегральные генераторы опорной частоты играют важную роль в создании энергоэффективных микросхем, таких как широкополосные оптические модули, АЦП, ЦАП и др. Генераторы опорной частоты обладают следующими преимуществами:

- отсутствие внешних компонентов;
- высокая максимально достижимая частота осцилляций;
- возможность калибровки выходной частоты;
- низкая потребляемая мощность;
- малая занимаемая площадь на кристалле.

Существуют факторы, влияющие на основные характеристики интегрального осциллятора, такие как статистическое рассогласование компонентов, разброс параметров технологического процесса и температуры. В рамках работ по созданию прецизионного RC-осциллятора:

- разработан низкопотребляющий широкополосный компаратор на основе симметричного ОИТУН;
- спроектирован ЦАП с токовым выходом для калибровки зависимости частоты от вариации параметров процесса и статистического рассогласования компонентов;
- проведена грубая компенсация зависимости опорной частоты от разброса температур;
- настроена точная калибровка температурной зависимости частоты.

Данные работы выполнялись специалистами компании АО НПЦ «ЭЛВИС». В результате был спроектирован полностью интегральный прецизионный генератор опорной частоты на основе RC-осциллятора в составе микросхемы широкополосного оптического приемо-передатчика.

Литература

1. Razavi B. Design of Analog CMOS Integrated Circuits. Tata McGraw-Hill, Third edition, 2001.

2. Gudlavalleti Rajahari, Yashu Anand Varshne. and Subash Chandra Bose. A Novel Design Methodology for High Tuning Linearity and Wide Tuning Range Ring Voltage Controlled Oscillator. Springer-Berlin Heidelberg, 2013. CCIS 382. P. 10–18.
3. Jianguo Tan and Fang Tang. Temperature and process independent ring-oscillator using compact compensation technic // International ConferenceonAnti Couterfeiting Security and Identificationin Communication (ASID), 2010. P. 49–52.
4. Panya S. and Thanachayanont A. DesignandRealization of a Process and TemperatureCompensated CMOS Ring Oscillator // International Conference on Electrical Engineer, 2012. P. 1–4.
5. Sundaresan K., Allen P. E., Ayazi F. Process andtemperature compensation In a 7 MHz CMOSclockoscillator // IEEE J. Solid State Circuits, 2006. P. 433–442.
6. Basics of Operational Amplifiers and Comparators. Application Note 2021-03-261© 2020–2021 Toshiba Electronic Devices & Storage.

УДК 621.37

Прототипная специализированная интегральная микросхема для съема и обработки сигналов с микрополосковых сенсоров

Ямалиев С. И., Аткин Э. В., к. т. н., Норманов Д. Д., Бочаров Ю. И., к. т. н., Бутузов В. А., к. т. н., Юровский В. О., Лобанков Д. С.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
SIYamaliev@mephi.ru

Разработана прототипная специализированная интегральная микросхема для трековой системы международного эксперимента BM@N. Приведены результаты разработки аналогового тракта и цифровой части микросхемы, результаты электрического моделирования в сравнении с измеренными при лабораторных испытаниях. Приведено описание методики испытаний, лабораторного стенда для подобного рода микросхем
Ключевые слова: СИМС; считывающая электроника; микрополосковые детекторы; КМОП-технология; кремниевая трековая система; BM@N.

Современное поколение экспериментов на ускорительных комплексах требует увеличения числа каналов считывающей электроники и в целом повышения степени интеграции, в первую очередь из-за значительно возросшей гранулярности детекторов. Это сопровождается ужесточением требований по многим аспектам, в том числе к функциональной сложности электроники, что может быть в полной мере реализовано только с использованием специализированных интегральных микросхем (СИМС). Так, отсутствие электронно-компонентной базы сдерживает развитие экспериментальной ядерной физики.

Микросхема предназначена для использования с кремниевыми микрополосковыми детекторами установки BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) [1] на строящемся коллайдере NICA, г. Дубна. Непосредственное считывание сигналов должно происходить с микрополосковой кремниевой трековой системы (трекера) (англ. Silicon Tracking System — STS) [2] установки BM@N.

В состав СИМС (рис. 1) входят четыре основные части: аналоговая, аналого-цифровая, цифровая и часть, содержащая дополнительные и вспомогательные модули. Аналоговая часть состоит из зарядочувствительного усилителя [3], усилителя формирователя, блока контроля полярности, компаратора и пикового детектора. Аналого-цифровая часть состоит из аналогового мультиплексора и АЦП. Аналоговый мультиплексор передает через себя дифференциальный сигнал с выбранного канала на АЦП. Один 10-битный АЦП, работающий на все каналы, оцифровывает поступивший сигнал и передает данные на цифровую логику. Цифровая часть содержит блоки, SPI, логику переключения каналов, формирователь пакета и интерфейсную логику.

Прототипная микросхема имеет следующие характеристики:

- 10 аналоговых каналов считывания;
- динамический диапазон сигналов от 3,6 до 108 фКл;
- эквивалентный шумовой заряд 1300 е;
- разрешение АЦП 10 бит;
- частота дискретизации АЦП 20 МГц;

- скорость выгрузки данных 40 МГц;
- потребляемая мощность канала 4,5 мВт;
- размеры микросхемы 5×5 мм.

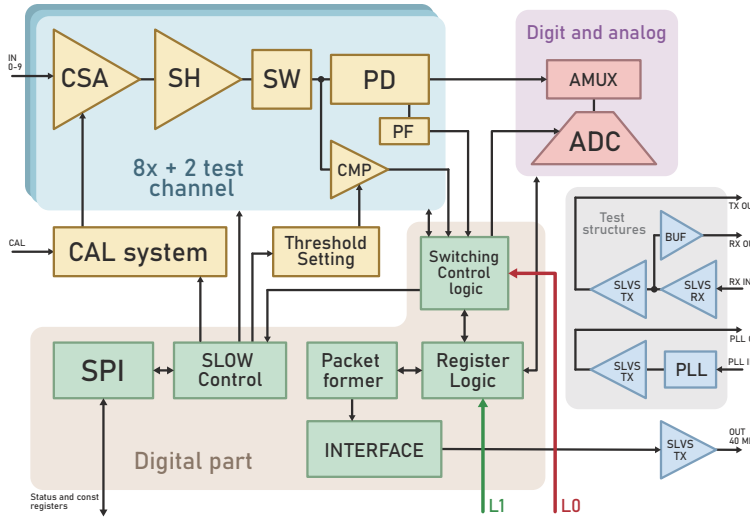


Рис. 1. Структурная схема СИМС

Данная работа выполнялась специалистами лаборатории проектирования специализированных интегральных микросхем НИЯУ МИФИ. В результате была спроектирована прототипная СИМС. Микросхемы являются полностью заказными и произведены по технологии КМОП 180 нм. Проведены лабораторные испытания и сформулированы рекомендации по улучшению полномасштабной 128-канальной микросхемы. Актуальность создания СИМС подчеркивается отсутствием выпускаемых интегральных микросхем данного класса.

Литература

1. Mikhail Kapishin for the BM@N Collaboration. Studies of baryonic mat-ter at the BM@N experiment (JINR) // Joint Institute for Nuclear Research, 2019. DOI:10.1016/j.nuclphysa.2018.07.014.
2. Sheremeteva A., Kolozhvaria A., Dementeva D., Shitenkova M., Murina Yu. Quality Assurance Test System for Assembly of STS Modules for the BM@N Experiment // Joint Institute for Nuclear Research, 2022. DOI: 10.1134/S1547477123040593.
3. Аткин Э. В., Шумихин В. В. Зарядочувствительный усилитель с псевдодифференциальным выходом // Микроэлектроника, 2021. — Т. 50. — № 3. — С. 236–240. DOI: 10.31857/S0544126921020034.

УДК 621.3

Исследование ограничений минимизации площади топологии цифроаналогового преобразователя

Цепилова А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
tsna2001@gmail.com

Проведено исследование ограничений, возникающих при минимизации площади топологии цифроаналогового преобразователя. Рассмотрены различные методы оптимизации площади ЦАП и предложены варианты взаимного расположения элементов схемы и межсоединений при топологическом проектировании ЦАП.
Ключевые слова: цифроаналоговый преобразователь; топология ИМС; минимизация площади; ограничения.

Такие периферийные элементы, как генераторы, ФАПЧ, АЦП, ЦАП и др., в интегральных микросхемах играют важную роль при обеспечении функциональности и производительности микросхем, а также позволяют улучшить взаимодействие микросхем с внешними устройствами. Проектирование топологии интегральных микросхем включает в себя соблюдение ряда правил и ограничений, от соблюдения которых зависят вносимые влияния на характеристики схемы. В случае проектирования ЦАП основными характеристиками являются статические и динамические характеристики, разрешающая способность, потребляемая мощность и занимаемая площадь на кристалле.

В данной работе предложен подход к исследованию ограничений минимизации площади топологии ЦАП, заключающийся в использовании модели, учитывающей вносимые паразитные эффекты, связанные с будущим взаимным расположением топологических слоев. Модель позволяет оценить изменение характеристик ЦАП после топологического проектирования и провести коррекцию схемотехнических решений. В рамках подхода определены влияния взаимных размещений элементов, токопроводящих шин, топологических структур, изолирующих колец и т. д. Проведенное исследование показало, что предложенный подход позволяет разработать топологию ЦАП без потери качества преобразования сигнала по сравнению со схемотехническим моделированием.

Одним из основных факторов появления вносимых влияний на характеристики схемы при топологическом проектировании является рассогласование элементов, определяющее случайный разброс параметров у идентично спроектированных приборов внутри одной интегральной схемы. Во избежание нарушения согласования электрических параметров аналоговых элементов в первую очередь следует обеспечить идентичное смещение по постоянному току в согласованной паре МДП-транзисторов во всех рабочих режимах. Согласование элементов может быть по току (например по току стока в токовом зеркале) или по напряжению.

Также немаловажны фиктивные (dummy) поликремниевые полоски либо фиктивные элементы, которые используются, чтобы минимизировать эффект подтрава поликремния на внешних сторонах после формирования изображения. Если фиктивных элементов не будет, то поликремний может быть вытравлен

больше на внешних границах затворов крайних секций, что может внести рассогласование между параллельными секциями одного транзистора или между несколькими транзисторами.

На примере топологии простейшего токового зеркала можно численно оценить вносимые изменения в характеристики схемы. Так, в случае несоблюдения основных правил топологического проектирования рассогласование «зеркальных» токов может доходить до 9 % относительно схемотехнического моделирования, при этом рассогласование двух токов стоков между собой может составлять более 3 %. В разрабатываемом ЦАП такое рассогласование одного только токового зеркала может снизить количество эффективных битов на 0,5 бита. Тогда как при проектировании с соблюдением основных правил разница токов двух стоков транзисторов составляет менее 0,001 %, а отличие от схемотехнического моделирования — всего 0,44 %. При этом разница в площади двух крайних вариантов может составлять около 20 %.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке ИМС для создания компактных и эффективных ЦАП, что может привести к снижению затрат на разработку топологии, последующее производство и улучшение конкурентоспособности продукции.

Исследование ограничений минимизации площади топологии ЦАП представляет собой важный шаг в развитии электроники и оптимизации производства устройств. Рассмотренный подход отличается высокой степенью детализации и учетом различных аспектов, что делает его ценным вкладом в область проектирования цифроаналоговых преобразователей. Кроме того, используемый подход можно использовать для создания экспертных систем САПР в помощь разработчику схемотехники ИМС.

УДК 004.312

Разработка методики раскрытия содержимого ОЗУ микроконтроллера с использованием анализа энергопотребления

Алексеев В. Д.[1,2], Тишин А. С.[1], Михайлов В. Ю.[1,3]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
valekseev@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

Исследованы источники утечек информации по боковым каналам энергопотребления в современных КМОП-схемах. Разработана методика и тестовое окружение для локализации всплесков энергопотребления микроконтроллера в целях раскрытия содержимого ОЗУ с использованием анализа потребляемой мощности чипа.

Ключевые слова: микроконтроллер; ОЗУ; атаки по сторонним каналам; анализ энергопотребления.

На сегодняшний день микроконтроллеры нашли применение практически во всех сферах человеческой деятельности. В частности, данные устройства используются для хранения и обработки конфиденциальных данных пользователя, что создает потенциальную угрозу утечки информации [1]. Архитектура микроконтроллеров содержит оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), в котором хранятся промежуточные данные, обрабатываемые процессором в ходе исполнения программного кода. Несанкционированный доступ к таким данным позволяет получить информацию о содержимом криптографических блоков устройства или нарушить работу программы.

Раскрытие данных, обрабатываемых микроэлектронными устройствами, может быть осуществлено с использованием исключительно программных методов, например подбором ключа алгоритма шифрования с применением известного шифротекста. Однако они не могут быть применены в случае отсутствия непосредственного доступа к данным: например, ОЗУ микроконтроллера взаимодействует исключительно с процессором и пользователь не имеет возможности получить информацию о его содержимом без изменения программного кода. В таком случае необходимо использовать информацию об аппаратных особенностях реализации исследуемого блока, т. е. осуществляя атаку по сторонним каналам [2].

Одним из наиболее эффективных способов раскрытия внутренних данных чипа выступают атаки по сторонним каналам энергопотребления, в ходе которых анализируется переключательная активность элементов электрической схемы. Поскольку все современные цифровые схемы построены на базе КМОП логических элементов, ключевой особенностью которых является значительный рост энергопотребления в динамическом режиме в сравнении со статическим, основной

задачей подобных атак выступает установление корреляции между зафиксированным всплеском энергопотребления устройства и количеством логических элементов, изменивших состояние на выходе в процессе переключения [3]. Далее информация о количестве переключившихся логических элементов может быть интерпретирована в виде числа разрядов исследуемого битового вектора, принявших значение логического «0» или «1», таким образом, значительно сокращается область перебора потенциальных значений [4].

На основании рассмотренного теоретического материала был разработан тестовый стенд и методика осуществления атаки на содержимое ОЗУ микроконтроллера с использованием анализа энергопотребления. Тестовый стенд включает в себя атакуемое устройство, т.е. микроконтроллер с некоторым объемом ОЗУ, обменивающийся данными с ЭВМ посредством интерфейса UART для реализации возможности изменения содержимого записываемых в память данных. К шине земли исследуемого устройства последовательно подключается резистор небольшого сопротивления, по величине падения напряжения на котором можно оценить величину тока, протекающего в цепи. Падение напряжения фиксируется при помощи осциллографа, взаимодействующего с ЭВМ для сохранения кривой энергопотребления на каждой итерации эксперимента. Методика проведения эксперимента включает в себя разработанный программный код для обмена данными с микроконтроллером и записи передаваемых значений в его ОЗУ. Таким образом, реализуется возможность получения кривых энергопотребления чипа для различных данных за один цикл работы устройства.

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. Standaert F. X. Introduction to side-channel attacks // Secure integrated circuits and systems, 2010. P. 27–42.
3. Lathrop L. Differential power analysis attacks on different implementations of AES with the ChipWhisperer Nano // Cryptology ePrint Archive, 2020.
4. Dunkelman O., Ghosh S., Lambooij E. Practical Related-Key Forgery Attacks on Full-Round TinyJAMBU-192/256 // IACR Transactions on Symmetric Cryptology, 2023. P. 176–188.

УДК 629.783

Разработка быстрого индикатора срыва сопровождения навигационного сигнала ГНСС

Калягин А. В.[1,2], к. т. н., Соколов И. М.[2]
[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
[2] АО «АП Восход»
105318, г. Москва, ул. Ткацкая, 19

Разработана и исследована методика индикации срыва сопровождения навигационного сигнала, основанная на частотном петлевом фильтре второго порядка. Оценены и приведены характеристики предлагаемого метода, проведено сравнение с традиционной моделью индикации по отношению сигнал/шум.

Ключевые слова: ГНСС; петлевой фильтр; сопровождение навигационного сигнала; первичная обработка сигнала.

На данный момент самым распространенным методом обнаружения срыва сопровождения навигационного сигнала является индикатор, основанный на оценке отношения сигнал/шум [1]. Если данный уровень выше определенного порога, данные сигнала берутся в расчет навигационной задачи, иначе — отбрасываются. Этот метод является довольно точным индикатором срыва, однако имеет низкую скорость реакции ввиду длительного времени оценки уровня сигнал/шум.

Время обработки может занимать свыше одной секунды. Первичные данные «сорванного» сигнала спутника продолжают поступать на этап вторичной обработки и участвуют в решении навигационной задачи, хотя на данный момент уже являются ошибочными. В связи с этим, пока не отработает индикатор срыва, выдаваемые координаты и скорости приемника могут значительно отклониться от реальных значений.

Данное исследование направлено на сокращение времени реакции приемника на срыв навигационного сигнала. Предлагается использовать в качестве индикатора другой параметр — оценку амплитуды ускорения из петлевого фильтра второго порядка [2]. Если ускорение для рассматриваемого сигнала превышает определенное пороговое значение, это означает срыв сопровождения сигнала. Преимуществом данного подхода является возможность моментального реагирования на срыв. Так как расчет ускорений проводится значительно чаще, чем решение навигационной задачи, некорректные параметры сигнала будут включены в расчет вторичных данных не более одного раза до того, как индикатор успеет среагировать. При этом отклонение первичных данных не успеет достичь критических значений, способных повлиять на результат вторичной обработки.

Однако такой подход может вызывать ложные срабатывания при высокой динамике объекта с приемником на борту. Если ускорение приемника превысит пороговое значение индикатора, есть риск ложной отбраковки большинства сопровождаемых сигналов спутников или полной потери навигации. Поэтому также рассматривается гибридный подход к индикации срыва сопровождения, показавший свою высокую эффективность и надежность за счет комбинирования преимуществ обоих подходов.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: Радиотехника, 2010. — 800 с., ил.
2. Kaplan E., Hegarty C. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third Edition. Artech, 2017. 723 p.

УДК 621.3.049

Использование кластеров микроэлектромеханических датчиков в навигационных системах

Кузнецов М. А.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
isau@mail.ru

В работе рассмотрена возможность установки кластера MEMS-датчиков и последующей параллельной обработки информации в целях повышения точности получаемых данных в навигационных системах.
Ключевые слова: MEMS-датчики; навигационная система; кластер.

Микроэлектромеханические датчики (MEMS) представляют собой соединение механических элементов, датчиков, а также приводов и электроники на одной кремниевой подложке. MEMS включают в себя ряд механических микроструктур, в частности микродатчиков, микроактюаторов и микроэлектроники, объединенных на кремниевом чипе. MEMS относятся к интегрированным системам (размер которых составляет от нескольких микрометров до миллиметров), объединяющим в себе механические, а также электрические компоненты [1].

Современные навигационные системы широко используют MEMS в качестве датчиков первичной информации, т. к. датчики, выполненные по данной технологии, характеризуются, как правило, низкой стоимостью, компактностью и малым весом, но при этом достаточно высокой относительной точностью. Характеристики и себестоимость MEMS-датчиков могут сильно отличаться в зависимости от конкретных технологий изготовления. Независимо от этого даже высокоточные, как правило, достаточно дорогие MEMS-датчики имеют существенный недостаток — высокий уровень шумов, что ограничивает их точность и, как следствие, точность решения навигационных задач.

Шум в MEMS-датчиках обусловлен рядом факторов, включая [2]:

- тепловой шум — случайные колебания заряженных частиц в материалах датчика, вызывающие хаотические сигналы;
- механический шум — вибрации и удары, влияющие на чувствительные элементы датчика;
- электронный шум — помехи от электронных компонентов, входящих в состав датчика.

Для преодоления проблемы шума в MEMS-датчиках предлагается использовать кластерную архитектуру, состоящую из нескольких датчиков, работающих параллельно. Причем подобная архитектура отличается от классических подходов по дублированию измерительных систем. В рассматриваемом подходе предполагается, что данные от нескольких датчиков и измерительных MEMS обрабатываются одновременно, в том числе с использованием параллельных алгоритмов обработки информации. В частности, подобные подходы могут быть реализованы за счет использования методов и алгоритмов комплексирования навигационной информации. Однако, внедрив параллельность обработки информации в комплексировании, можно существенным образом ускорить вычислительный процесс решения задачи комплексирования и, как следствие, повысить точность за счет того, что

освобождаемое процессорное время на бортовой вычислительной машине можно занять дополнительными алгоритмами фильтрации, оценки и обработки информации, которые могут повысить итоговую точность решения навигационной задачи. Однако у рассматриваемого подхода имеется существенный недостаток — необходимость достаточно мощного вычислителя, способного работать с несколькими потоками данных одновременно.

Литература

1. Калинкина М. Е., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л., Комарова А. В. Микроэлектромеханические системы и датчики. — СПб: университет ИТМО, 2020. — 75 с.
2. Mohd-Yasin F., Nagel D. J., Korman C. E. Noise in MEMS // Measurement Science and Technology, 2009. 24 p.

УДК 621.3.049

Структура навигационных комплексов летательных аппаратов

Суркова А. Д.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
a.d.surkova@mail.ru

Рассмотрена архитектура навигационных комплексов летательных аппаратов, объединяющих различные навигационные системы и датчики для повышения точности и надежности определения местоположения.
Ключевые слова: навигационный комплекс; летательные аппараты; обработка информации; ИНС; ГНСС.

Современные требования к решению навигационных задач становятся все более сложными для реализации, что требует комплексного алгоритмического подхода к обработке данных. Для решения этих задач используют комбинации различных навигационных систем, датчиков и алгоритмов. Совместная обработка информации, как правило, реализуется методами комплексирования [1]. Объединение нескольких навигационных систем и датчиков в единую систему с алгоритмами комплексирования и обработки информации является навигационным комплексом (НК) [2, 3].

В состав НК, как правило, включают системы, физические принципы работы которых различны. Благодаря этому НК способен решать навигационные задачи практически в любых условиях полета. Состав пилотажно-навигационного комплекса (ПНК) обычно разделен на следующие функциональные группы:

- информационно-управляющее поле кабины летательного аппарата (ЛА): средства ввода-вывода, органы управления ЛА;
- навигационное оборудование: инерциальные навигационные системы (ИНС), глобальные спутниковые навигационные системы (ГСНС), доплеровский измеритель скорости и сноса (ДИСС), система воздушных сигналов и др.;
- электронно-вычислительная подсистема: бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ).

В настоящее время существует несколько подходов к задаче комплексной обработки информации в НК. Первый подход заключается в использовании в НК минимального количества систем и датчиков навигационной информации [4]. Такие НК позволяют получать достаточно высокую точность определения навигационной информации на борту ЛА, обеспечивают надежность работы НК, не требуют больших вычислительных затрат. НК такого типа, как правило, строятся по схеме ИНС + ГНСС, ИНС + ДИСС [5].

Второй подход, напротив, заключается в использовании максимально возможного количества измерительных систем и датчиков. Информация от датчиков и навигационных систем обрабатывается совместно. НК такого типа, как правило, включают в себя ИНС, РЛС, ДИСС, РСБН, РСДН и т. д. В теории подобные НК должны обеспечивать высокую точность и надежность навигации. Однако на практике точность может значительно снижаться из-за влияния активных и пассивных

помех. Кроме того, данный метод требует БЦВМ с высокой производительностью, что повышает себестоимость НК.

Третьим вариантом построения НК можно считать селективный подход [6]. Данный подход содержит в себе преимущества двух изложенных выше подходов. Селективные НК состоят из максимально возможного количества навигационных систем и датчиков и алгоритмического обеспечения. Для повышения точности этот вид НК в его алгоритмическом обеспечении содержит алгоритм выбора наиболее достоверной навигационной информации.

Алгоритмическое обеспечение рассмотренных видов НК может сильно отличаться. В современных НК внедряются алгоритмы с интеллектуальной компонентной и многоуровневой фильтрацией, оцениванием и обработкой информации, что в значительной степени может алгоритмически повысить точность определения навигационной информации.

Литература

1. Пролетарский А. В., Неусыпин К. А. Способы коррекции навигационных систем и комплексов летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». Спецвыпуск № 5. Информатика и системы управления, 2012. — С. 216–223.
2. Агеев В. М., Павлова Н. В. Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование. — М.: Машиностроение, 1990. — 432 с.
3. Лукьянов В. В. Персональный навигационный комплекс // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение», 2006. — № 2. — С. 87–99.
4. Пупков К. А., Неусыпин К. А. Вопросы теории и реализации систем управления и навигации. — М.: Биоинформ, 1997. — 363 с.
5. Groves P. D. Principles of GNSS, inertia. and multisensor integrated navigation systems. Artech House, 2013. 800 p.
6. Селезнева М. С. Селективный измерительный комплекс для летательного аппарата // Наука сегодня: проблемы и пути решения. Материалы международной научно-практической конференции в 2 частях, 2016. — № 6. — С. 66–67.

УДК 004.233.2

Оптимизация передачи управления в процессорах «Эльбрус»

Бер Н. А.
АО «МЦСТ»
119049, Москва, Ленинский просп., 51
nikita.a.ber@gmail.com

В процессорах «Эльбрус» разработан новый метод оптимизации команд передачи управления. Он заключается в совмещении двух аппаратных способов — подготовки переходов и предсказания переходов. В статье объясняются особенности и преимущества такого метода, а также приводятся полученные результаты.

Ключевые слова: микропроцессор; передача управления; производительность; предсказание переходов; подготовка переходов.

Передача управления — это процесс перенаправления потока исполнения программы с одной ветви на другую. Он осуществляется при помощи инструкций перехода, которые присутствуют в наборе команд любой компьютерной архитектуры. Ввиду конвейерного устройства вычислительного тракта современных микропроцессоров проблема потери производительности при использовании таких команд является фундаментальной в области компьютерных наук, а задача по их оптимизации крайне актуальна на сегодняшний день. Потеря производительности возникает из-за того, что факт исполнения команды перехода становится известным на поздних стадиях конвейера, а более ранние стадии заняты инструкциями не из целевой ветви.

В науке известно немало способов, которые помогают эффективно работать с командами ветвлений. Самым популярным на сегодняшний день является предсказание переходов. Способ заключается в том, чтобы на основании динамически собираемой информации идентифицировать и исполнить команду перехода на ранних стадиях конвейера, тем самым сократив возникающую задержку между командой перехода и командами целевой ветви. Как правило, для достижения высоких показателей точности предсказания требуются значительные аппаратные ресурсы и сложные алгоритмы предсказания.

Другой известный способ оптимизации — метод подготовки переходов. Суть его заключается в том, чтобы к стадии фактического осуществления перехода конвейер располагал обеими подготовленными ветвями. Тогда исполнение перехода будет заключаться в выборе нужной альтернативы, следовательно, задержки между командой перехода и целевой ветвью не возникнет. Реализация такого метода требует меньших аппаратных затрат в сравнении с предсказанием переходов, но сопровождается другими особенностями. Одна из них — это то, что система команд должна быть построена таким образом, чтобы команда перехода разделялась на две инструкции: инструкцию подготовки передачи управления и инструкцию исполнения передачи управления. Инструкция подготовки содержит адрес передачи и размещается компилятором на несколько инструкций раньше команды исполнения. Выполнение инструкции подготовки инициализирует дополнительный параллельный конвейер, который дублирует некоторую начальную часть основного конвейера, а исполнение самого перехода переносит состояние параллельного

конвейера на основной. Число дополнительных подготовительных конвейеров определяется физическими ограничениями проектирования, главным образом критическими цепями. Поэтому в программах с большим числом ветвлений нехватка дополнительных конвейеров будет приводить к потере производительности. Такой аппаратный метод используют процессоры «Эльбрус» до 6-го поколения включительно.

В современной версии архитектуры был разработан новый метод, который совмещает в себе оба описанных способа. Система команд была расширена командами непосредственного перехода, работа по оптимизации которых ложится на аппаратный предсказатель переходов. В общем случае решение о том, какой тип передачи управления использовать, принимает компилятор.

Благодаря тому что часть сложных для предсказания переходов компилятор способен переложить на механизм подготовки перехода, объем затрачиваемого оборудования на реализацию предсказателя переходов можно уменьшить. В программах с большим числом ветвлений часть переходов осуществляется при помощи команд непосредственных переходов, таким образом, механизм подготовки переходов разгружается.

Добавленный предсказатель переходов увеличил производительность вычислительной машины. Дополнительным положительным свойством такой системы можно считать то, что выбор предпочтительного метода позволит разработчику программного обеспечения получить значительный отклик вычислительной машины от внесенных изменений в исходный код программы.

УДК 675.92.057.3

Разработка и исследование модуля управления портативными экструдерами

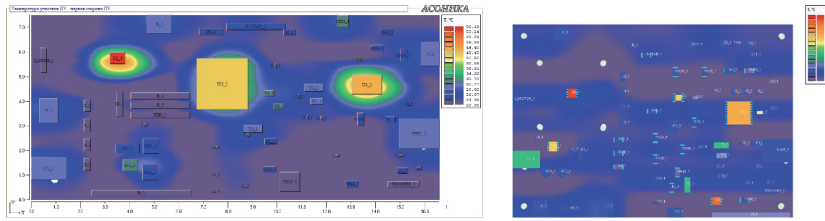
Бадалян Р. К., Мотайленко И. А.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
rbadalian@hse.ru, imotajlenko@hse.ru

Объект исследования — печатная плата устройства по производству пластикового филамента. Была изготовлена ПП для управления экструдером, проведено моделирование тепловых процессов, выделяемых на ПП. Изучены критерии безотказности. Выявлены существенные метрики, влияющие на надежность прибора.

Ключевые слова: экструдер; тепловое моделирование; термистор; надежность электронных компонентов.

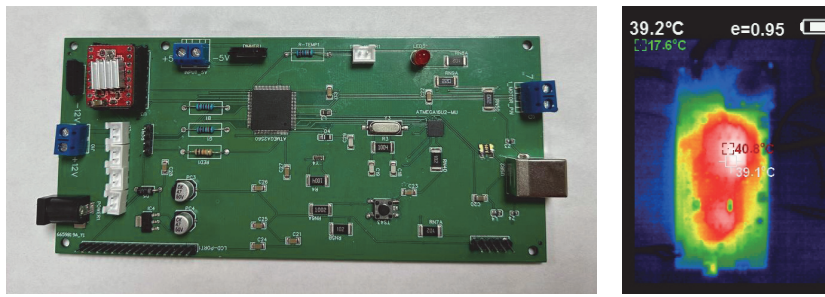
Печатные платы (ПП) являются важнейшими компонентами любой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), от корректной и точной работы которой зависит работоспособность, надежность, долговечность и безопасность всего устройства. В связи с этим особо актуальным становится вопросы исследования и производства действительно надежных ПП [1]. Не перестают проводиться исследования, направленные на улучшение надежности электронных компонентов, выявляются новые метрики надежности и редактируются существующие справочники и стандарты.

Первый этап проектирования включает разработку принципиальной схемы и выбор элементной базы. На этом же этапе определяется коэффициент нагрузки, так как этот показатель является одним из важнейших критериев, влияющих на безотказность РЭА [2]. На следующем этапе проводится моделирование тепловых процессов (рис. 1), на основе которого можно спрогнозировать перегрев и выход из строя компонента, а также использовать полученные данные для определения ключевых метрик надежности отдельных групп электронных компонентов. Имея всю информацию об электрической нагрузке, расчетные значения температур и режимы эксплуатации, рассчитали эксплуатационную интенсивность отказов разработанного модуля. Этих результатов было достаточно для изготовления прототипа модуля управления экструром, на котором тестировались температурные алгоритмы. Параллельно с этим авторы изучили все метрики, влияющие на надежность РЭА, в соответствии с этими результатами была спроектирована альтернативная версия ПП, а время наработки до отказа увеличилось на 15000 часов. Имея изготовленный прототип ПП (рис. 2), исследовали температурные алгоритмы для преобразования сопротивления с термистора в значения температур, внесли изменения в существующее уравнение Стейнхарта—Харта и β-уравнение [3], таким образом оптимизировав их для корректной работы с разрабатываемым модулем (1). Отдельно вывели формулу для преобразования выставляемого пользователем значения температуры в мощность для диммера тока (2).



а *б*

Рис. 1. Тепловая карта прототипа (*а*) опытного образца (*б*)



а *б*

Рис. 2. Изготовленный прототип (*а*) и снимок с тепловизора печатной платы (*б*)

$$T = \frac{-\beta}{ln\left(\frac{R_{th} + R_Э}{R_0 + R_Э}\right) - \frac{\beta}{T_0}} - 273{,}15\,, \qquad (1)$$

где T — температура при конкретном значении R_{th}; R_{th} — сопротивление термистора; $R_0 + R_Э$ — модель, описывающая значение сопротивления термистора при контрольной температуре T_0; β — константа; $R_Э$ — сопротивление проводника (высчитывается автоматически каждый раз при изменении температуры),

$$P_h = 0{,}001\ \ T_0^{\,2} + 0{,}0238\ \ T_0 + 9{,}8056, \qquad (2)$$

где T_0 — температура, установленная пользователем; P_h — мощность диммера.

В результате был изготовлен модуль управления бытовыми экструдерами, который совместим с другими аналогичными приборами. Изученные температурные алгоритмы также можно применять в других системах, проведя исследования, описанные в статье. Критерии оптимизации надежности можно учитывать при проектировании альтернативных РЭА.

Литература

1. Фам В.А. Допусковые методы прогнозирования и контроля показателей надежности прецизионных печатных плат радиотехнических устройств: Дис. канд. тех. наук: 05.12.04. — Москва, 2016. — 14 с.

2. Боровиков С. М., Троян Ф. Д., Цырельчук И. Н. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств // Министерство образования Республики Беларусь, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». — Минск, 2010. — С. 12–13.
3. Rana K., Kumar V., Kumar A., Chandel A., Kataria A. FPGA Implementation of Steinhart–Hart Equation for Accurate Thermistor Linearization // IEEE SENSORS journal, 2018. Vol. 18. № 6. P. 1–2.

УДК 621.3.079

Внедрение цифрового двойника через микрокомпьютер в систему управления и контроля литий-ионных аккумуляторов

Дружинин А. А.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
117303, г.Москва, ул. Керченская., 1а, к. 1
druzhinin.aa@phystech.edu

Спроектирована улучшенная система управления и контроля батареями благодаря применению микрокомпьютера и метода математического прототипирования энергетических процессов. Приведены графики переходных процессов и краткое описание полученной математической модели литий-ионной аккумуляторной батареи.
Ключевые слова: цифровые двойники; архитектура ЭВМ; машинное обучение; авиационно-космическая электроника.

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) широко используются в современной технике, но обладают низкой устойчивостью к переразряду и перезаряду. Это может привести к снижению их ресурса и даже к авариям. Поэтому необходимость анализа физико-химических процессов (ФХП) в ЛИА для диагностики и прогнозирования их технического состояния становится все более актуальной [1].

Одним из перспективных направлений в решении этой проблемы является использование метода математического прототипирования энергетических процессов (ММПЭП) [1]. Этот метод позволяет создавать точные математические модели ЛИА на основе экспериментальных данных, вбирающий в себя методы современной неравновесной термодинамики, механики, теории электрических и магнитных цепей, теории электромагнитного поля.

Система управления и контроля батареями (Battery Management System, BMS) является важнейшим компонентом любой системы, использующей ЛИА. Однако существующие BMS имеют ряд ограничений, связанных с точностью и быстродействием датчиков измеряемых величин, а также с точностью и валидностью математической модели ЛИА.

В данной работе исследуется возможность интеграции цифрового двойника, созданного с помощью ММПЭП, в систему управления и контроля ЛИА посредством микрокомпьютера для улучшения процессов управления BMS. Ранее цифровой двойник ЛИА, созданный с помощью ММПЭП, был реализован на серверном компьютере и использовался для оптимизации управления ЛИА [2].

Результаты экспериментов показали, что интеграция цифрового двойника ЛИА, созданного с помощью ММПЭП, в систему управления и контроля ЛИА позволяет улучшить точность и быстродействие управления ЛИА. Кроме того, цифровой двойник ЛИА позволяет прогнозировать техническое состояние ЛИА и предотвратить аварийные ситуации [3].

Интеграция цифрового двойника ЛИА, созданного с помощью ММПЭП, в систему управления и контроля ЛИА посредством микрокомпьютера является

перспективным направлением в решении проблемы диагностики и прогнозирования технического состояния космического и авиационного оборудования. Разработка и реализация улучшенной системы управления и контроля батареями (BMS) на основе цифрового двойника ЛИА является актуальной задачей в современной технике.

Литература

1. Старостин И. Е. Построение на основе интерполяции моделей различных физических и химических систем методом математического прототипирования энергетических процессов // Надежность и качество сложных систем, 2024. — № 1. — С. 49–58. DOI: 10.21685/2307-4205-2024-1-6.
2. Starostin I. E. and Drujinin A. A. The concept of a software and technological platform for digital twins based on energy dynamics methods // 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2023. P. 1–6. DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086710.
3. Старостин И. Е., Дружинин А. А. Аналитическое приближение решений уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов путем качественного анализа этих уравнений // Надежность и качество сложных систем, 2023. — № 2. — С. 22–31. DOI:10.21685/2307-4205-2023-2-3.

УДК 627.728

КВ-трансивер для гидрологического подвижного буя

Васильев А. В., Вязенцев Я. А., Калюжный Б. К.
Севастопольский государственный университет
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
yaaav04@gmail.com

В статье представлен КВ-трансивер для гидрологического подвижного буя, использующий зенитное излучение радиоволн КВ-диапазона частот. Этот метод обеспечивает двусторонний обмен данными на расстоянии до 1000 км для задач гидрологического мониторинга.

Ключевые слова: КВ-диапазон; зенитное излучение; гидрологический буй; трансивер; дистанционный мониторинг.

Современные системы гидрологического мониторинга требуют надежных и дальнодействующих средств связи для передачи данных с подвижных буев. Традиционные системы, работающие в УКВ-диапазоне, ограничены прямой видимостью и не обеспечивают необходимой дальности. Спутниковые системы связи предусматривают дорогостоящее оборудование и высокую плату за передаваемый трафик. Решением является использование КВ-диапазона частот с зенитным излучением, что позволяет добиться значительной дальности связи без мертвых зон.

Предлагаемый КВ-трансивер предназначен для работы в диапазоне частот 2–8 МГц и использует антенну, максимум диаграммы направленности которой направлен вертикально вверх. Сигнал, отражаясь от ионосферы, распространяется на большие расстояния. Для двусторонней связи трансивер работает в полудуплексном режиме с временным разделением каналов. Недостатки использования КВ-диапазона частот — это невысокие скорости передачи информации и зависимость дальности связи от времени суток и сезона.

С береговой станции на буй передаются команды дистанционного управления, а в обратном направлении передаются результаты измерений гидрологической и атмосферной обстановки и данные телеметрии. Объем передаваемой информации небольшой. С учетом этого большая скорость передачи информации не нужна. Устранить влияние второго недостатка можно с помощью выбора заранее запрограммированного ряда частот и выбора из этого ряда частоты, которая обеспечит надежную связь для данного конкретного времени суток и сезона.

Была разработана приемо-передающая система связи КВ-диапазона. Также был разработан протокол передачи данных, позволяющий в реальном времени с минимальными задержками управлять подвижным гидрологическим буем и передавать полученные буем результаты измерений на береговую станцию.

Литература

1. Дроздов В. В. Любительские КВ трансиверы. — М.: Радио и связь, 1988.
2. Поляков В. Т. Радиолюбителям о технике прямого преобразования. — М.: Патриот, 1990.

УДК 004.31:654.924

Разработка модуля расширения функционала СКУД для отслеживания состояния контрольных точек и оповещения в Telegram

Фролов А. В., Бойков С. Ю.
Ярославский государственный технический университет
150023, г. Ярославль, Московский просп., 88

Разработан модуль расширения СКУД на ESP32 для мониторинга и отправки уведомлений через Telegram. Описаны характеристики, архитектура и процесс создания. Модуль позволяет повысить оперативность реагирования на нештатные ситуации.
Ключевые слова: СКУД; ESP32; Wi-Fi; IoT; Telegram; безопасность.

На сегодняшний день одним из перспективных способов повышения эффективности систем контроля и управления доступом (СКУД) является использование технологии IoT. Системы, построенные с использованием микроконтроллеров ESP32 и интеграции с мессенджерами, обладают следующими преимуществами:

- оперативное информирование о событиях;
- высокая скорость передачи данных;
- гибкость и масштабируемость системы.

Одним из факторов, сдерживающих активное внедрение таких систем, является отсутствие готовых решений для расширения функционала существующих СКУД. В рамках работы по созданию модуля расширения был разработан модуль на базе ESP32 для интеграции со СКУД, обеспечивающий мониторинг состояния контрольных точек и отправку уведомлений через Telegram.

Литература

1. Mr. Ayush G Ingole Home Security System Using IOT // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), 2024. DOI: 10.22214/ijraset.2024.62773.
2. Razzak I., Eklund P., Xu G. Introduction to the special section on securing IoT-based critical infrastructure (VSI-cei) // Computers and Electrical Engineering, 2022. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2022.108118.
3. ESP32 Series Datasheet. URL: https://www.espressif.com (дата обращения: 25.04.2024).
4. Перри Л. Архитектура интернета вещей. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 454 с.
5. Фролов А. В., Вологин А. Н. Эффективность языков программирования для ESP32: сравнение C++, MicroPython, Rust и TinyGo // 77-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием. Сб. материалов конф. В 3 ч. Ч. 3. — ЯГТУ, 2024. — С. 128–132.

УДК 612.84

Структура системы оценки показателей зрения человека

Буцкий Д. О., Алешина А. И., Чиглинцева С. А.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
d.butskiy@gmail.com

Разработана система оценки показателей зрения человека, включающая три компонента: прибор для контроля состояния глазного дна, VR-очки и КЧСМ-прибор. Рассмотрены показатели оценки зрения и обоснован их выбор.
Ключевые слова: система оценки показателей зрения человека; заболевания глазного дна; критическая частота слияния мельканий; цветовосприятие; острота зрения.

С увеличением использования гаджетов растет число людей с проблемами зрения, особенно миопией. Миопия повышает риск деградации и отслоения сетчатки, катаракты и глаукомы, что может привести к необратимому ухудшению зрения и слепоте. Для предотвращения деградации зрения важно распознавать болезнь на ранних стадиях, но не всегда есть возможность посетить офтальмолога.

Для этого разработана система оценки показателей зрения с использованием мобильного приложения и трех приборов: для контроля состояния глазного дна, VR-очков и КЧСМ-прибора. Прибор для глазного дна проверяет его состояние по следующим критериям: норма, катаракта, глаукома, ретинопатия. При помощи VR-очков с таблицами Рабкина и Сивцева возможно выявить нарушения цветовосприятия и остроты зрения. КЧСМ-прибор определяет частоту световых мельканий, при которой сетчатка все еще может воспринимать их как отдельные вспышки, а не как единый оптический поток.

Для удобного взаимодействия с системой через голосовые команды в нее интегрирован голосовой помощник. Он поддерживает русский язык, распознает отдельные буквы и непрерывную речь, что облегчает использование системы.

В рамках исследования студентами НИУ ВШЭ была спроектирована система комплексной оценки зрения человека. В дальнейшем планируется разработка макета VR-очков с оптической системой для контроля глазного дна, интеграция голосового помощника в приложение и внедрение продукта на рынок для улучшения диагностики и лечения офтальмологических заболеваний.

Литература

1. Worldwide prevalence and risk factors for myopia. Wiley Online Library. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1111/j.1475-1313.2011.00884.x.
2. Classification of Eye Diseases in Fundus Images // IEEE. URL: https://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6287639/9312710/09474508.pdf?tp=&arnumber=9474508&isnumber=9312710&ref=.
3. Результаты исследования цветового зрения разными способами у детей с амблиопией // Российская Детская Офтальмология. — URL: https://rdo.su/index.php/rdo/article/view/164.

4. КЧСМ в определении зрительной работоспособности слабовидящих школьников. — Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича (ИППИ) РАН. — URL: http://www.jip.ru/2002/GOL1.pdf.
5. Humanizing voice assistant: The impact of voice assistant personality on consumers' attitudes and behaviors. ScienceDirect. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969698920312911.

УДК 004.5

Алгоритмы, датчики и исполнительные устройства в человеко-машинном интерфейсе при управлении робототехническими комплексами в условиях недостаточной осведомленности об их состоянии и положении

Гладченко А. А., Тельминов О. А., к. т. н.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
agladchenko@niime.ru

В работе рассматривается комплекс дополнительных воздействий на оператора в условиях недостаточной осведомленности о состоянии объекта управления, варианты реализации, проводится анализ ключевых аспектов алгоритмов самосохранения у робота как защиты от некорректных действий оператора.
Ключевые слова: эргономика; РТК; датчики; ЧМИ; канал связи.

В работе рассматривается аспект влияния состояния оператора на управление робототехническим комплексом. Интерфейс взаимодействия человека и машины имеет три блока: оператор (человек), канал связи, РТК [1]. Коммуникация в рамках человеко-машинного интерфейса по беспроводному каналу происходит в формате передачи команды от оператора к РТК и передачи информации о выполнении команды РТК оператору. В момент, когда пропускная способность канала связи падает, корректная передача сигнала затруднена. Это может влиять на решения, которые принимает оператор.

В зависимости от задач РТК может функционировать в трех режимах: автоматический, полуавтоматический и ручной. Существует ряд отвлекающих факторов, потенциально способных повлиять на поведение оператора и адекватность управления РТК. В частности, на управление может повлиять физическое состояние оператора [1].

В качестве решения проблемы стоит рассмотреть механизм передачи дополнительной информации о состоянии оператора РТК. Отслеживать состояние оператора можно с помощью регистрации его внимания на экране по алгоритмам, основанным на методе Виолы—Джонса [2]. Более полное представление о состоянии оператора и определении его работоспособности может быть получено при помощи дополнительных параметров, считываемых датчиками. Алгоритмы, основанные на удаленной динамической оценке состояния оператора и обработке полученных данных РТК, смогут обеспечить выполнение задания РТК вне зависимости от состояния оператора. Результаты анализа робототехническим комплексом состояния оператора могут быть использованы в разработке сценариев [3] поведения РТК в типовых ситуациях. Типовые ситуации можно заранее заложить в нечеткую базу знаний робота, что поможет составить набор правил поведения (тактик), соответствующих его движениям и задачам.

Руководствуясь этими тактиками, РТК может принять решение об аварийной остановке работы и/или запросить дополнительное подтверждение операции.

В случае потери оператором концентрации при выполнении задачи решением может стать обеспечение обратной связи от РТК. В качестве механизма,

обеспечивающего отправку коммуникативного сигнала от машины к человеку, рационально будет использовать вибротактильную коммуникацию [4] как дополнительный физический способ взаимодействия по привлечению внимания оператора к выполнению задачи.

Литература

1. Галин Р. Р., Галина С. Б., Мамченко М. В. Подход к распределению работ в коллаборативной робототехнической системе с учетом модели рабочего пространства и динамического переназначения исполнителей // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН, 2023. — № 6 (116). — С. 21–32.
2. Viola P., Jones M. J. Robust Real-Time Face Detection // International Journal of Computer Vision, 2004. Vol. 57. № 2. P. 137–154.
3. Мамченко В. М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686142, Российская Федерация. Программа для формирования и визуализации облака точек рабочих пространств кобота и человека и области пересечения их рабочих органов: № 2023684823, заявл. 21.11.2023, опубл. 04.12.2023 / М. В. Мамченко; заявитель — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук.
4. Спиркин А. Н. Бионические методы управления роботизированным механизмом // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль, 2020. — № 4 (34). — С. 84–91.

УДК 621.382

Методы повышения качества обслуживания трафика нагруженных сетей с применением высокоскоростного тракта обработки сетевых пакетов

Горчакова М. А.[1,2], Елизаров С. Г.[3], Гончаров С. В.[3], Тельминов О. А.[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, 6/1
[3] MALT system
119333, г. Москва, ул. Фотиевой, 5, стр. 1

Проведен сравнительный анализ методов повышения качества обслуживания трафика на основе их программной реализации. Предложена оптимальная архитектура сетевого процессора на основе наиболее эффективного метода приоритизации пакетов данных.
Ключевые слова: QoS; VQC; Strict Priority; Round Robin; Fair Queuing; Weighted Round Robin; Weighted Fair Queuing.

С развитием сетей связи, совершенствованием мобильных устройств и постоянным ростом числа пользователей объем передаваемой информации возрастает ежегодно. Только в России интернет-трафик за 2023 год вырос в среднем на 26% [1], поэтому создание устройств, способных обрабатывать трафик с высокой частотой поступления входящих пакетов данных с минимальными потерями, приобретает все большее значение. Среди применяемых решений используются блоки приоритизации передаваемых данных с заранее определенными алгоритмами обработки сетевых пакетов с узким набором анализируемых полей и заголовков. Однако данная проблема может быть решена с помощью программируемого сетевого процессора, позволяющего исполнять произвольные программы, в том числе реализующие алгоритмы управления и приоритизации трафика. В данном случае изменение программ выполняется в динамическом режиме без внесения аппаратных изменений или изменения архитектуры устройства.

В рамках работы выполняется исследование реализации конвейерного сетевого процессора для приоритизации сетевого трафика в коммутационных устройствах, предназначенного для управления сетевым трафиком в КМОП-изделиях микро- и наноэлектроники [3], с возможностью динамического изменения алгоритмов обработки сетевых пакетов и алгоритмов управления очередей, а также количеством и размерами пакетов. Архитектура данного устройства представлена.

Итогом исследования в данной работе стало создание улучшенной архитектуры, в которой конвейерный сетевой процессор применяется в качестве контроллера виртуальных очередей. Важным достоинством данной архитектуры является гибкое управление режимами работы и параметрами алгоритмов QoS. Конвейерный сетевой процессор способен подробно анализировать заголовки входящих пакетов, что может значительно улучшить существующие модели QoS. После проведения

моделирования полученные значения параметров будут проверены в аппаратной реализации данной архитектуры.

Литература

1. Интернет в России в 2022–2023 годах. Состояние, тенденции и перспективы развития // Портал Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. — URL: https://digital.gov.ru/uploaded/files/internet-v-rossii-v-2022-2023-godah.pdf (дата обращения: 05.03.2024).
2. Yoshigoe Kenji. Design and Evaluation of the Combined Input and Crossbar Queued (CICQ) Switch // USF Tampa Graduate Theses and Dissertations, 2004. URL: https://digitalcommons.usf.edu/etd/1313 (дата обращения: 15.03.2024).
3. 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. EDN ZUQSZZ.

УДК 004.031.6

Обработка изображений при помощи ПЛИС

Усов Д. А., Манцурова Н. А., Певцов Е. Ф.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
duuoossdim@gmail.com

На базе ПЛИС Arty-7 разработано устройство для потоковой обработки изображений в целях выделения контуров при помощи алгоритмов пространственной фильтрации. Разработаны коды поведенческого описания аппаратной обработки изображений, а также ввода-вывода данных через интерфейсы UART и VGA.
Ключевые слова: ПЛИС; обработка изображений; встраиваемые системы; оператор Собеля; UART; VGA.

В настоящее время появляется все больше и больше встраиваемых систем с компьютерным зрением. Все они имеют разное назначение. Однако довольно востребованными являются задачи по выделению контуров, поскольку выделение контуров, точек или границ приводит к уменьшению объема входных данных, что упрощает процедуры анализа изображения [1].

В ходе исследования было разработано устройство по обработке изображений, имеющее следующую структуру: получение данных по UART, запись в BRAM, обработка по алгоритму Собеля, сохранение данных в памяти, вывод через VGA. Методика позволяет одновременно обрабатывать несколько участков изображения, что ускоряет процесс.

Таким образом, были решены следующие задачи: 1) выбран алгоритм работы устройства; 2) разработан код поведенческого описания устройства; 3) реализована передача данных между ПЛИС и компьютером; 4) выполнено тестирование макета. Данный проект может быть использован в зрительных имплантах [3], где изображение формируется при помощи фосфенов, которые в свою очередь генерируются из данных контуров.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание для университетов №ФГФЗ-2023-0005. Рег. № 123052400076-8).

Литература

1. Ханова А. А., Озерова М. И. Обзор методов выделения контуров на изображениях // Информационные технологии в науке и производстве, 2020. — С. 89–92.
2. Маврин Е. М. Сравнение алгоритмов выделения контуров на цифровом изображении и выбор наилучшего алгоритма для реализации на ПЛИС // Вопросы науки и образования, 2019. — № 14 (61). — С. 11–24. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-algoritmov-vydeleniya-konturov-na-tsifrovom-izobrazhenii-i-vybor-nailuchshego-algoritma-dlya-realizatsii-na-plis (дата обращения: 01.06.2024).
3. Нейроимплант для восстановления зрения: сайт проекта ELVIS V. — URL: http://elvis-tech.ru/elvisV (дата обращения: 29.06.2024).

УДК 621.396.6

Методы уменьшения массы радиоэлектронной аппаратуры на этапе моделирования конструкции в CAD-системах

Коротков М. Д.[1], д. т. н., Тимошенков С. П.[2]
[1] АО «НИИ «Субмикрон»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2
Submicron@se.zgrad.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
netadm@miee.ru.

В статье рассматриваются различные методы и подходы к оптимизации конструкции РЭА в целях снижения ее массы. Представлены примеры применения способов уменьшения массы на конкретных примерах, демонстрирующих их эффективность. Особое внимание уделяется методу обнижения конструкции.

Ключевые слова: уменьшение массы; облегчение РЭА; CAD-системы; обнижение конструкции; топологическая оптимизация.

Постоянно растущие требования к мобильности и автономности РЭА ведут к необходимости снижения ее массы. Облегчение РЭА позволяет уменьшить энергопотребление, повысить производительность и снизить затраты на транспортировку грузов и космических аппаратов (КА) на орбиту.

Ключевые методы уменьшения массы:

- оптимизация геометрии деталей;
- оптимизация топологии печатных плат (ПП);
- использование более легких и прочных материалов;
- применение более совершенных технологий создания деталей.

Метод оптимизации геометрии деталей позволяет снизить массу РЭА за счет изменения формы и размеров деталей, сохраняя при этом необходимую прочность и функциональность. Он основан на использовании алгоритмов, которые анализируют напряжения и деформации в конструкции, выявляя области, где можно убрать лишний материал без ущерба для прочности. Используется для оптимизации стандартных элементов, уже имеющих определенную форму, например корпусов или ПП [1].

Оптимизация топологии ПП позволяет снизить массу платы, сохраняя при этом ее функциональность и электротехнические характеристики. Метод основан на улучшении трассировки и размещении компонентов в целях минимизации площади и длины проводников, уменьшении толщины ПП. Также одним из способов является создание платы с вырезами или ребрами жесткости, оптимизированными для распределения нагрузки и снижения массы [2–3].

Применение усовершенствованных материалов позволяет напрямую снизить массу РЭА, сохраняя при этом необходимые параметры. Использование материалов с улучшенными механическими свойствами позволяет создавать более прочные конструкции, которые устойчивы к вибрациям, ударам и другим нагрузкам.

Метод использования новых технологий производства деталей позволяет создавать более легкие, прочные и функциональные элементы РЭА по сравнению

с традиционными методами. 3D-печать (аддитивные технологии) позволяет создавать детали сложной геометрии из различных материалов. Уменьшение массы идет за счет создания пустотелых структур, ребер жесткости и других оптимизированных форм, недоступных традиционным методам.

Метод оптимизации геометрии деталей является эффективным инструментом для снижения массы РЭА на этапе проектирования. Использование CAD-систем позволяет значительно упростить процесс облегчения конструкции. Правильное применение метода обнижения конструкции в сочетании с другими методами позволяет добиться значительного снижения массы РЭА без ущерба для ее прочности и функциональности [1].

Литература

1. Зеленский В. А., Сухачев К. И. Основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств. — Самара: изд-во Самар. гос. ун-та, 2020. — 146 с.
2. Селиванов Ю. С. Топологическая оптимизация элементов инженерных конструкций // Наука. Технологии. Инновации: Сборник научных трудов XV Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной Году науки и технологий в России. В 10 частях, Новосибирск, 06–10 декабря 2021 года / Под редакцией Д. О. Соколовой. Часть 10. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2021. — С. 70–74.
3. Фролов А. В., Шаповалов П. А., Сигалева П. Н., Смирнов С. В. Уменьшение массы БИНС с применением топологической оптимизации при заданной жесткости // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2021. — № 1. — С. 105–117.

УДК 535

Влияние длины последовательности шума, генерируемого оптическим генератором случайных чисел, на эффективность прохождения тестов NIST

Мавков Д. А.[1], Сибгатуллин М. Э.[1,2], Гилязов Л. Р.[1], Арсланов Н. М.[1]
[1] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ
420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10
mavkovda@stud.kai.ru
[2] Государственное научное бюджетное учреждение «Академия наук Республики Татарстан»
420111, г. Казань, ул. Баумана, 20

Рассмотрено влияние длины последовательности случайных чисел на эффективность прохождения тестов NIST. Случайный шум генерировался оптическим генератором случайных чисел. Увеличение степени случайности достигалось применением схемы выравнивания энергий масштабов вейвлет-преобразования.

Ключевые слова: случайный шум; оптический генератор случайных чисел; тесты NIST.

При генерации случайных чисел необходимо применение математических методов увеличения степени случайности генерируемого шума [1]. Одним из подходов, позволяющих улучшить результаты прохождения тестов на случайность NIST, является применение схемы выравнивания энергий масштабов дискретного вейвлет-преобразования [2]. В данной работе проведены исследования влияния длины выборки генерируемого шума на эффективность прохождения тестов оценки случайности NIST. Последовательность случайных чисел генерировалась разработанным нами аппаратным генератором случайных чисел на основе гомодинного генератора случайного шума. Последовательность анализировалась окнами длиной 300, 500, 700, 1000, 3000, 5000, 7000 и 10000 элементов. Выравнивались энергии масштабов вейвлет-преобразования с 1-го по 3-й, с 1-го по 4-й и с 1-го по 5-й уровни. Было показано, что исследуемая числовая последовательность не проходит тест LinearComplexity при длинах последовательностей ниже 300 элементов. При этом увеличение длины последовательности до 500 элементов приводит к увеличению эффективности прохождения теста выше 90 % при всех комбинациях выравниваемых уровней энергий. Эффективность прохождения теста Rank равна 0 при длинах последовательностей ниже 3000 элементов. Увеличение рассматриваемых значений выше 3000 элементов приводит к значениям эффективности прохождения теста выше 97 %. Таким образом, в зависимости от того, эффективность прохождения каких тестов NIST необходимо увеличить, необходимо подбирать требуемую для этого длину последовательности случайных чисел. Также возможно подобрать такое значение длины последовательности, при котором прохождение отдельных тестов не будет достигать максимального значения, но в среднем по всем тестам будут получены положительные результаты относительно прохождения тестов NIST.

Литература

1. Bikos A., Nastou P., Petroudis G., Stamatiou Y. Random Number Generators: Principles and Applications // Criptography, 2023. Vol. 7. № 4. P. 54–84.
2. Сибгатуллин М. Э., Гилязов Л. Р., Мавков Д. А., Арсланов Н. М. Оптимизация работы генератора случайных чисел на основе ingaas pi-n фотодиода в гомодинной схеме с применением дискретного вейвлет-анализа // Изв. РАН. Сер. физ., 2023. — № 87. — № 12. — С. 1796–1801.

УДК 681.518.3

Система сбора данных на основе AVR-микроконтроллера ATmega328 для модернизации аналоговых вакуумметров

Анохин А. Л., к. ф.-м. н., Холодков И. В.
Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский просп., 7
zakat9090@gmail.com

Предложен способ модернизации установки реактивного магнетронного распыления. Разработанная система существенно улучшает метрологические характеристики штатного блока измерения давления и эффективность использования установки в технологическом процессе.
Ключевые слова: микроконтроллер; вакуумметр; автоматизация.

В современных производственных процессах широко применяется вакуумное технологическое оборудование. В ряде случаев при развитии производства нерационально производить полную замену имеющегося оборудования, целесообразнее рассматривать возможность его модернизации. Данное устройство разрабатывалось для установки реактивного магнетронного распыления в целях объединения в единую систему блока контроля состава газовой среды, блока измерения давления на основе вакуумметра ВИТ-3 и системы управления коммутационными элементами установки. Модернизация позволит обеспечить более гибкую возможность автоматизированного управления технологическим процессом.

Основой прототипа выбран микроконтроллер ATmega328 на базе платформы Arduino Nano, для сопряжения которого с термопарной частью вакуумметра ВИТ-3 было принято решение использовать специализированные модули MAX6675. Визуализация результатов измерений в режиме реального времени обеспечивается использованием цветного TFT-дисплея. К вакуумметру подключаются два модуля MAX6675, один — для измерения давления, второй — для контроля тока накала. Обмен данными между микроконтроллером и модулем MAX6675 осуществляется с помощью протокола SPI. Для связи с остальными блоками установки предусмотрено использование последовательной ассиметричной шины I^2C и прямой связи с цифровыми портами микроконтроллера. Структура предлагаемой системы сбора данных обеспечивает возможность передачи текущих значений контролируемых параметров по шине USB на персональный компьютер, оснащенный специализированным инструментальным ПО. В качестве протокола обмена данными используется протокол UART, а USB-выход устройства работает в режиме виртуального COM-порта. Данные передаются в формате ASCII. Для хранения служебной информации используется EEPROM-память микроконтроллера объемом 1 K, из которой 400 байт отведено для хранения градуировочной зависимости термопарного манометрического преобразователя. Дополнительно 50 байт использовано для хранения коэффициентов чувствительности для разных газовых сред. Таким образом, для хранения служебной информации, вводимой в систему на этапе настройки, остается доступным достаточный по объему раздел памяти EEPROM микроконтроллера объемом не менее 500 байт. В данном разделе хранятся следующие величины: измеренный номинальный ток накала манометрического преобразователя, выбранный тип единиц измерения давления и установленный поправочный

коэффициент чувствительности. Для программирования микроконтроллера использовалась среда Arduino IDE с набором следующих дополнительных библиотек:

- EEPROM.h для работы с энергонезависимой EEPROM-памятью,
- max6675.h для работы с модулем сопряжения,
- UTFT.h для работы с цветным TFT-дисплеем.

Алгоритм работы системы следующий: после подачи питания происходит инициализация микроконтроллера и считывание служебной информации из EEPROM, далее при отсутствии действий со стороны оператора система переходит в режим измерения. Измеренные значения давления отображаются на цифровом дисплее и параллельно передаются в порт USB. Данные считываются каждые 500 миллисекунд. В процессе измерений предусмотрен выход в режим установки через обработку прерывания, возникающего при нажатии на кнопку на панели управления. В этом случае пользователю предоставляется возможность изменить установленные значения тока накала, коэффициента чувствительности и единицы измерения давления.

Экспериментальная проверка показала, что погрешность измерений давления не превышает 3%. Таким образом, разработанная система позволяет существенно улучшить метрологические характеристики вакуумметра ВИТ-3 и обеспечить его интеграцию в цифровую систему управления установки.

УДК 621.316.7

Разработка системы управления технологическим оборудованием на базе отечественного программируемого логического контроллера серии «Багет»

Бутманов Д. Д.[1], Голяков М. А.[2], Гришин А. А.[2]
[1] ООО «Эстика»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, к. 237, кв. 95
dbutmanov@estika.ru
[2] ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, к. 1

Разрабатывается отечественная система управления на основе ПЛК «Багет», разработанного в ФГУ ФНЦ НИИСИ. Приведены особенности и преимущества ПЛК серии «Багет», а также опыт построения оборудования на базе ПЛК «Багет» в ООО «Эстика». Показаны перспективы развития серии ПЛК «Багет» и проектов, связанных с ним.

Ключевые слова: программируемый логический контроллер; электронная компонентная база; ПЛК «Багет»; «Комдив-МК»; программный аппаратный комплекс.

На сегодняшний день доступность как иностранных систем управления промышленным оборудованием, так и электронной компонентной базы иностранного производства не гарантирована. Для стабильной работы промышленности во время нестабильной политической ситуации ключевые компоненты промышленного оборудования должны разрабатываться и производиться в пределах страны. Системы управления промышленным оборудованием и программируемые логические контроллеры (ПЛК) необходимы для современного производства, а выход их из строя при невозможности закупки комплектующих может надолго парализовать работу линии. По этой причине актуальной задачей является создание системы управления на основе отечественного ПЛК «Багет», в основу которого лег микроконтроллер «Комдив-МК», разработанный в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. Использование отечественного микроконтроллера отличает эту серию ПЛК от множества отечественных аналогов.

Специалистами ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН была создана линейка ПЛК «Багет», позволяющая закрыть большую часть потребностей разработчиков оборудования. ПЛК серии «Багет» созданы на основе отечественных платформ, программируются на языках МЭК 61131-3, используют операционную систему собственной разработки, прошли сертификацию ТР/ТС по ЭМС, низковольтное оборудование, и могут быть использованы в ответственных производственных системах.

В настоящий момент в ООО «Эстика» на базе АО «НПП «ЭСТО» создается система управления технологическим оборудованием микроэлектронной промышленности, за основу которой взят модульный контроллер «Багет» ПЛК-1. Модульная конструкция позволила полностью повторить функционал блоков управления, ранее разработанных в АО «НПП «ЭСТО», а активное взаимодействие с командой ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН позволяет оперативно решать возникающие в процессе работы сложности, связанные с трудоемкостью написания удобного программного

пакета для конфигурирования и программирования ПЛК. Путем решения этих проблем стало привлечение МПС «СОФТ» к разработке среды исполнения (RT) Master PLC для «Багет» ПЛК1, а также написание управляющей программы в среде MasterSCADA 4D.

В перспективе на базе ПЛК «Багет» будет реализован весь программно-аппаратный комплекс, необходимый для удовлетворения потребностей предприятий микроэлектронной промышленности и критической инфраструктуры. Интеграция в серию ПЛК «Багет» элементов искусственного интеллекта позволит управлять сложными нелинейными процессами, выявлять брак и вести интеллектуальную обработку заготовок. На базе НИУ МИЭТ будут созданы учебные классы и рабочие места для студентов, а освоение ПЛК «Багет» войдет в новейшие магистерские программы.

УДК 621.3

Реализация фильтра Калмана на ПЛИС

Самофалов А. М., Ларионов М. В., Певцов Е. Ф.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
sasasamofalov82@gmail.com

На языке Verilog разработан модуль, реализующий обработку данных по алгоритму фильтра Калмана с возможностью проведения тестов как в САПР Vivado, так и при симуляции на отладочной плате. Рассмотрены особенности аппаратной реализации фильтра Калмана для уменьшения шума при обработке изображений.
Ключевые слова: цифровые фильтры; фильтр Калмана; ПЛИС; Vivado; Arty-7.

В настоящее время наряду с важностью развития приборов для получения информации стоит задача разработки инструментов для быстрой и эффективной фильтрации сигналов, их обработки, улучшения качества, а также извлечения нужной информации из шумового фона. Эти функции можно реализовать с помощью применения цифровых фильтров, которые для повышения производительности оптимально реализовывать аппаратно, т.е. на основе программируемых логических интегральных схем.

В данной работе предпринята попытка реализации фильтра Калмана применительно к задачам обработки изображений [1]. На первом этапе на основе модели движения тела по заданной траектории с параметрами шума в ПЛИС реализован простейший фильтр Калмана, который является математическим алгоритмом, созданным для оценивания состояния системы на основе данных датчика и отфильтрованных значений предыдущего шага. Продемонстрирована работоспособность предложенного кода поведенческого описания для аппаратной реализации фильтра Калмана на ПЛИС. В результате проведения тестов как в САПР Vivado, так и при симуляции на отладочной плате показана эффективность разработанного кода поведенческого описания для реализации фильтра на основе интегральной схемы семейства Arty-7. Кроме этого, создан модуль генерации частот для синхронизации обработки данных и модуль, отвечающий за передачу данных при помощи интерфейсов I2C и SPI. При помощи утилиты Serial port plotter и микроконтроллера ESP32 разработана система для считывания информации с ПЛИС в режиме реального времени. Показано, что в результате аппаратной реализации устройства через 15 шагов итерации коэффициент Калмана стабилизировался до значения 0,109, а введенная искусственно за счет имитации шума начальная ошибка модели уменьшилась в четыре раза.

Следующим шагом проекта является разработка кода поведенческого описания устройства для создания малоресурсного прототипа пространственного фильтра изображения как одного их элементов для формирования данных, которые должны использоваться при создании прототипа ИС системы в корпусе как составной части нейроимпланта для восстановления зрения [2]. Но калмановские алгоритмы все еще имеют некоторые проблемы, связанные с размерностью матриц, участвующих при обработке изображений, что значительно замедляет процесс выполнения алгоритмов и увеличивает затрачиваемые ресурсы. Решением

является применение блочной обработки снимков в процессе фильтрации от шумов [3]. Здесь используется принцип параллельного воздействия алгоритмов на разные части изображения, на которые оно поделено заранее. Данная модель учитывает влияние соседних блоков, устраняя негативные эффекты на стыке между ними. В этом случае в обработку информации планируется включить данные из соседних участков, что расширяет вектора состояний и размерность ковариационной матрицы и является более эффективным способом фильтрации по сравнению с обычным калмановским алгоритмом.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание для университетов № ФГФЗ-2023-0005. Рег. № 123052400076-8).

Литература

1. Истомин Е. П., Каламбет М. В., Колбина О. Н., Сидоренко А. Ю., Яготинцева Н. В. О применении фильтра Калмана при прогнозировании значений параметров природной системы // Информация и космос, 2021. — № 2. — С. 106–111.
2. Левицкая О. С., Лебедев М. А. Интерфейс мозг — компьютер: будущее в настоящем // Вестник Российского государственного медицинского университета, 2016. — № 2. — С. 4–16.
3. Сирота А. А., Иванков А. Ю. Блочные алгоритмы обработки изображений на основе фильтра Калмана в задаче построения сверхразрешения // Компьютерная оптика, 2014. — Т. 38. — № 1. — С. 118–126.

УДК 621.3.049

Разработка уточненного метода оценки надежности систем промышленного Интернета вещей

Цветков В. Э., Ландер Л. Б., к. т. н. Королев П. С.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
vtsvetkov@hse.ru

Проведен обзор и анализ существующих и применяемых на практике подходов к оценке надежности систем промышленного Интернета вещей (IIoT). Разработан уточненный многофакторный метод прогнозирования надежности систем IoT.

Ключевые слова: IoT; показатели надежности; аппаратная и программная составляющие; сеть.

Для корректного функционирования систем IoT нужно постоянно поддерживать высокий уровень их надежности. Однако стоит отметить, что к системам IoT предъявляются более жесткие требования, чем к устройствам Интернета вещей, применяющихся в бытовой сфере. Это связано с тем, что возникновение отказов какого-либо компонента системы на промышленном предприятии может привести к более серьезным последствиям.

Современные подходы прогнозирования надежности систем IoT имеют существенный недостаток [1–2]. Они основаны на оценке лишь аппаратной составляющей системы, что делает их недостаточно эффективными. Поэтому цель работы заключается в увеличении точности прогнозирования показателей надежности систем IoT.

Соответственно, для достижения этой цели был проведен литературный обзор используемых на практике подходов, позволяющих оценить надежность всей системы IoT. Кроме того, были исследованы математические методы оценки программного обеспечения, технической составляющей и сетевой части системы. Далее был разработан собственный подход к многофакторному прогнозированию показателей надежности IoT-системы, который учитывает все эти три составляющие.

Литература

1. Надежность электрорадиоизделий: Справочник. — М.: МО РФ, 2006. — 641 с.
2. Pokorni S. J. Reliability and availability of the internet of things // Vojnotehnički glasnik: military technical courier. Vol. 67. Issue 3. P. 588–600.

УДК 621.383

Численное исследование оптического диода на основе двумерных фотонных кристаллов

Мокшин П. В.
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва
443086, г. Самара, Московское ш., 34
mokshinfabio@gmail.com

Численно исследован оптический диод, разработанный на основе стыковки двумерных фотонно-кристаллических волноводов различной структуры.
Ключевые слова: фотонный кристалл; оптический диод; интегральная оптика.

Разработка элементной базы оптических вычислительных систем на основе двумерных фотонных кристаллов (ФК) позволяет создавать интегральные оптические устройства обработки информации, обладающие следующими преимуществами:

- высокое быстродействие [1];
- технологичность (возможность реализации имеющимися технологиями микроэлектроники);
- радиационная стойкость [2].

Различные варианты стыковки двух ФК волноводных структур открывают новые возможности создания таких элементов, как оптические диоды (устройства, обладающие существенно разными коэффициентами пропускания при прохождении света в прямом и обратном направлении) [3]. В работе численно исследовались стыковки двух ФК-волноводов с различным характером распространения излучения. Из множества конфигураций стыковок выбиралась оптимальная с точки зрения пропускания. Каждый из ФК-волноводов, сформированный упорядоченным набором воздушных отверстий в массиве кремния, характеризуется радиусом одного стержня и взаимным расположением отверстий. В ходе вычислительных экспериментов, проведенных с использованием пакета Ansys Lumerical (реализующего FDTD-метод), продемонстрировано пропускание с коэффициентом 0,35 в одном направлении и коэффициентом 0,006 в другом, что свидетельствует о возможности использования найденной структуры в качестве оптического диода.

Литература

1. Derdour R., Lebbal M. R., Mouetsi S., Hicini A. A novel connected structure of all-optical high speed and ultra-compact photonic crystal OR logic gate // Journal of Optical Communications, 2021. 152.
2. Shiue R. J., Gao Y., Tan C. et al. Thermal radiation control from hot graphene electrons coupled to a photonic crystal nanocavity // Nat. Commun., 2019. № 10. P. 109.
3. Патент RU2819193C1, Мокшин П. В., Павельев В. С., Головашкин Д. Л. Оптический диод на двумерных фотонных кристаллах. — МПК G02F1/00 G02B6/00.

УДК 621.372.8

Исследование и анализ нелинейно-оптических эффектов в кремниевых щелевых волноводных структурах

Мурзагалина С. М.[1,2], Барабаненков М. Ю.[1,2,3]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[2] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] *Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН*
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
murzagalina.sm@phystech.edu

Работа посвящена исследованию нелинейных оптических явлений в щелевых кремниевых волноводах, а также в кремнийорганических полимерных структурах. Продемонстрировано уменьшение потерь оптической мощности за счет компенсации ограничений, налагаемых двухфотонным поглощением в кремнии. Построенная модель щелевого волновода анализируется с использованием следующих вычислительных методов: метода конечных элементов (МКЭ), метода конечных разностей во временной области (FDTD), а также метода сингулярных возмущений (SPT).
Ключевые слова: нелинейная оптика; легированные полимеры; щелевой волновод.

Кремниевая технологическая база является универсальной как для электронных устройств, так и для интегральных фотонных решений. Она незаменима для таких развивающихся высокотехнологичных областей, как индустрия телекоммуникаций и системы обработки данных. На платформе КНИ было разработано множество устройств, в основе работы которых лежат эффекты линейной оптики, например оптические буферы, межсоединения [1], а также различные неинвазивные датчики.

Однако при высоких значениях интенсивности излучения (порядка ГВт/см^2) в кремниевых структурах начинают проявляться нелинейные оптические эффекты. Многие из них, например четырехволновое смешение или самомодуляцию, можно использовать для различных приложений и потребностей интегральной фотоники, в том числе для мультиплексирования сигналов и их модуляции. В то же время двухфотонное поглощение (ДФП) в кремнии приводит к большим потерям оптической мощности, что может исключить указанные ранее преимущества.

Ввиду центральной симметрии кристаллической структуры кремния нелинейные эффекты второго порядка не проявляются в объеме структуры, а за счет влияния ДФП и инициированного им поглощения на свободных носителях, ослабляющих распространяемый в структуре сигнал, слабо выражены эффекты третьего порядка нелинейности. Для решения этой проблемы был проведен анализ различных материалов, результаты которого представлены в табл. 1. В том числе были рассмотрены кремнийорганические гибриды (КОГ), которые обладают сильными нелинейностями второго и третьего порядка [2]. На распространение оптического

излучения в волноводных структурах влияют как свойства кремния, так и КОГ-материалов [3].

Таблица 1. Обзор анализируемых материалов и их нелинейные характеристики

Нелинейные характеристики материалов					
Материал	n_L	n_{NL} [м^2/Вт]	$n_{complex}$	β_{NL}	FOM
Si	3,48	$6*10^{-18}$	3,54	1,72%	0,86
SiO_2	1,46	$2,5*10^{-20}$	1,46	0,02%	10
$As_{40}Se_{60}$	2,81	$2,3*10^{-17}$	3,04	8,19%	11
Ormocore	1,7	$2*10^{-17}$	1,9	11,76%	6,4

Здесь n_L — линейный показатель преломления исследуемого материала, а n_{NL} — нелинейная составляющая полного показателя преломления $n_{complex}$, которая связана с восприимчивостью третьего порядка $\chi^{(3)}$ следующим образом:

$$n_{NL} = Re(\chi^{(3)})/(4\varepsilon_0 c n_L^2),$$

где ε_0 и c — диэлектрическая проницаемость и скорость света в вакууме соответственно. Для полимера Ormocore нелинейный показатель преломления на порядок выше n_{NL} кремния, в то время как общий показатель преломления значительно меньше, что способствует созданию достаточной контрастности для локализации электромагнитного поля в малом поперечном сечении.

Двухфотонное поглощение и поглощение на свободных носителях приводят к значительным потерям оптической мощности. Таким образом, для увеличения эффективности устройства необходимо снизить влияние этих эффектов. Наглядно это демонстрирует функция годности (FOM), связывающая нелинейный фазовый сдвиг с соответствующим поглощением интенсивности и определяющаяся как

$$FOM = \frac{1}{\lambda}\frac{n_{NL}}{\alpha_{NL}},$$

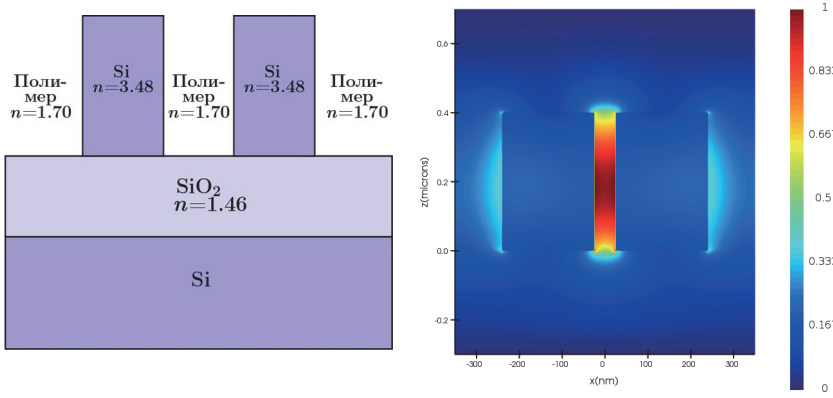
здесь $\alpha_{NL}(\lambda)$ — коэффициент нелинейного поглощения. Для кремния характерен как высокий нелинейный показатель преломления n_{NL}, так и высокий коэффициент поглощения, обусловленный двухфотонным поглощением в объеме структуры, таким образом, значение FOM для Si невелико. Диоксид кремния SiO_2 обладает слабыми нелинейными характеристиками, в то время как полимер Ormocore характеризуется большим n_{NL} и небольшим нелинейным коэффициентом поглощения α_{NL}, что приводит к увеличению FOM и усилению нелинейного отклика в структуре.

Еще одной значимой характеристикой является параметр нелинейности, который определяется как

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda}\frac{n_{NL}}{A_{eff}^{(3)}}.$$

Чтобы получить максимальную нелинейность в щелевых волноводных структурах, необходимо не только найти материал с высоким нелинейным показателем преломления, но и добиться максимальной локализации поля в щели структуры. Параметр нелинейности γ обратно пропорционален эффективной области

нелинейных взаимодействий третьего порядка $A_{eff}^{(3)}$. Для структуры кремниевого щелевого волновода на рис. 1*а* $A_{eff}^{(3)}$ меньше 0,1 мкм^2 может быть получена при таких геометрических параметрах, как ширина щели 50 нм, ширина направляющих волноводов 200 нм и их высота 400 нм.



а *б*

Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения щелевого волновода на основе КНИ-структуры (*а*) и 2D-визуализация результатов численного моделирования распределения волноводной моды (*б*)

Уникальное преимущество щелевой волноводной структуры заключается в том, что поле локализуется внутри щели, как показано на рис. 1*б*, так что нелинейный отклик в кремнии становится менее значимым, а нелинейные эффекты проявляются в материале, заполняющем пространство между кремниевыми волноводами, в качестве которого могут быть выбраны легированные полимеры или другие органические вещества, например полимер Ormocore, в которых демонстрируются нелинейности как второго, так и третьего порядка. Щелевые волноводные структуры являются хорошими кандидатами для электрооптических модуляторов с высокими скоростями передачи данных и устройств обработки оптических сигналов [4]. Исследуемые устройства обладают такими преимуществами, как высокая эффективность и интеграция с КМОП-технологиями.

Нелинейный фазовый сдвиг в щелевом волноводе обусловлен нелинейно-оптическим эффектом Керра. Выполнен анализ исследуемой структуры с помощью программного обеспечения для моделирования, основанного на методе конечных элементов (МКЭ) и методе конечных разностей во временной области (FDTD). Также разработан аналитический подход к получению параметров щелевого волновода с нелинейными характеристиками на основе метода сингулярных возмущений (SPT). SPT необходим для анализа нелинейного отклика в структуре как малого пространственного возмущения [5], что позволяет построить модель с достаточно высокой точностью [6].

В ходе исследования было проведено моделирование распространения излучения в щелевом волноводе, по результатам которого выявлено распределение полей

в зависимости от характеристик источника и геометрических параметров структуры. Также было получено значение минимальной эффективной площади нелинейного взаимодействия, которое необходимо для оптимизации геометрических параметров щелевого волновода, увеличивая тем самым функцию годности FOM устройства.

Кроме того, построена оптимизационная модель на основе генетического алгоритма [7] в целях снижения потерь оптической мощности сигнала за счет определения оптимальной комбинации геометрических характеристик структуры для достижения максимальной эффективности устройства. С помощью оптимизации удалось сократить потери оптической мощности в щелевом волноводе в пять раз.

Таким образом, проведенное с помощью математического моделирования исследование позволяет проанализировать характер распространения излучения в структуре щелевого волновода и предложить оптимальную геометрию для усиления нелинейного отклика при минимальных потерях мощности.

Литература

1. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
2. Leuthold J. et al. Silicon Organic Hybrid Technology—A Platform for Practical Nonlinear Optics // Proceedings of the IEEE, 2009. Vol. 97. № 7. P. 1304–1316. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2016849.
3. Lipson M. et al. Guiding, modulatin. and emitting light on Silicon-challenges and opportunities // Journal of Lightwave Technology, 2005. Vol. 23. № 12. P. 4222–4238. DOI: 10.1109/JLT.2005.858225.
4. Palmer R. et al. Low power Mach–Zehnder modulator in silicon-organic hybrid technology // IEEE Photonics Technology Letters, 2013. Vol. 25. № 13. P. 1226–1229.
5. Nayfeh A. H., Asfar O. R. Parallel-plate waveguide with sinusoidally perturbed boundaries // Journal of Applied Physics, 1974. Vol. 45. № 11. P. 4797–4800.
6. Yokota M. et al. Guided transverse-magnetic waves supported by a weakly nonlinear slab waveguide // JOSA B, 1993. Vol. 10. № 6. P. 1096–1101.
7. Koza J. R. Genetic programming as a means for programming computers by natural selection // Statistics and computing, 1994. Vol. 4. P. 87–112.

УДК 538.958

Управление оптическим излучением наноструктур GeSiSn/Si при помощи металлических наноантенн

Хахулин С. А.[1], Коляда Д. В.[1], Фирсов Д. Д.[1], Комков О. С.[1], Тимофеев В. А.[2], Скворцов И. В.[2], Машанов В. И.[2], Гайдук А. Е.[2], Уткин Д. Е.[2,3]

[1] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
[2] Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
[3] Новосибирский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Определены положения мод локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массивах алюминиевых наноантенн, сформированных на поверхности излучающих гетероструктур GeSiSn/Si. Показано, как наличие наноантенн различной конфигурации влияет на интенсивность оптического излучения GeSiSn/Si.

Ключевые слова: гетероструктуры; локализованный поверхностный плазмонный резонанс; GeSiSn; анизотропное отражение; фотолюминесценция.

Под воздействием электромагнитного излучения свободные электроны в металлических наночастицах приобретают осциллирующее движение, что при определенной энергии приводит к появлению в наночастицах локализованного поверхностного плазмонного резонанса (*localized surface plasmon resonance — LSPR*). Такой резонанс приводит к появлению сильного электрического поля, локализованного вблизи наночастиц, что широко используется для усиления комбинационного рассеяния, ускорения химических реакций и т. д. [1]. Такие частицы также называются оптическими наноантеннами, поскольку при помощи них можно в разы усиливать слабые оптические сигналы [2]. Это свойство позволяет управлять оптическим излучением, достигая необходимого уровня его интенсивности.

В данной работе на поверхности излучающих множественных квантовых ям $Ge_{0,84}Si_{0,076}Sn_{0,084}$/Si, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, были сформированы массивы прямоугольных алюминиевых наноантенн толщиной 50 нм с различными латеральными размерами *L* и *S*. Оптические свойства полученных наноантенн были охарактеризованы методом ИК Фурье-спектроскопии анизотропного отражения [3], где осуществлялась модуляция направления линейной поляризации зондового излучения в плоскости поверхности образцов вдоль длинной *L* и короткой *S* сторон. Благодаря этому на фоне всего отраженного излучения были выделены поляризационно-зависимые участки спектров, связанные с наличием *LSPR*. Создание наноантенн прямоугольной формы приводит к тому, что вдоль сторон наноантенн *L* и *S* возбуждаются резонансные моды *LSPR* с различным спектральным положением [4]. Вдоль длинной стороны возбуждается резонансная мода относительно большой интенсивности, и при увеличении длины *L* от 200 нм (массив № 1) до 360 нм (массив № 3) нами было показано, что интенсивность растет в несколько раз со сдвигом энергии резонанса от 1 до 0,66 эВ. Вдоль короткой стороны *S* с размерами от 140 нм (массив № 1) до 157 нм (массив № 3) было

определено наличие резонанса в районе 1,1–1,2 эВ, интенсивность которого на порядки меньше по сравнению со стороной *L* во всей серии образцов.

Влияние алюминиевых наноантенн на оптическое излучение структуры $Ge_{0,84}Si_{0,076}Sn_{0,084}/Si$ было исследовано методом низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ). В спектре ФЛ $Ge_{0,84}Si_{0,076}Sn_{0,084}/Si$ наблюдается сигнал вблизи 0,66 эВ, связанный с межзонной рекомбинацией носителей заряда. Использование массива наноантенн № 1, диапазон резонанса которого не пересекается с диапазоном сигнала ФЛ, ожидаемо не приводит к усилению излучения. Другой массив наноантенн № 2 (L = 265 нм, S = 147 нм) с пиком резонанса вблизи 0,75 эВ имеет ненулевое значение *LSPR* в области излучения гетероструктур, в результате чего наблюдается усиление ФЛ. Формирование поверх множественных квантовых ям третьего массива № 3, чей диапазон и пик резонанса совпадают с аналогичными значениями сигнала излучения гетероструктуры, приводит к двукратному усилению сигнала ФЛ. Кроме того, в случае массивов плазмонных наноантенн № 2 и № 3, помимо заметного усиления ФЛ, наблюдается ее частичная поляризация, чего не было получено в случае плазмонного массива № 1, не взаимодействующего с излучением гетероструктуры.

Таким образом, в работе определены спектральные особенности локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массивах алюминиевых наноантенн на поверхности излучающей гетероструктуры $Ge_{0,84}Si_{0,076}Sn_{0,084}/Si$. Получено усиление фотолюминесценции и ее частичная поляризация в результате взаимодействия гетероструктуры с наноантеннами, чей плазмонный резонанс полностью либо частично совпадает с диапазоном излучения множественных квантовых ям.

Литература

1. Hutter E., Fendler J. H. Exploitation of localized surface plasmon resonance // Advanced Materials, 2004. Vol. 16. № 19. P. 1685–1706.
2. Ma L., Yu P., Wang W., Kuo H. C., Govorov A. O., Sun S., Wang Z. Nanoantenna-enhanced light-emitting diodes: Fundamental and recent progress // Laser & Photonics Reviews, 2021. Vol. 15. № 5. P. 20000367.
3. Firsov D. D., Khakhulin S. A., Komkov O. S. Fourier Transform Infrared Reflection Anisotropy Spectroscopy of Semiconductor Crystals and Structures: Development and Application in the Mid-Infrared // Applied. Spectroscopy, 2023. Vol. 77. № 5. P. 470–481.
4. Lecarme O., Sun Q., Ueno K., Misawa H. Robust and versatile light absorption at near-infrared wavelengths by plasmonic aluminum nanorods // ACS Photonics, 2014. Vol. 1. № 6. P. 538–546.

УДК 621.383

Разработка модели интегрального фотонного чувствительного элемента с применением углеродных нанотрубок

Митрофанова А. Е.[1,2], Барабаненков М. Ю.[2], Светиков В. В.[3,4], Ромашкин А. В.[5]

[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
mitrofanova.ae@phystech.edu
[2] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[3] *АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»*
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
[4] *Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН*
119991, ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, 38
[5] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе исследовано поведение карбоксилированных углеродных нанотрубок при адсорбции газов. Выбран оптимальный тип волноводной структуры, произведена оценка необходимой длины чувствительного участка сенсора. Разработана модель чувствительного элемента на основе интерферометра Маха — Цендера.

Ключевые слова: газовый сенсор; углеродные нанотрубки; интегральная фотоника.

В настоящее время газовые сенсоры широко применяются, например, для мониторинга состояния окружающей среды и отслеживания состояния воздуха в производственных помещениях. Повышение селективности и точности фотонных интегральных чувствительных элементов достигается за счет использования наноматериалов [1]. Материалы на основе углерода широко применяются при разработке газовых датчиков из-за своих электрических свойств, которые значительно изменяются при взаимодействии с молекулами газов [2, 3].

Несмотря на активное изучение изменения свойств графена при адсорбции газа, исследований, рассматривающих свойства функционализированных углеродных нанотрубок и возможности их применения для мониторинга газовых сред, крайне мало. Целью данной работы является анализ изменения свойств карбоксилированных углеродных нанотрубок при взаимодействии с аммиаком и исследование возможности создания газового сенсора.

Наиболее распространенным методом создания фотонного сенсора является модификация оптического волокна графеном [2], оксидом графена [3] или слоем углеродных нанотрубок. Массив сенсоров [4] позволяет использовать один датчик, сочетающий различные чувствительные элементы, для анализа смесей газов и выделения отдельных составляющих и их концентраций.

В работе исследовались слои карбоксилированных углеродных нанотрубок (Р3-SWNT) толщиной 3, 18,5 и 35 нм. На рис. 1 [5] представлено АСМ-изображение слоя карбоксилированных углеродных нанотрубок. Показатели преломления

тонких слоев, использовавшиеся в дальнейшем для моделирования чувствительного элемента, были получены с помощью эллипсометра.

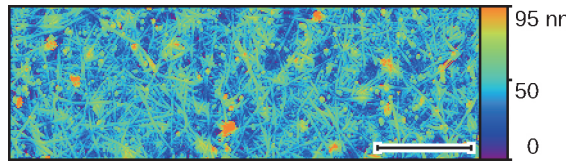


Рис. 1. АСМ-изображение слоя углеродных нанотрубок, цветом выделена толщина слоя (от 0 до 95 нм)

Для разработки элемента был выбран SiON-волновод с повышенной контрастностью (n = 1,82) шириной 1 мкм и толщиной 0,6 мкм. Нанесение на поверхность такого волновода тонкого (35 нм) слоя карбоксилированных УНТ позволяет значительно увеличить чувствительность структуры к аммиаку.

В работе представлена модель чувствительного элемента на основе интерферометра Маха—Цендера (ИМЦ). Для функционирования такого элемента необходимо наличие поворота фазы на $\pi/2$ между плечами ИМЦ. Участки со слоем УНТ располагаются в обоих плечах ИМЦ, поворот фазы оценивается между плечом, находящимся при нормальных условиях, и плечом, подверженным воздействию аммиака. Длина участка, необходимая для получения поворота фазы на $\pi/2$ при длине волны λ = 1319 нм, составляет порядка 13 мм.

На рис. 2 представлена полученная с помощью моделирования зависимость интенсивности в выходном канале от содержания паров воды в азотной среде. Зависимость соответствует описанному в [4] поведению отклика ИМЦ. Для более точной оценки требуется уточнение экспериментальных данных.

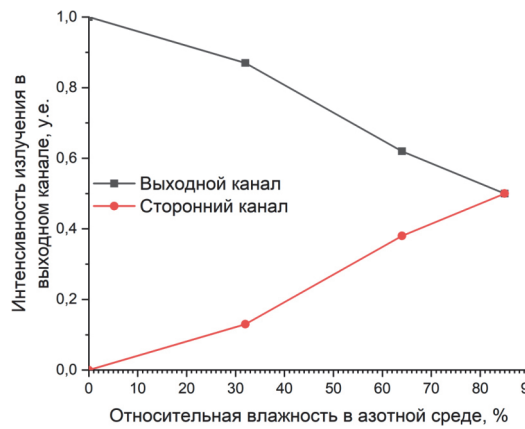


Рис. 2. Зависимость интенсивности выходящего излучения от концентрации паров воды в азотной среде

Общая длина чувствительного элемента составляет около 35 мм. Для дальнейшей миниатюризации необходимо использование более контрастных волноводов (Si_3N_4 и Si).

Литература

1. Бокарев В. П., Красников Г. Я. Оценка изменения физико-химических свойств наноразмерных кристаллических материалов // Доклады Академии наук, 2008. — Т. 420. — № 2. — С. 186–189.
2. Yao B. et al. All-optical Mach–Zehnder interferometric NH3 gas sensor based on graphene/microfiber hybrid waveguide // Sensors and Actuators B: Chemical, 2014. Vol. 194. P. 142–148.
3. Fan X. et al. Ammonia gas sensor based on graphene oxide-coated mach-zehnder interferometer with hybrid fiber structure // Sensors, 2021. 11. Vol. 21.
4. Laplatine L. et al. Silicon photonic olfactory sensor based on an array of 64 biofunctionalized Mach-Zehnder interferometers // Optics Express, 2022. 19. Vol. 30. P. 33955–33968.
5. Romashkin A. V. et al. Change in the carbon nanotube thin layer refractive index after water and ammonia // Book of Abstracts. 11th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, 2024. P. 537–538.

УДК 538.945

Формирование сверхпроводящих пленок Nb_3Al для интегрального однофотонного детектора в планарных ионных ловушках

Хыдырова С. Ю.[1,2], Ломакин А. И.[3,4], Ковалюк В. В.[2,3], к. ф.-м. н., Гольцман Г. Н.[4,5], д. ф.-м. н., Моисеев К. М.[1], к. т. н.

[1] МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
hydyrova@bmstu.ru
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
[3] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11
[4] Московский педагогический государственный университет
119435, г. Москва, ул. Малая Пироговская, 1, стр. 1
[5] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

Получены сверхпроводящие тонкие пленки Nb-Al методом совместного магнетронного распыления из двух источников. Исследована зависимость их удельного сопротивления и критической температуры от мощности магнетронов и температуры подложки.

Ключевые слова: интегральный однофотонный детектор; SNSPD; планарная ионная ловушка; сверхпроводимость; Nb3Al; критическая температура; тонкая пленка; магнетронное распыление.

В планарных ионных ловушках, работающих преимущественно при температурах ~4 K и выше, необходимы интегральные однофотонные детекторы с высокой квантовой эффективностью и низкой скоростью темнового счета, в связи с чем актуальной является разработка интегрального однофотонного детектора на основе тонких сверхпроводящих пленок с более высокой критической температурой T_C по сравнению с широко применяемыми NbN. Ранее нами было показано, что перспективными материалами для SNSPD являются кристаллические сверхпроводники класса A15, среди которых одним из наиболее актуальных и малоисследованных является Nb_3Al [1], формирование сверхпроводящих тонких пленок которого возможно совместным магнетронным распылением [2].

В данной работе пленки Nb-Al формируются на установке ВУП-11М совместным магнетронным распылением из двух источников при температуре подложки от комнатной до ~600 °C и при различной мощности магнетронов: для Nb — от 150 до 550 Вт и для Al — от 44 до 162 Вт.

Показано, что удельное сопротивление пленок Nb-Al заметно снижается от 337 до 157 мкОм·см при повышении скорости роста пленки от 2,8 до 9,8 Å/с (для мощности магнетрона Nb от 150 до 550 Вт соответственно). Выявлено, что для пленок толщиной 350 нм с долей Nb 80 % (ат.), осаждаемых без нагрева подложки, критическая температура составляет T_C = 3,5 K. В результате отжига в течение 6 ч

при температуре 600 °C в высоком вакууме поверхностное сопротивление пленок значительно снижается, а также заметно образование зерен, что свидетельствует о кристаллизации структуры пленки и повышении ее сверхпроводящих свойств.

Литература

1. Ковалюк В. В. и др. Волноводный сверхпроводниковый однофотонный детектор для фотонного и ионного квантовых процессоров и нейроморфных вычислений // Изв. вузов. Радиофизика, 2023. — Т. 66. — № 11. — С. 927–985.
2. Dochev D. et al. Nb_3Al thin film deposition for low-noise terahertz electronics // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2008. Vol. 97. № 1. P. 012072.

УДК 535-45; 621.376; 535.015

Методы оценки поляризационно-зависимых характеристик электрооптических модуляторов на платформе из нитрида кремния

Амирасланов А. Ш.[1], Бабурин А. С.[1,2], Лотков Е. С.[1,2], Авдеев С. С.[1,2], Бузаверов К. А.[1,2], Родионов И. А.[1,2]
[1] НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана
105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18
[2] ВНИИА им. Н. Л. Духова
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22

Разработаны электрооптический модулятор и конвертер поляризации на платформе из нитрида кремния. Описаны методы оценки поляризационно-зависимых характеристик электрооптических модуляторов и пассивных элементов фотонных интегральных схем. Представлены результаты измерений параметров устройств при разных входных поляризациях.
Ключевые слова: электрооптический модулятор; гибридная мода; нитрид кремния; поляризационный конвертер.

Интегральная фотоника является одной из критически важных областей для решения задач квантовых [1] и нейроморфных [2] вычислений, центров обработки информации [3] и систем компьютерного зрения [4] благодаря своей высокой пропускной способности и низкому энергопотреблению.

Электрооптические модуляторы являются перспективными устройствами управления светом на чипе, которые способны достигать гигагерцевой полосы пропускания [5]. Они находят свое применение в системах с криогенными температурами [6, 7] и малыми размерами [8]. В настоящее время ведутся поиски оптимального сочетания параметров модуляторов, а именно высокой плотности интеграции, низких потерь, возможности переключения фазы и высокого коэффициента экстинкции. Электрооптические модуляторы на основе возбуждения гибридной оптической моды представляют собой один из возможных вариантов компромиссного решения, поскольку они обладают как малыми размерами и высокой полосой пропускания (как частично плазмонный компонент), так и малыми вносимыми потерями (как частично фотонный компонент) [9]. Для возбуждения гибридной моды в области разрабатываемого активного элемента требуется определенная поляризация света, в связи с чем возникает необходимость в контроле поляризации света на чипе.

В рамках работ по созданию электрооптического модулятора были разработаны:

- конструкция электрооптического модулятора на основе гибридной оптической моды;
- конструкция волноводов из нитрида кремния для поддержания фундаментальных TE- и TM-мод;
- конструкция конвертера поляризации для преобразования фундаментальной TE-моды в фундаментальную TM-моду;

- измерительные схемы определения поляризационно-зависимых характеристик электрооптического модулятора.

Работы выполнялись сотрудниками научно-образовательного центра «Функциональные Микро/Наносистемы».

Литература

1. Taballione C., Anguita M., Goede M., Venderbosch P., Kassenberg B., Snijders H., Kannan N., Vleeshouwers W., Smith D., Epping J., Meer R., Pinkse P., Vlekkert H., Renema J. 20-Mode Universal Quantum Photonic Processor. Quantum (2023). 7. 1071. 10.22331/q-2023-08-01-1071.
2. Zhang Q., Xing Z., Huang D. Implementation of Pruned Backpropagation Neural Network Based on Photonic Integrated Circuits // Photonics, 2021. 8, 363. URL: https://doi.org/10.3390/photonics8090363.
3. Near Margalit, Chao Xiang, Bowers S. M., Bjorlin A., Blum R., Bowers J. E. Perspective on the future of silicon photonics and electronics // Appl. Phys. Lett., 31 May 2021. 118 (22): 220501. URL: https://doi.org/10.1063/5.0050117.
4. Poulton C., Byrd M., Raval M., Su Zhan, Li Nanxi, Timurdogan E., Coolbaugh D., Vermeulen D., Watts M. R. Large-scale silicon nitride nanophotonic phased arrays at infrared and visible wavelengths // Optics Letters, 2016. 42. 21–24. 10.1364/OL.42.000021.
5. Eppenberger M., Messner A., Bitachon B. I. et al. Resonant plasmonic micro-racetrack modulators with high bandwidth and high temperature tolerance // Nat. Photon. 17, 360–367 (2023). URL: https://doi.org/10.1038/s41566-023-01161-9.
6. Youssefi A., Shomroni I., Joshi Y. J. et al. A cryogenic electro-optic interconnect for superconducting devices // Nat Electron 4, 326–332 (2021). URL: https://doi.org/10.1038/s41928-021-00570-4.
7. Michael Gehl, Christopher Long, Doug Trotter, Andrew Starbuck, Andrew Pomerene, Jeremy B. Wright, Seth Melgaard, John Siirola, Anthony L. Lentin. and Christopher DeRose. Operation of high-speed silicon photonic micro-disk modulators at cryogenic temperatures // Optica 4, 374–382 (2017).
8. Erwen Li, Qian Gao, Ray T. Che. and Alan X. Wang. Ultracompact Silicon-Conductive Oxide Nanocavity Modulator with 0.02 Lambda-Cubic Active Volume // Nano Letters 2018 18 (2), 1075–1081. DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b04588.
9. Andreas Messner, David Moor, Daniel Chelladurai, Roman Svoboda, Jasmin Smajic, Juerg Leuthold. Plasmonic, photonic, or hybrid? Reviewing waveguide geometries for electro-optic modulators. APL Photonics 1 October 2023; 8 (10): 100901. URL: https://doi.org/10.1063/5.0159166.

УДК 621.3.049

Вычислительная сложность программирования фотонных интегральных схем, построенных на базе интерферометра Маха — Цендера

Суроегина А. Е.[1,2], к. ф.-м. н., Барабаш Н. В.[1,2], к. ф.-м. н., Бобров А. И.[1]
[1] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
suroegina@unn.ru
[2] Волжский государственный университет водного транспорта
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

В литературе большое внимание уделено топологиям и производительности фотонных интегральных схем (ФИС), выполняющих матрично-векторное умножение. В нашем докладе рассматривается существенный вопрос о вычислительной сложности программирования ФИС, который значительно реже встречается в литературе.

Ключевые слова: унитарное разложение; интерферометр; ФИС.

Применение фотонных интегральных схем (ФИС) считается перспективным решением для преодоления ограничений традиционной электронной вычислительной техники. В научных публикациях широко освещены топологии и эффективность ФИС, выполняющих матрично-векторное умножение. Однако вопрос о сложности программирования таких схем, являющийся ключевым при их разработке и определении сферы применения, остается малоизученным. В нашем докладе этот вопрос рассмотрен для двух методов построения топологии ФИС и их программирования.

В работе [1] было показано, что любой дискретный конечномерный унитарный оператор может быть физически реализован с помощью оптических устройств. Там же был приведен алгоритм разложения любой унитарной $N\times N$-матрицы $U(N)$ в последовательность двумерных преобразований:

$$U(N) = D \cdot T_{2,1} \cdot \ldots \cdot T_{N,N-2} \cdot T_{N,N-1},$$

где D — диагональная матрица с единичными по модулю элементами, а $T_{N,M}$ — блочно-диагональная матрица, соответствующая интерферометру Маха — Цендера. Блок матрицы $T_{N,M}$ имеет вид $P(\varphi,\theta) = \begin{pmatrix} e^{i\varphi}\cos\theta & -\sin\theta \\ e^{i\varphi}\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$ и занимает элементы с индексами (N, N), (N, M), (M, N) и (M, M). Ее другие диагональные элементы равны единице, а все остальные — нулю.

Другой известный алгоритм [2] позволяет представить унитарную матрицу в виде произведения D и матриц $T_{N,M}$ и $T_{N,M}^{-1}$, домножение на которые происходит поочередно с обеих сторон от D. *Прямоугольная* топология ФИС, соответствующая такой композиции, отличается от *треугольной* топологии [1] более компактным расположением светоделителей и фазовращателей. По сравнению с треугольной, она имеет вдвое меньшую оптическую глубину и более устойчива к потерям.

В нашей работе даны оценки вычислительной сложности обоих методов, а также показано, что для действительных унитарных матриц достаточно использовать

блочно-диагональную матрицу с блоком вида $P(\theta)=\begin{pmatrix}\cos\theta & -\sin\theta\\ \sin\theta & \cos\theta\end{pmatrix}$. Использование такого блока упрощает реализацию интерферометра за счет уменьшения количества фазовращателей.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWR-2022-0007.

Литература

1. Reck M., Zeilinger A., Bernstein H. J. and Bertani P. Experimental realization of any discrete unitary operator // Phys. Rev. Lett., 1994. 73, 58–61.
2. Clements W. R. et al. Optimal design for universal multiport interferometers // Optica 3, 1460–1465 (2016). Vol. 16. № 6 (2). P. 632–639.

УДК 621.383

Оценки точности вычислений на фотонной интегральной схеме, построенной на базе неидеальных интерферометров Маха — Цендера

к. ф.-м. н., Барабаш Н. В.[1,2], Сидоренко К. В.[1], к. ф.-м. н., Нежданов А. В.[1], к. ф.-м. н., Бобров А. И.[1]

[1] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
barbash@itmm.unn.ru
[2] Волжский государственный университет водного транспорта
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

Рассматриваются оценки точности матрично-векторного умножения, выполненного на планарном интерферометре Маха — Цендера с потерями и несимметричными светоделителями. Полученные оценки могут использоваться при проектировании фотонных интегральных схем и определении требований к качеству их изготовления.

Ключевые слова: интерферометр Маха — Цендера; матрично-векторное умножение; ошибки изготовления; фотоника; ФИС.

Ежедневно в мире производится около нескольких эксабайт (10^{18}) данных с экспоненциально растущей скоростью [1], что требует увеличения производительности компьютеров. Этот процесс имеет аппаратные ограничения, обойти которые сегодня предлагается с помощью использования оптических фотонных интегральных схем (ФИС) при проектировании традиционных процессоров. ФИС позволяет выполнять сверхбыстрые матрично-векторные операции, используемые, например, в задачах машинного обучения и современных телекоммуникационных стандартах [2, 3]. Такие операции реализуются путем пропускания упорядоченного набора оптических сигналов через многослойную оптическую сеть, образованную каскадами планарных интерферометров Маха — Цендера (ИМЦ) [4]. Физически роль вектора играет набор входных мод, а действию линейного матричного оператора соответствуют фазовые сдвиги и перераспределение интенсивностей оптических сигналов на интерферометрах.

Основными препятствиями для масштабирования оптических сетей являются неточности изготовления, оптические потери, рассеяние на шероховатости боковых стенок, а также ограниченная точность цифроаналогового преобразования при управлении фазовращателями [5]. В нашей работе рассматривается ИМЦ, направленные ответвители которого имеют ошибки деления из-за неточности соблюдения расстояния между волноводами и длины взаимодействия [6]. Для такого интерферометра с использованием величины вектора ошибки получены оценки точности вычисления в зависимости от ошибки деления. Теоретические результаты были проверены в численном эксперименте, а именно для построенной в COMSOL Multiphysics модели неидеального ИМЦ было показано, что теоретическая кривая хорошо приближает численные экспериментальные результаты.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWR-2022-0007.

Литература

1. Kitayama K.-I., Notomi M., Naruse M., Inoue K., Kawakami S., Uchida A. Novel frontier of photonics for data processing — Photonic accelerator // Apl. Photonics, 2019. Vol. 4. № 9. P. 090901.
2. Shen Y., Harris N. C., Skirlo S., Prabhu M., Baehr-Jones T., Hochberg M., Sun X., Zhao S., Larochelle H., Englund D. et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits // Nature photonics, 2017. Vol. 11. № 7. P. 441–446.
3. Zhuang L., Roeloffzen C. G., Hoekman M., Boller K.-J., Lowery A. J. Programmable photonic signal processor chip for radiofrequency applications // Optica, 2015. Vol. 2. № 10. P. 854–859.
4. Reck M., Zeilinger A., Bernstein H. J., Bertani P. Experimental realization of any discrete unitary operator // Physical review letters, 1994. Vol. 73. № 1. P. 58.
5. Hamerly R., Bandyopadhyay S., Englund D. Accurate self-configuration of rectangular multiport interferometers // Physical Review Applied, 2022. Vol. 18. № 2. P. 024019.
6. Barabash N. V., Sidorenko K. V., Nezhdanov A. V., Bobrov A. I. Accuracy of linear transformations performed on a nonideal Mach–Zehnder interferometer // Optics Communications, 2024. Vol. 566. P. 130686.

УДК 535.3

Моделирование волноводных делителей для снижения неравномерности потерь AWG-мультиплексора

Бабичек И. В.[1,2], **Сапегин А. А.**[1]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[2] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
babichek.iv@phystech.edu

Рассмотрена литература по известным методам компенсации неравномерности потерь выходных каналов AWG-мультиплексора. Проведен теоретический анализ метода компенсации неравномерности с помощью перераспределения энергии между соседними волноводами массива волноводов. Предложен новый вид делителя для структур с низкой контрастностью, позволяющий достигнуть неравномерности потерь менее 0,5 дБ.
Ключевые слова: мультиплексор; массив волноводов; неравномерность; фотоника; спектр.

Введение

В настоящее время активно растут требования к быстродействию электронных устройств. Причиной этого является увеличение количества устройств, подключенных к сети Интернет, и популяризация облачных технологий. Все это приводит к увеличению нагрузки на дата-центры. А с ростом дата-центров увеличивается актуальность обеспечения энергоэффективности приемо-передающих устройств [1, 2]. Оба этих требования может удовлетворить интегральная фотоника.

Обеспечить параллельную передачу сигналов внутри дата-центров с высокой скоростью позволяет технология спектрального уплотнения каналов (WDM), которая определяет каждому каналу информации свою длину волны для передачи информации внутри оптоволокна. В этой технологии важным элементом становится неблокирующий оптический переключатель — оптический роутер. Одной из реализаций этой технологии является роутер на основе массива волноводов (AWG).

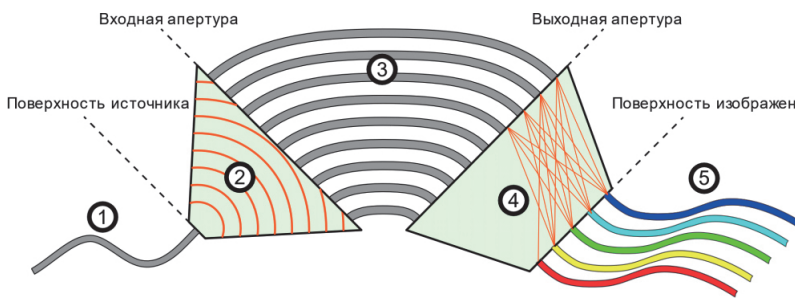


Рис. 1. Схема мультиплексора на основе массива волноводов (AWG)

Такое устройство использует всю дисперсионную область фазированной решетки волноводов, позволяя сделать N^2 соединений с использованием только N длин волн. Ввиду особенностей конструкции устройства при удалении от центрального канала происходит увеличение потерь вплоть до 3 дБ (по энергии) на крайних каналах, соответствующих границам дисперсионной области. Этот эффект называется неравномерностью потерь. Для применения AWG в качестве роутера необходимо обеспечить одинаковые потери на всех каналах.

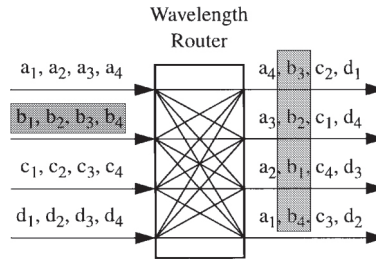


Рис. 2. Принцип действия оптического роутера. Латинскими буквами обозначены входные каналы, а индексы обозначают разные длины волн (одинаковые индексы соответствуют одинаковым длинам)

Компенсация неравномерности

Неравномерность потерь обуславливается наличием общей огибающей для пятна изображения. Чтобы более точно понять природу огибающей, необходимо ввести некоторые обозначения. Будем обозначать дальнее поле источника с профилем излучения $U(x)$ добавлением шляпки. Для расчета дальнего поля будем использовать интеграл Гюйгенса — Френеля:

$$\hat{U}(\xi,x)=\frac{1}{\sqrt{i\lambda}}\int_{-\infty}^{+\infty}U(\xi)K(\xi,x)\frac{\exp\left(ikr(\xi,x)\right)}{\sqrt{r(\xi,x)}}d\xi.$$

Используем параксиальное приближение:

$$r(\xi,x)=r_0(x)+\xi\cdot r_1(x)+O(\xi^2).$$

Так, из интеграла можно выделить преобразование Фурье:

$$\widehat{U(\xi)}\equiv\hat{U}(x)=\frac{\exp(ikr_0)}{\sqrt{i\lambda r_0}}K_0\int_{-\infty}^{+\infty}U(\xi)\exp(ikr_1\xi)d\xi=\frac{\exp(ikr_0)}{\sqrt{i\lambda r_0}}K_0\cdot\mathcal{F}(U).$$

Запишем поле изображения как сумму дальних полей волноводов массива с некоторыми весовыми коэффициентами A_j:

$$F(x)=\sum\nolimits_j A_j\widehat{M(\xi-\xi_i)}.$$

Используя свойство преобразования Фурье $f(t-a)\to e^{-i\omega a}F(w)$, получим

$$F(x)=\hat{M}(x)\cdot\sum\nolimits_j A_j e^{-ikr_1\xi_i}.$$

То есть огибающая поля изображения — это дальнее поле одного волновода массива.

Идеальный вариант — иметь огибающую в виде прямоугольной функции, которая принимает значение 0 снаружи дисперсионной области устройства. Известно, что прямоугольная функция является Фурье-образом кардинального синуса $\mathrm{sinc}\,x = \dfrac{\sin x}{x}$. Таким образом, для обеспечения желаемого вида огибающей нужно обеспечить амплитудно-фазовый профиль сигнала на выходе из каждого волновода массива в виде $\sin c\,x$.

В литературе для обеспечения такого излучения различными способами вводят связь полей в соседних волноводах массива [5, 6]. Часть энергии поля, распространяющаяся в соседних волноводах, играет роль вторичных пиков функции sinc(x).

Использование гауссова приближения мод волновода ($E_0(x) = e^{-\left(\frac{x}{w_0}\right)^2}$) позволяет записать асплитудно-фазовое распределение на выходе из волновода так:

$$E_1(x) = p_0 e^{-\left(\frac{x}{w_0}\right)^2} + p_1 e^{i\Delta\varphi}\left(e^{-\left(\frac{x-s}{w_0}\right)^2} + e^{-\left(\frac{x+s}{w_0}\right)^2}\right),$$

где $w_0 = \sqrt{\dfrac{2}{\pi}} w_e$, $w_e = w_{arr}\left(0{,}5 + \dfrac{1}{V - 0{,}6}\right)$ — эффективная ширина моды [7], w_{arr} — ширина волновода массива, $V = k w_{arr}\sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$ — V-параметр волновода массива, p_0 и p_1 — амплитудные коэффициенты излучения в центральном и боковом волноводе соответственно.

Используя свойства преобразования Фурье, дальнее поле можно записать как

$$\hat{E}_1(x) = \frac{p_0 w_0}{\sqrt{2}} e^{-\frac{x^2 w_0^2}{4}} + \frac{p_1 w_0}{\sqrt{2}} e^{i\Delta\varphi}\left(e^{-\frac{x^2 w_0^2}{4}} e^{-ixs} + e^{-\frac{x^2 w_0^2}{4}} e^{ixs}\right).$$

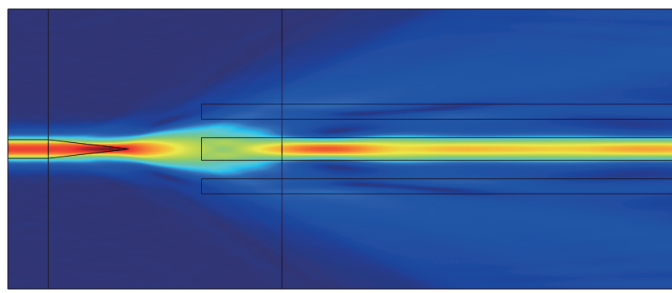


Рис. 3. Норма поля в делителе 1×3. Горизонтальное смещение входных волноводов относительно выходных изменяет соотношение между p_0 и p_1. Различная ширина волноводов позволяет контролировать разность фаз между центральным и боковыми пиками с помощью изменения длины устройства

В данной работе исследуется использование делителей внутри волноводов массива. Предлагается новый вид делителей для структур с низкой контрастностью показателей преломления в виде волноводов, заканчивающихся треугольниками (см. рис. 3). Изменяя длину треугольников в делителе и горизонтальное смещение входов относительно выходов, можно контролировать количество энергии, переходящее в боковые волноводы (множители p_0 и p_1). Боковые волноводы

имеют отличную от центральных ширину, а значит, другую постоянную распространения. Таким образом, изменение длины участка между делителем и выходной областью свободного распространения AWG определяет разность фазы Δφ между центральным и боковыми пиками сигнала. Также было проведено численное исследование зависимости характеристик огибающей от параметров перекачки и геометрических параметров AWG.

Для мультиплексора с параметрами из статьи [5] были получены две конфигурации делителя, описанные в табл. 1.

Таблица 1. Геометрические параметры полученных делителей и делителя, описанного в статье [5], а также реализуемая с их помощью неравномерность и вносимые ими потери

	Делитель 1	Делитель 2	Делитель (статья)
Показатели преломления	1,465, 1,455		
Ширина основного, центрального, бокового волновода, мкм	5, 6, 5		6, 7, 7
Длина треугольного наконечника L, мкм	50		—
Общая длина, мкм	287	228,8	~150
Горизонтальное смещение f, мкм	72,5	45	—
Неравномерность потерь, дБ	0,76	0,14	0,5–0,1
Дополнительные потери центрального пика (усредненная высота), дБ	0,9	0,96	3
Дополнительные общие потери, дБ	1,42	0,82	3
Общие потери, дБ	2,32	1,78	6

Заключение

Предложено теоретическое описание возникновения неравномерности, структура на основе особых делителей для сред с низкой контрастностью показателей преломления для компенсации неравномерности потерь в AWGR. В результате моделирования было получено значение неравномерности в 0,14 дБ при общих потерях, вносимых структурой, менее 2 дБ.

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.
2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано-и микросистемная техника, 2009. — Т. 102. — № 1. — С. 2.
3. Wang K. et al. ADON: a scalable AWG-based topology for datacenter optical network // Optical and Quantum Electronics, 2015. Vol. 47. P. 2541–2554.
4. Grani P. et al. Flat-topology high-throughput compute node with AWGR-based optical-interconnects // Journal of Lightwave Technology, 2016. Vol. 34. № 12. P. 2959–2968.

5. Chen Y. et al. Uniform-loss cyclic arrayed waveguide grating router using a mode-field converter based on a slab coupler and auxiliary waveguides // Optics Letters, 2019. Vol. 44. № 2. P. 211–214.
6. Song G. et al. Silicon-based cyclic arrayed waveguide grating routers with improved loss uniformity // Optics Communications, 2018. Vol. 427. P. 628–634.
7. Smit M. K., Van Dam C. PHASAR-based WDM-devices: Principles, design and applications // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, 1996. Vol. 2. № 2. P. 236–250.

УДК 621.389

Получение и исследование фотонно-кристаллических структур фиброина шелка на основе пленок коллоидного полистирола и кремнезема для изделий биофотоники

Медведева О. М., к. т. н., Панфилова Е. В., Ибрагимов А. Р., Мозер К. В.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
mom-bmstu@mail.ru

Представлены результаты исследования процесса получения фотонно-кристаллических структур посредством внедрения пластифицированного фиброина шелка в коллоидные пленки. Показано, что спектральные характеристики структуры зависят от параметров процесса формирования коллоидного кристалла, свойств раствора фиброина и условий пропитки.
Ключевые слова: природоподобные технологии; самоорганизация; коллоидные фотонно-кристаллические пленки; фиброин шелка; центрифугирование.

Коллоидная самоорганизация является технологичным способом получения микро- и наноразмерных структур. Коллоидные фотонные кристаллы считаются одним из наиболее перспективных классов материалов для применения в приборах оптического и микроволнового диапазонов [1]. Комбинируя свойства фотонных кристаллов и полимерных материалов, можно создать структуры, объектами применения которых будут устройства коммутативной памяти, трибоэлектрические генераторы и сенсорные элементы. Перспективы использования, например, фибриллярного фиброина шелка связаны с его биосовместимостью, биодеградацией, достаточной термостабильностью, механической прочностью, гибкостью и оптической прозрачностью [2]. В частности, применение фиброина в качестве функционального материала при получении инверсной коллоидной структуры позволяет создать фотонно-кристаллический материал, который можно использовать в гибкой электронике и фотонике медицинского назначения. Мы показали, что чувствительность сформированной таким образом сенсорной структуры достаточна для производства на ее основе умных диагностических контактных линз, осуществляющих спектральную диагностику.

В этой работе исследуется процесс формирования описываемой структуры. Для осаждения коллоидной пленки заданной толщины и плотности упаковки использовалось классическое центрифугирование в пробирках [3]. Этим способом можно производить нанесение на гибкие или шероховатые поверхности, что делает его интересным с точки зрения комбинирования с биосовместимыми материалами. Внедрение раствора фиброина с пластифицирующей добавкой глицерина осуществлялось капельным методом. В результате были получены композитные структуры, положение фотонной запрещенной зоны в которых определяется режимами получения коллоидной пленки, параметрами раствора фиброина и условиями пропитки.

Результаты работы будут использованы в технологии изготовления образцов гибких биосовместимых фотонно-кристаллических сенсорных элементов.

Литература

1. Fenglian Qi, Zihui Meng, Min Xue, Lili Qiu, Recent advances in self-assemblies and sensing applications of colloidal photonic crystals // Analytica Chimica Acta, 2020. Vol. 1123. P. 91–112.
2. Wang Y., Li M., Wang Y. Silk: a versatile biomaterial for advanced optics and photonics // Chinese Optics Letters, 2020. Vol. 18. № 8. P. 080004.
3. Ibragimov A. R. et al. Technology of Producing Photonic Crystal Colloidal Films by Centrifugation // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE, 2024. P. 1–5.

УДК 621.372.8

Разработка процессов формирования слоев SiON, SiO_2 и БФСС методом PECVD для создания волноводных структур фотонных интегральных схем

Митрофанов Я.Ю.[1,2], Светиков В. В.[1], Абросимов В. Ю.[1]
[1] АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
mitrofanov@zntc.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработаны оптимальные режимы формирования функциональных слоев волноводных структур интегрально-оптического мультиплексора SiON, SiO_2 и БФСС. Измерены геометрические и оптические параметры полученных функциональных слоев, а также исследовано влияние различного времени отжига на оптические потери и наличие водородных связей N-H.
Ключевые слова: фотоника; волноводы; PECVD; SiON; SiO_2; БФСС; FTIR.

Последние 30–40 лет объемы передачи данных постоянно растут. Оптический метод передачи данных, такой как спектральное уплотнение (CWDM и DWDM), позволяет увеличить пропускную способность телекоммуникационных сетей. Технологии кремниевой фотоники стали основой для создания волноводных структур в составе фотонных интегральных схем. К настоящему времени материалами, используемыми в данной технологии, стали SiON, SiO_2:GeO_2, Si_3N_4, SOI.

Волноводные структуры формируются путем создания трехслойной структуры (нижний кладдинг / волноводный слой / верхний кладдинг). Одним из методов формирования функциональных слоев волноводов является плазмохимическое осаждение из газовой фазы (PECVD).

Целью работы является разработка базовой технологии формирования нижнего кладдинга (SiO_2), волноводного слоя (SiON) и верхнего кладдинга (БФСС) волноводных структур интегрально-оптического мультиплексора, поиск оптимальных режимов осаждения функциональных слоев и исследование их геометрических, оптических, химических свойств. Изготовление таких устройств, как интегрально-оптические мультиплексоры, в перспективе позволило бы не только создавать рыночно конкурентные изделия, но и обеспечивать дальнейшее развитие интегрально-оптической технологии в отечественном технологическом пространстве.

В процессе экспериментов были выявлены оптимальные режимы осаждения термического SiO_2, волноводного слоя SiON и верхнего функционального слоя БФСС. Были проведены эксперименты для определения влияния различного времени отжига (3, 6 и 9 часов) на показатель преломления и толщину слоев SiON. В результате отжига наблюдалось спекание и уменьшение слоев SiON в среднем на 200 нм, тогда как показатель преломления увеличивался в среднем на 0,02. Волноводный слой исследовался методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии для определения распределения элементного состава SiON. С увеличением времени отжига уменьшалось количество водородных связей

и увеличивалось количество связей материалообразующих элементов (Si–O–N). В связи с этим увеличивалась их атомная концентрация в пленке. Для определения влияния водородных связей на оптические потери волноводного слоя SiON были проведены исследования методом ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье. Исследования показали наличие водородной связи N–H, влияние которой уменьшается с увеличением времени отжига слоев SiON.

Таким образом, выявлены оптимальные режимы, исследованы оптические, геометрические и химические свойства осажденных функциональных слоев, как следствие, разработана базовая технология формирования низкоконтрастных ($\Delta = 1{,}5$ и $2{,}7\,\%$) волноводов, которая может быть использована в серийном изготовлении отечественных пассивных фотонных интегральных схем.

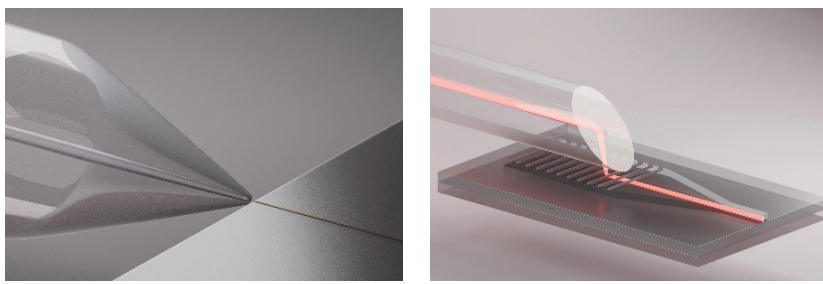
УДК 681.7.068

Волоконно-оптические элементы отечественного производства для ввода-вывода излучения при сборке фотонных интегральных схем

Паньков А. С., Пономарев Р. С., к. ф.-м. н.
Пермский государственный национальный исследовательский университет
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15
lab.photon.psu@gmail.com

Разработаны технологии формирования волоконных микролинз и оптических скошенных волокон, применяемых для торцевого и вертикального ввода излучения в чипы фотонных интегральных схем. Приводится описание процедуры паспортизации волоконно-оптических элементов ввода.
Ключевые слова: волоконная микролинза; оптический волоконный скос; фотонная интегральная схема; ввод-вывод оптического излучения.

Фотонные интегральные схемы (ФИС) представляют собой сложные устройства на плоской подложке оптического кристалла. Они предназначены для обработки оптических сигналов и используются в большинстве телекоммуникационных оптоэлектронных устройств. ФИС являются основой для биологических сенсоров и различных датчиков физических величин. При сборке ФИС возникает проблема несоответствия диаметра сердцевины оптического волокна и поперечного сечения оптического волновода, что приводит к потерям оптического сигнала. Для уменьшения потерь в месте стыковки оптического волокна и поверхности волновода используют микролинзы для торцевого ввода и сполированные под углом оптические волокна для вертикального ввода излучения [1].



а *б*

Рис. 1. Схема ввода оптического излучения в ФИС: *а*) торцевой ввод; *б*) вертикальный ввод

Технологии формирования этих волоконно-оптических элементов основываются на использовании электрической дуги сварочного аппарата и устройства для шлифовки торцов оптического волокна [2]. Специалисты лаборатории фотоники разработали инновационные технологические подходы, позволяющие создавать микролинзы и оптические скосы с фиксированными параметрами с использованием отечественных комплектующих. К параметрам, описывающим эти оптические

элементы, относятся: фокусное расстояние, диаметр поля моды, поляризация оптического излучения и угол при вершине оптического скоса. Все указанные параметры оцениваются с помощью единого комплекса, который позволяет паспортизировать небольшие партии изготавливаемых волоконно-оптических элементов или каждого элемента в отдельности.

Литература

1. Song J. H., Maltings L. Experimental investigation of laser welding assembling sequences for butterfly laser module packages // Optical Engineering, 2010. Vol. 49. P. 014301–014301-6.
2. Karnick D., Bauditsch N. Efficient, easy-to-use, planar fiber-to-chip coupling process with angle-polished fibers // IEEE 67th Electronic components and technology conference, 2017. P. 1627–1632.

УДК 535.93

Детектор терагерцевого излучения на основе графена, интегрированного на кремниевый волновод

Измайлов Р. И.[1,2], Любчак А. Н.[1,3], Шеин К. В.[1,3], Гайдученко И. А.[1,3], Гольцман Г. Н.[1,3]

[1] Московский педагогический государственный университет
119991, г. Москва, ул. М. Пироговская, 1, стр. 1
ramilizmaylov2001@gmail.com
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
[3] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11

В данной работе предложена модель детектора на основе CVD-графена, интегрированного на кремниевый волновод для работы на частоте 150 ГГц, а также были исследованы пределы чувствительности CVD-графена методом шумовой термометрии при гелиевой температуре.

Ключевые слова: интегральная фотоника; терагерцы; двумерные материалы; графен.

Перспективной платформой для обработки сигналов является интегральная фотонная схема на основе кремния. В настоящее время ТГц-диапазон электромагнитного излучения является многообещающим для создания сетей 6G нового поколения. Графен обладает рекордно низкой теплоемкостью, слабой электрон-фононной связью и высокой подвижностью, а также легко интегрируется на различные подложки. Благодаря этому его можно рассматривать в качестве платформы для создания ТГц-детекторов на волноводе.

В данной работе представлена модель кремниевого волновода на основе эффективной диэлектрической среды с интегрированным детектором на основе CVD-графена с сопротивлением 500 Ом. Для моделирования эффективной диэлектрической среды необходимо создать сквозные отверстия с периодом, меньшим длины волны, по сторонам сердечника волновода. Эти отверстия образуют треугольную решетку. В этой конфигурации волновод работает по принципу, аналогичному оптическому волокну, где свет распространяется за счет полного внутреннего отражения. Для связи излучения из металлического волновода в диэлектрический использовался кремниевый сужающийся волновод с углом раскрытия $\alpha = 10°$. Волновод представляет собой кремниевую пластину толщиной H = 400 мкм и шириной W = 585 мкм. Для повышения поглощения электромагнитного излучения, испускаемого из волновода графеном, использовалась идея сужающейся щелевой линии [1]. Этот подход уменьшает площадь графена до квадрата 2×2 мкм, что улучшает чувствительность детектора. Конструкция детектора включает асимметричные контакты, которые доказали свою эффективность в изготовлении графеновых ТГц-детекторов, используя как фотоэлектрический, так и термоэлектрический эффекты [2]. Волновод смоделирован для работы на 150 ГГц. Для данной конфигурации по результатам моделирования коэффициенты отражения и передачи равняются: S33 = −10 дБ, S31 = S32 = −4,3 дБ. Потери на входе составили 0,18 дБ.

Для оценки фундаментальных пределов чувствительности ТГц-детекторов на основе графена был использован метод шумовой термометрии. С помощью данного метода была измерена электронная температура в CVD-графене при пропускании через него тока, измерения проводились в гелиевой температуре. Были оценены электронная теплоемкость в графене G = 6,7 нВт/К и эквивалентная мощность шума, которая составила 47 пВт/Гц^{0,5}. Полученные данные могут быть использованы для изготовления реального детектора.

Литература

1. Shurakov A. S., Belikov I. I., Prikhodko A. N., Ershova M., Goltsman G. N. Superconducting Electronic–Photonic Platform for HEB-Based Terahertz Spectrometers // Applied Sciences, 2023. 13 (10). 5892.
2. Gayduchenko I. A., Moskotin M. V., Matyushkin Y. E., Rybin M. G., Obraztsova E. D., Ryzhii V. I., Goltsman G. N., Fedorov G. E. The detection of sub-terahertz radiation using graphene-layer and graphene-nanoribbon FETs with asymmetric contacts // Materials Today: Proceedings, 2018. 5(13), 27301–27306.

УДК 538.958

Управление зонной структурой и люминесцентным откликом двумерных фотонных кристаллов с нанооствровками Ge(Si)

Перетокин А. В.[1], Степихова М. В.[1], Юрасов Д. В.[1], Яблонский А. Н.[1], Шалеев М. В.[1], Дьяков С. А.[2], Родякина Е. Е.[3], Новиков А. В.[1]

[1] Институт физики микроструктур РАН
603087, Нижегородская обл., д. Афонино, ул. Академическая, 7
aperetokin@ipmras.ru
[2] Сколковский институт науки и технологий
143025, г. Москва, Большой бул., 30, стр. 1
[3] Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

Изучены методы управления зонной структурой и люминесцентным откликом фотонных кристаллов с нанооствровками Ge(Si) за счет изменения дизайна решетки фотонных кристаллов (ФК). Продемонстрировано усиление сигнала более чем на два порядка величины и наблюдение узких спектральных линий с добротностью более $3 \cdot 10^3$ при оптимальном дизайне структур.

Ключевые слова: фотонные кристаллы; SiGe-гетероструктуры; люминесценция; Si фотоника.

На сегодняшний день остается нерешенной проблема создания источников ближнего-ИК-диапазона, совместимых с кремнием. Кремниевые структуры с нанооствровками Ge(Si) являются одним из возможных решений данной задачи. Для повышения излучательной эффективности таких структур их встраивают в различные микрорезонаторы, наиболее перспективными из которых являются фотонные кристаллы [1].

В данной работе методами спектроскопии микрофотолюминесценции (микро-ФЛ) исследуется взаимодействие нанооствровков Ge(Si) с модами фотонных кристаллов с гексагональной решеткой отверстий. Все исследуемые структуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на КНИ-подложках. Основными параметрами ФК, которые можно варьировать, являются: период, радиус отверстий, глубина травления отверстий, а также полная толщина волноводного слоя.

Наибольший рост интенсивности сигнала ФЛ наблюдается при спектральном совпадении мод ФК с максимумом люминесценции нанооствровков Ge(Si), осуществлять такое совмещение позволяет варьирование периода ФК [2]. Это также можно делать, изменяя полную толщину волноводного слоя ФК, однако это более сложно технологически. Наиболее эффективным инструментом управления зонной структурой и, как следствие, люминесцентным откликом ФК является изменение глубины травления отверстий. Это позволяет формировать для определенных мод плоскую дисперсионную характеристику, что приводит к росту интенсивности сигнала более чем на два порядка величины по сравнению с областью без ФК [3]. Изменение радиуса отверстий также позволяет дополнительно подстраивать зонную структуру и люминесцентный отклик ФК, но имеет определенные технологические ограничения.

Кроме того, можно понизить симметрию ФК за счет деформации решетки или отверстий, что позволяет добиться выделения одной моды в спектральном отклике ФК, а также получить высокодобротные линии с добротностью $Q \sim 3 \cdot 10^3$ [4].

Приводимые в данной работе экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами численного моделирования исследуемых ФК, выполненного Фурье-модальным методом в формализме матрицы рассеяния [5].

Работа поддержана НЦМУ «Центр фотоники» (соглашение № 075-15-2022-316).

Литература

1. Dyakov S.A., Stepikhova M.V., Bogdanov A.A. et al. Photonic Bound States in the Continuum in Si Structures with the Self-Assembled Ge Nanoislands // Laser and Photonics Rev., 2021. Vol. 15. P. 2000242.
2. Stepikhova M.V., Dyakov S.A., Peretokin A.V. et al. Interaction of Ge(Si) Self-Assembled Nanoislands with Different Modes of Two-Dimensional Photonic Crystal // Nanomaterials, 2022. Vol. 12. P. 2687.
3. Peretokin A.V., Yurasov D.V., Stepikhova M.V. et al. Tuning the Luminescence Response of an Air-Hole Photonic Crystal Slab Using Etching Depth Variation // Nanomaterials, 2023. Vol. 15. P. 1678.
4. Yurasov D.V., Dyakov S.A., Smagin I.A. et al. Symmetry breaking of bound states in continuum in luminescence response of photonic crystal slabs with embedded Ge nanoislands // Appl. Phys. Lett. (*in print*).
5. Tikhodeev S.G., Yablonskii A.L., Muljarov E.A. Quasiguided modes and optical properties of photonic crystal slabs // Phys. Rev. B., 2002. Vol. 66. P. 045102.

УДК 535.3

Моделирование микрорезонаторов на зеркалах с брэгговскими решетками

Станкевич К. М., Бутковский О. Я.
Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87
kristina.stankevich@bk.ru

Целью работы являлось создание модели систем микрорезонаторов с брэгговскими зеркалами и наблюдение за изменениями параметров излучения при помощи имитационного моделирования. В работе представлены модели систем, созданные в Matlab. Показаны варианты изменяемых параметров выходного оптического излучения.

Ключевые слова: микрорезонаторы; брэгговские зеркала; имитационное моделирование; фотонные сигналы.

Имитационное моделирование систем с полупроводниковыми брэгговскими резонаторами позволяет наблюдать за изменением выходных фотонных сигналов в целях дальнейшего управления их параметрами. За счет микроскопических размеров резонаторов повышается точность и добротность выходного излучения с концентрацией в малом объеме — порядка микрометра [1].

Модель [2] представляет собой математическое представление процессов, происходящих в микрорезонаторе между двух брэгговских зеркал, а также имитирует части самой системы. Имея возможность изменять параметры системы, такие как значение максимума пика коэффициента обратного рассеяния от дисперсии шума и положение максимума по длине волны от интенсивности шума, становится возможным добиваться максимальной концентрации оптического излучения в минимальном объеме.

Задача связанных квантовых осцилляторов требует разработки и аналитического решения с учетом большого числа налагаемых сложностей [3]. Для этого были применены численные методы для одного микрорезонатора.

Литература

1. Björk G., Machida S., Yamamoto Y., Igeta K. Modification of spontaneous emission rate in planar dielectric microcavity structures // Physical Review. 1991. A, 44(1), 669.
2. Stankevich K. M., Butkovskiy O. Y., Kochuev D. A., Chernikov A. S. and Privodnov I. I. Investigation of the dependence of the reflection coefficient on the modulation parameters and defects of the fiber Bragg gratings // Journal of Physics: Conference Series, 2316 012003. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2316/1/012003.
3. Drummond P. D., McNeil K. J., Walls D. F. Non-equilibrium Transitions in Sub/Second Harmonic Generation // Optica Acta, 1981. Vol. 27. № 2. P. 211–225.

УДК 535.3

Новый подход к созданию активных фотонных элементов

Егоров П. А., Тимошенков А. С.
НИЛ «Волоконная и интегральная оптика»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
Solovjev@polly.phys.msu.ru

Описывается метод модуляции оптического сигнала при помощи движущегося элемента и предоставляются общие теоретические концепции проектирования MOEMS оптического модулятора.
Ключевые слова: фотоника; фазовый модулятора; МЕМС; ФИС.

Кремниевая фотоника становится предпочтительной технологией для множества новых вычислительных платформ, таких как искусственные нейронные сети, обработка микроволновых сигналов и квантовые вычисления. На данный момент существует ряд подходов к созданию активных компонентов, но не один из них не стал доминирующим, по различным причинам.

Интеграция активных и пассивных фотонных компонентов на одном кристалле, особенно в кремниевой фотонике, сопряжена с рядом проблем:

- совместимость материалов;
- управление температурой;
- оптические потери;
- сложные производственные процессы;
- электрическая изоляция и перекрестные помехи.

Предложенных подход имеет потенциал для решения основных проблем интеграции компонентов на одной подложке и в перспективе для промышленного производства на базе MEMS технологий.

Рассмотрен подход к созданию активных компонентов ФИС (фазовый модулятор) меняющие свой эффективный показатель преломления за счёт микроперемещений волноводных структур.

Литература

1. Liu S. et al. Thermo-optic phase shifters based on silicon-on-insulator platform: state-of-the-art and a review // Frontiers of Optoelectronics, 2022. Vol. 15. № 1. P. 9.
1. Liu K. et al. Review and perspective on ultrafast wavelength-size electro-optic modulators // Laser & Photonics Reviews, 2015. Vol. 9. № 2. P. 172–194.
1. Selvaraja S. K. et al. Subnanometer linewidth uniformity in silicon nanophotonic waveguide devices using CMOS fabrication technology // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009. Vol. 16. № 1. P. 316–324.
2. Сысоева С. Высокочастотные МЭМС-ключи. Технологии и применения // Компоненты и технологии, 2011. — № 11 (124). — С. 29–36.

УДК 621.3.049

Двумерные диэлектрические металинзы для создания портативных биосенсоров одиночных молекул

Барулин А. В.[1,2], Новиков С. М.[1], Чернов А. И.[1,3]
[1] Центр фотоники и двумерных материалов, Московский физико-технический институт 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] Department of Biophysics, Institute of Quantum Biophysics, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419, Republic of Korea
[3] Российский квантовый центр 121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

Ключевые слова: металинза; нанофотоника; одиночные молекулы; флуоресцентная корреляционная спектроскопия; биосенсоры.

Двумерные диэлектрические металинзы позволяют фокусировать свет с разрешением вплоть до дифракционного предела. Ввиду микрометровой толщины данная структура является компактным планарным аналогом объемных преломляющих оптических элементов. Металинзы находят свое применения в многофункциональных и компактных оптических устройствах для визуализации биологических объектов, однако детектирование одиночных молекул, являющееся ключевым элементом в молекулярной биологии и медицине, является сложной задачей. Мы представляем металинзу, созданную из нанометровых прямоугольных колонн аморфного кремния, которая имеет высокую числовую апертуру и фокусирующую способность. Данная металинза позволяет детектировать одиночные флуоресцентные молекулы Alexa647 методом флуоресцентной корреляционной спектроскопии, а также способна определять размеры флуоресцентных наночастиц с нанометровой точностью [1]. Данное оптическое устройство многократно уменьшает размер преломляющего объектива и практически не теряет эффективности сбора фотонов при тех же значениях числовой апертуры. Таким образом, данная нанофотонная платформа позволит создавать компактные и портативные флуоресцентные биосенсоры для средств медицины и диагностики на месте оказания медицинской помощи и средства для скрининга загрязнений окружающей среды.

Литература

1. Barulin A. et al. Dual-wavelength metalens enables Epi-fluorescence de-tection from single molecules // Nature Communications, 2024. 15.1: 26.

УДК 537.86

Расчет потерь одномодового режима распространения оптического излучения в микроволноводах из GaAs/AlGaAs и AlGaAs на изоляторе

Крылова О. А., Витько В. В., к. ф.-м. н., Еськов А. В., к. т. н., Никитин А. А., к. ф.-м. н., Семенов А. А., д. т. н., Устинов А. Б., д. ф.-м. н.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В. И. Ленина (Ульянова)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
oakrylovaa@yandex.ru

В работе исследованы потери оптического излучения в одномодовых микроволноводах из GaAs/AlGaAs и AlGaAs на изоляторе. Проведен расчет дисперсионных характеристик и потерь на распространение в интегральных канальных и полосковых микроволноводах различных геометрий поперечного сечения.
Ключевые слова: оптический микроволновод; арсенид галлия; AlGaAs на изоляторе; оптические потери.

В настоящее время результаты передовых исследований, направленных на создание фотонных интегральных схем (ФИС), привели к революционно новым применениям в системах квантовой телекоммуникации, квантовой обработки информации и смежных сферах [1]. Однако до сих пор остается неудовлетворенной потребность в технологической платформе, позволяющей интегрировать как активные, так и пассивные элементы ФИС. В связи с этим особое внимание уделяется GaAs и соединениям на его основе, составляющим конкуренцию таким хорошо изученным технологиям, как кремний на изоляторе и ниобат лития на изоляторе [2].

Основным элементом ФИС является прямоугольный микроволновод, работающий в одномодовом режиме. Сочетание материалов GaAs/$Al_xGa_{1-x}As$ и технологии $Al_xGa_{1-x}As$ на изоляторе позволяет реализовать достаточно высокий контраст показателей преломления [3]. При этом выбор материалов обусловлен возможностью уменьшить потери на распространение оптического излучения. Целью данной работы является расчет и сравнение оптических потерь в одномодовых прямоугольных микроволноводах из GaAs/$Al_xGa_{1-x}As$ и $Al_xGa_{1-x}As$ на изоляторе.

Рассмотрим распространение волны оптического диапазона в наиболее распространенных типах микроволноводов — канальном и полосковом. Согласно теоретической модели (см. работу [4]), рассчитаны диапазоны толщин t и ширин w, позволяющие реализовать одномодовый режим распространения волны типа E^x. Для полосковых волноводов с толщиной $t_1 = 0{,}22$ мкм из GaAs/AlGaAs — $w_1 \in [1{,}4; 2]$ мкм, из AlGaAs на изоляторе — $w_1 \in [0{,}3; 0{,}6]$ мкм. В случае канальных волноводов из GaAs/AlGaAs — $w_1 \in [0{,}55; 1{,}35]$ мкм, из AlGaAs на изоляторе — $w_1 \in [0{,}3; 0{,}65]$ мкм. Стоит отметить, что при большей толщине $t_2 = 0{,}4$ мкм волновода становится возможной реализация микроволноводов меньшей ширины (например, одномодовый режим для канального GaAs/AlGaAs достигается при $w_2 \in [0{,}22; 0{,}95]$ мкм).

Потери на распространение основной моды в рассматриваемых структурах рассчитывались с применением элементов теории возмущений [5]. По результатам

моделирования получены зависимости декремента затухания от ширины сердцевины канальных и полосковых волноводов разных толщин. Показано, что при малых ширинах как канальных, так и полосковых микроволноводов наблюдается локальный максимум декремента затухания. Это связано с локализацией поля внутри сердцевины волновода. Контраст показателей преломления определяет положение максимума: при малом контрасте (GaAs/AlGaAs-микроволноводы) максимум возникает при *w*, меньше, чем *t*. Важно отметить, что в этом случае электромагнитное поле оптического излучения значительно выходит за пределы волновода, что не позволяет ему сохранить волноведущие свойства. Увеличение толщины волноведущих структур приводит к большей локализации поля внутри сердцевины волновода. Численное моделирование зависимости декремента затухания от ширины волновода показало, что для полоскового и канального микроволноводов с увеличением ширины потери становятся одинаковыми и соответствуют 1,53 дБ/см для GaAs/AlGaAs и 1,56 дБ/см для AlGaAs на изоляторе. При этом уровень потерь в волноводах с шириной более 1,2 мкм определяется материальными параметрами сердцевины и окружающего диэлектрика, а не геометрическими размерами. За счет того что у GaAs мнимая часть диэлектрической проницаемости меньше, чем у $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$, используемого как сердцевина AlGaAsOI-микроволноводов, канальные GaAs/AlGaAs-микроволноводы позволяют реализовать одномодовый режим работы с наименьшими потерями на распространение.

Таким образом, разработанная оригинальная теоретическая модель позволяет рассчитать как дисперсионные характеристики оптического излучения, так и потери на его распространение в канальных и полосковых волноводах из GaAs/AlGaAs и AlGaAs на изоляторе.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант № ФСЕЕ-2020-0005).

Литература

1. Wang J., Sciarrino F., Laing A., Thompson M. G. Integrated photonic quantum technologies // Nature Photonics, 2019. Vol. 14. № 5. P. 273–284.
2. Baboux F., Moody G., Ducci S. Nonlinear integrated quantum photonics with AlGaAs // Optica, 2023. Vol. 10. № 7. P. 917–931.
3. Adachi S. Properties of Aluminium Gallium Arsenide. Japan: Gunma University, 1993. 233 p.
4. Витько В. В., Крылова О. А., Еськов А. В., Устинов А. Б. Исследование одномодового режима распространения оптического излучения в интегральных микроволноводах из арсенида галлия // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 2023. — С. 493–496.
5. Pozar D. M. Microwave engineering. John Wiley & sons, 2011. 754 p.

УДК 621.39

Моделирование модовых конвертеров на основе волнового и субволнового сегментированного тейпера

Крылов А. А.[1,2,3], Барабаненков М. Ю.[1], д. ф.-м. н., Светиков В. В.[3,4], к. ф.-м. н., Шамин Е. С.[1,2,3]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
example@gmail.com
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
[4] Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

Рассмотрена задача о конвертации моды между оптоволокном и полосковым волноводом ФИС на основе структур КНИ или оксинитрида кремния. Установлено, что конвертеры на основе тейпера с волновой и субволновой сегментацией имеют уровень потерь не хуже уровня потерь конвертеров со сплошным тейпером при меньшей общей длине конвертера.

Ключевые слова: конвертер; ФИС; КНИ; тейпер; сегментированный волновод.

Введение

В настоящее время доступно множество высокопроизводительных оптических компонентов в интегральном исполнении, таких как направленные ответвители, Y-образные ответвители, брэгговские решетки, кольцевые резонаторы, оптические модуляторы, устройства ввода/вывода излучения. Данные устроства функционируют как связующее звено между ФИС и оптоволокном, являясь основным каналом передачи оптических сигналов на большие расстояния. Как известно, стандартное одномодовое оптоволокно для телекоммуникационной длины волны в 1,55 мкм обычно имеет сердцевину диаметром 2–8 мкм без учета обкладок. Сечение же стандартного полоскового волновода в интегральном исполнении составляет 220×500 нм. Очевидно, что большое несоответствие размеров сечений оптоволокна и волновода существенно ограничивает эффективность их оптической связи [1].

Для решения задачи о передаче света из оптоволокна в ФИС используются модовые конвертеры. Типы этих устройств можно разделить на конвертеры с вертикальным вводом [2] и стыковочные конвертеры [3]. В обзорной части работы показано, что последние являются перспективным объектом исследований ввиду их потенциально большей эффективности и меньшей площади.

Описание работы

В этой работе методом компьютерного моделирования исследованы потери энергии моды конвертеров со сплошным тейпером и тейпером, сегментированным с периодом, большим рабочей длины волны (волновая сегментация) и меньшим

длины волны (субволновая сегментация). Общая схема расчета конвертера состоит в следующем:

1) разрабатывается топология конвертера;
2) производится расчет эволюции моды оптоволокна методом распространения пучка;
3) полученные результаты используются для построения зависимости эффективности конвертера от его топологических параметров.

В табл. 1, 2 приведены топологические параметры наиболее эффективных конвертеров и их эффективность.

Таблица 1. Сравнение наиболее эффективных моделей конвертеров на основе линейных тейперов и конвертеров на основе волновых дискретных волноводов

Параметр/тип конвертера	На основе линейного тейпера			На основе волновых дискретных волноводов		
Контраст	2,7%	1,5%	0,8%	2,7%	1,5%	0,8%
Длина конвертера, мкм	700	450	500	200	450	400
Начальная ширина конвертера, мкм	0,5	0,9	0,9	0,5	0,9	0,9
Конечная ширина конвертера, мкм	3	4	4	3	4	4
Расстояние между сегментами, мкм	–	–	–	0,9	1	1
Длина сегмента, мкм	–	–	–	4	4	4
Эффективность, дБ	0,4	0,4	0,3	0,7	0,5	0,2

Таблица 2. Сравнение наиболее эффективных моделей конвертеров на основе линейных тейперов и конвертеров на основе субволновых дискретных волноводов

Параметр/тип конвертера	На основе линейного тейпера	На основе волновых дискретных волноводов
Длина конвертера, мкм	37	11
Начальная ширина конвертера, мкм	3,7	1,2
Конечная ширина конвертера, мкм	0,4	0,4
Расстояние между сегментами, мкм	–	0,9
Длина сегмента, мкм	–	0,1
Эффективность, дБ	6,1	3,2

Заключение

В ходе моделирования установлено, что конвертеры на основе волновых и субволновых дискретных элементов являются перспективными ввиду их потенциально большей эффективности и меньшей площади, занимаемой на кристалле.

Литература

1. Papes M. et al. Fiber-chip edge coupler with large mode size for silicon photonic wire waveguides // Optics express, 2016. Vol. 24. № 5. P. 5026–5038.
2. Cheng L. et al. Grating couplers on silicon photonics: Design prin- ciples, emerging trends and practical issues // Micromachines, 2020. Vol. 11. № 7. P. 666.
3. Mu X. et al. Edge couplers in silicon photonic integrated circuits: A review // Applied Sciences, 2020. Vol. 10. № 4. P. 1538.
4. 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.

УДК 537.525

Механизмы влияния начального состава смесей $CF_4 + O_2$, $CHF_3 + O_2$ и $CF_4 + CHF_3 + O_2$ на параметры плазмы и кинетику реактивно-ионного травления кремния

Казначеева Е. М.[1], Ефремов А. М.[2]

[1] Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский просп., 7
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Проведен анализ механизмов влияния начального состава смесей $CF_4 + O_2$, $CHF_3 + O_2$ и $CF_4 + CHF_3 + O_2$ на стационарный состав плазмы и кинетику травления кремния в типичных условиях реактивно-ионного процесса. При совместном использовании методов диагностики и моделирования плазмы: а) подтверждены основные свойства плазмы чистых фторуглеродных газов, известные из предшествующих работ; б) выявлены различия кинетики плазмохимических процессов в тетра- и трифторметане в присутствии кислорода; в) изучены закономерности образования и гибели активных частиц в условиях трехкомпонентной смеси при варьировании соотношения CF_4/CHF_3. Найдено, что основной вклад в наблюдаемую скорость травления вносит химическая составляющая, при этом эффективная вероятность реакции $Si + xF = SiF_x$ зависит от начального состава смеси через изменение толщины фторуглеродной полимерной пленки и окисление поверхности.

Ключевые слова: CF_4; CHF_3; O_2; плазма; параметры; активные частицы; ионизация; диссоциация; травление; полимеризация.

Газы семейства фреонов ($C_xH_yF_z$) нашли повсеместное применение в технологии изделий микро- и наноэлектроники, а также микроэлектроники при проведении процессов реактивно-ионного травления (РИТ) кремния и его соединений [1]. Традиционным инструментом РИТ являются системы с индуктивно-связанной плазмой (ИСП), которые оснащены двумя независимыми источниками питания, обеспечивающими независимое регулирование потоков активных частиц и энергии ионной бомбардировки. Это дает возможность контролировать баланс между физической и химической составляющими скорости травления, что существенно расширяет доступный диапазон выходных характеристик РИТ (скорость травления, селективность травления по отношению к материалу маски и форме профиля травления). В то же время использование этого преимущества требует понимания взаимосвязей между условиями проведения процесса, кинетикой плазмохимических реакций, формирующих стационарные концентрации активных частиц, и механизмами их взаимодействия с обрабатываемой поверхностью. Для решения этой задачи в нашей работе была использована комбинация методов диагностики плазмы (зоднды Лангмюра, оптическая эмиссионная спектроскопия) и моделирования кинетики плазмохимических процессов.

При исследовании бинарных смесей $CF_4 + O_2$, $CHF_3 + O_2$ были подтверждены известные из предшествующих работ особенности состава плазмы в отсутствие кислорода (в частности, доминирование молекул HF в газовой фазе в плазме

трифторметана), а также выявлены механизмы влияния кислорода на стационарные концентрации нейтральных частиц через кинетику процессов при электронном ударе и атомно-молекулярных реакций. В частности, было обнаружено, что добавка кислорода: а) приводит к заметным изменениям параметров электронной и ионной компонент плазмы (средней энергии и концентрации электронов, плотности потока ионов), б) обеспечивает эффективную конверсию фторуглеродных радикалов CHF_x и CF_x в соединения вида CF_xO, FO и CO_x; в) сопровождается ростом концентрации атомов фтора вплоть до 50% O_2 в смеси. В плазме $CHF_3 + O_2$ последний эффект противоречит изменению суммарной скорости генерации атомов, но обусловлен снижением частоты их гибели в газофазных реакциях семейства $CHF_x + F \rightarrow CF_x + HF$. При исследовании трехкомпонентной смеси $CF_4 + CHF_3 + O_2$ было обнаружено, что замена CF_4 на CHF_3 при фиксированном содержании кислорода в исходном газе: а) вызывает относительно слабые изменения температуры электронов и плотности плазмы; б) приводит к увеличению ее полимеризационной способности; в) значительно (более чем в три раза) снижает концентрацию атомов F. Последний эффект был подтвержден удовлетворительным согласием с экспериментальными данными, полученными с использованием метода оптической эмиссионной актинометрии.

В экспериментах по травлению было найдено, что скорость травления кремния немонотонно (с максимумом) зависит от содержания кислорода в бинарных смесях, но снижается с ростом содержания CHF_3 в трехкомпонентной смеси. Анализ кинетики травления позволил заключить, что: а) доминирующим механизмом травления является ионно-стимулированная химическая реакция; б) эффективная вероятность этой реакции зависит от начального состава смеси через изменение толщины фторуглеродной полимерной пленки и окисление поверхности.

Литература

1. Nojiri K. Dry etching technology for semiconductors. Springer International Publishing. Tokyo, 2015. 116 p.

УДК 004.896

Модель плазмохимического травления Si в среде SF_6/O_2 с использованием графовых нейронных сетей

Кузьмин В. О.[1,2], Седунов С. М.[1]
[1] ПАО «Сбербанк»
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А

Разработана нейросетевая модель плазмохимического травления Si в среде SF_6/O_2. Произведено сравнение работы физического симулятора и графовой нейронной сети. Предложены методы по улучшению нейронной сети.
Ключевые слова: нейронная сеть; граф; плазмохимическое травление.

Плазмохимическое травление (ПХТ) играет важную роль в процессе производства интегральных схем (ИС), и на сегодняшний день разработано множество методов физического моделирования. Моделирование процесса позволяет проводить виртуальные эксперименты, при помощи которых можно как существенно ускорить разработку новых рецептов, так и оптимизировать существующие в целях повышения выхода годных. Подбор и оптимизация рецептов ставят повышенные требования к точности и скорости работы симулятора.

В последние годы проявляется все больший интерес к повышению эффективности и замене традиционных решателей на обучаемые модели. В качестве моделей используются графовые нейронные сети, так как они позволяют работать с нерегулярными сетками, что является крайне важным фактором при работе с деформируемыми объектами. Так, например, большим прорывом в области физического моделирования с использованием нейронных сетей стало создание MeshGraphNet [1]. Применение искусственного интеллекта потенциально предлагает многообещающее комплексное решение для ускорения и увеличения качества моделирования процесса ПХТ.

Авторы считают, что в данной работе новым является применение нейронных сетей в области плазмохимического травления.

В работе используется улучшенная версия MeshGraphNet — BSMS [2]. В BSMS добавлено использование двупольных графов для ускорения и улучшения работы нейронной сети.

В качестве моделируемого процесса было выбрано плазмохимическое травление SF_6/O_2. Для физического моделирования использовался открытый код симулятора ViennaPS, в котором реализован процесс травления [3]. Для обучения нейронной сети использовались синтетические данные, сгенерированные симулятором ViennaPS. В результате к задаче симуляции плазмохимического травления была применена графовая нейронная сеть.

Литература

1. Pfaff T. et al. Learning mesh-based simulation with graph networks // arXiv preprint arXiv:2010.03409. 2020.

2. Cao Y. et al. Efficient learning of mesh-based physical simulation with bi-stride multi-scale graph neural network // International Conference on Machine Learning. PMLR, 2023. P. 3541–3558.
3. Bobinac J. et al. Effect of mask geometry variation on plasma etching profiles // Micromachines, 2023. Vol. 14. № 3. P. 665.

УДК 537.525

Параметры плазмы, концентрации активных частиц и закономерности реактивно-ионных процессов в смесях фторуглеродных газов с аргоном и гелием

Малинина К. А.[1], Ефремов А. М.[2]

[1] Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский просп., 7
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Проведено исследование параметров плазмы и кинетики гетерогенных процессов, протекающих при травлении кремния и его соединений, смесях CF_4, CHF_3 и C_4F_8 с аргоном и гелием в условиях индукционного ВЧ-разряда (13,56 МГц). Установлено, что замещение аргона на гелий при постоянном содержании фторуглеродного компонента: а) оказывает влияние на кинетику образования активных частиц через изменение средней энергии и концентрации электронов; б) приводит к уменьшению скорости травления, вызванному падением концентрации атомов фтора из-за аналогичного изменения скоростей их образования. Сделаны предположения о механизмах влияния состава плазмообразующей смеси на эффективную вероятность взаимодействия атомов фтора с поверхностью исследованных материалов.

Ключевые слова: плазма; тетрафторметан; аргон; гелий; полимерная пленка; травление; моделирование; кинетика.

Фторуглеродные газы вида $C_xH_yF_z$ используются в технологии микро- и наноэлектроники при проведении размерного травления кремния и его соединений [1]. Выходные характеристики таких процессов (скорость, селективность, анизотропия) в значительной степени зависят от соотношения z/x, определяющего полимеризационную способность плазмы. Для регулирования полимеризационной способности фторуглеродный газ часто комбинируют с химически инертным газом-носителем — азотом, аргоном или гелием.

В предшествующих работах было показано, что разбавление фторуглеродного газа аргоном влияет на кинетику активных частиц плазмы через изменение эффективности процессов под действием электронного удара. В результате имеют место нелинейные зависимости концентраций атомов фтора и полимеробразующих радикалов от начального состава смеси. К сожалению, аналогичные исследования смесей фторуглеродных газов с гелием отсутствуют, что затрудняет выбор оптимального газа-носителя для целей конкретного процесса. Целью данной работы являлось сравнение электрофизических параметров, состава, полимеризационной способности и химической активности плазмы смесей CF_4 + Ar + He, CHF_3 + Ar + He и C_4F_8 + Ar + He при замещении аргона на гелий.

Эксперименты проводились в реакторе индукционного типа при возбуждении ВЧ-разряда (13,56 МГц). Объектами исследования являлись смеси CF_4, CHF_3 или C_4F_8 с аргоном и гелием, при этом в качестве переменного параметра выступало соотношение Ar/He. Зондовая диагностика обеспечивала данные по температуре электронов и плотности ионного тока. Для получения данных по составу плазмы

использовалась 0-мерная модель. Верификация модели проводилась по согласию расчетных концентраций атомов фтора с результатами измерения данной величины методом оптической актинометрии с использованием аналитической пары F (703,8 нм) / Ar (750,4 нм).

Показано, что замещение Ar на He приводит к снижению температуры и концентрации электронов, что обуславливает аналогичное изменение скоростей диссоциации многоатомных частиц. В результате имеет место значительное (до порядка величины) уменьшение концентрации атомов фтора, при этом в смесях на основе C_4F_8 и CHF_3 наблюдается заметный рост полимеризационной способности плазмы. Установлено, что при любом фиксированном составе смеси концентрация атомов F снижается в ряду $CF_4 - C_4F_8 - CHF_3$. Причиной этого является эффективная гибель атомов в объемных процессах вида $F + C_2F_4 \rightarrow CF_2 + CF_3$ и $F + CHF_x \rightarrow CF_x + HF$.

Установлено, что увеличение содержания гелия в смеси приводит к снижению скоростей травления Si и SiO_2, которое полностью обеспечивается аналогичным поведением скорости гетерогенной химической реакции. Эффективная вероятность этой реакции (отношение скорости к плотности потока атомов фтора) зависит от соотношения Ar/He через изменение баланса процессов осаждения и деструкции фторуглеродной полимерной пленки на обрабатываемой поверхности, определяющих ее толщину.

Литература

1. Wolf S., Tauber R. N. Silicon Processing for the VLSI Era. Vol. 1. Process Technology, New York: Lattice Press, 2000.

УДК 533.922, 533.924, 533.932

Исследование параметров плазмы и кинетики реактивно-ионного травления поликремния в смеси Cl_2/Ar

Оксаниченко Ф. 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, 6/1

Предложена модель процесса плазменного травления поликремния в смеси Cl_2/Ar. Модель обеспечивает взаимосвязанное описание физико-химических свойств плазмы и кинетики процессов на поверхности, таких как физическое распыление, спонтанная химическая реакция, ионно-стимулированная химическая реакция и переосаждение продуктов. Входными параметрами модели являются давление, мощность источника возбуждения плазмы, состав смеси и время травления. В результате расчета определяются параметры плазмы как источника активных частиц, а также выходные характеристики процесса травления: скорость, селективность, анизотропия и форма профиля.

Ключевые слова: индуктивно-связанная плазма; плазмохимическое травление; моделирование плазмы и плазменных процессов.

Одним из ключевых процессов микроэлектронной промышленности является травление, используемое в таких операциях, как очистка и структурирование поверхности различных функциональных слоев [1]. Существует два принципиальных вида травления: жидкостное и «сухое». Исторически первыми были разработаны и внедрены в технологию жидкостные методы, активная среда которых представляет водные растворы неорганических кислот или щелочей. Увеличение степени интеграции и уменьшение линейных размеров элементов интегральных микросхем (ИМС) привело к тому, что жидкостные методы перестали удовлетворять необходимым требованиям по равномерности, анизотропии и селективности процесса. Поэтому в настоящее время доминирующими являются плазменные методы травления, в которых образование химически активных частиц происходит в газовой фазе под действием электрического разряда. Одной из областей их применения является формирование поликремниевого затвора МДП-транзистора в хлорсодержащей плазме, в частности в смеси Cl_2/Ar. Так как данный элемент обладает минимальными физическими размерами на кристалле ИМС, именно требования данной операции задают общие требования к выходным характеристикам травления.

Особенностью плазменного травления является большое количество управляющих параметров, определяющих конечный результат процесса: давление, скорость потока газа, состава плазмообразующей смеси, вкладываемая мощность, величина потенциала подложки и др. Поэтому определение оптимального режима травления представляет собой сложную задачу, решение которой только экспериментальными методами является неэффективным, а иногда и невозможным. Поэтому актуальной задачей является разработка комплексных моделей травления, позволяющих предсказывать его результат в режиме численного эксперимента.

Целью нашей работы являлось создание такой модели для процесса травления поликристаллического кремния в смеси Cl_2/Ar.

В ходе выполнения работы была предложена комплексная модель, обеспечивающая взаимосвязанное описание физико-химических свойств плазмы и кинетики процессов на поверхности. Для описания плазмы как источника активных частиц использовалась 0-мерная модель, основанная на уравнениях баланса вкладываемой мощности, химической кинетики и квазинейтральности плазмы [2]. При записи уравнений химической кинетики учитывали три вида нейтральных частиц (Cl, Cl_2, Ar) и четыре вида ионов (Cl^+, Cl_2^+, Ar^+, Cl^-). Для описания процессов взаимодействия плазмы с поверхностью использовалась модель клеточного автомата [3]. В качестве процессов взаимодействия с поверхностью учитывались спонтанное и ионностимулированное травление, физическое распыление и переосаждение продуктов реакции [3].

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2002. — С. 413–413.
2. Hsu C. C. et al. Comparison of model and experiment for Ar, Ar/O_2 and Ar/O_2/Cl_2 inductively coupled plasmas // Journal of Physics D: Applied Physics, 2006. Vol. 39. № 15. P. 3272.
3. Mahorowala A. P., Sawin H. H. Etching of polysilicon in inductively coupled Cl_2 and HBr discharges. II. Simulation of profile evolution using cellular representation of feature composition and Monte Carlo computation of flux and surface kinetics // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement and Phenomena, 2002. Vol. 20. № 3. P. 1064–1076.

УДК 533.9.03

Влияние геометрии реактора на однородность осаждения алмаза методом плазмохимического осаждения из газовой фазы на частоте 2,45 ГГц

Хозин Р. Р., Лещев Д. В., Горбачев Ю. Е.
ООО «Софт-Импакт»
194044, г. Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский просп., 64, лит. Е
rostislav.khozin@softimpact.ru

Работа посвящена анализу влияния высоты держателя HPHT-подложки на радиальный профиль осаждения алмаза методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. Рассмотрены режимы работы реактора на частоте 2,45 ГГц в диапазоне мощностей 2–5 кВт, давлений 100–200 Торр в смеси 5 % CH_4/H_2.
Ключевые слова: плазма; электрическое поле; рост; алмаз.

Плазмохимическое осаждение из газовой фазы в смеси CH_4/H_2 является одним из перспективных методов получения алмазных покрытий для широкого спектра приложений. Установки плазмохимического осаждения спроектированы таким образом, чтобы энергия электромагнитной волны была локализована вблизи подложки, что позволяет обеспечить существование плотной СВЧ-плазмы. Локализация плазмы приводит к нагреву газа в камере реактора до 2500 °C и образованию над подложкой химически активных радикалов CH_3 и H, ответственных за рост алмазных покрытий. Однородность распределения потока частиц на подложку и, следовательно, скорости роста покрытий определяются пространственным распределением температуры газа, которая в свою очередь зависит от давления газа, поглощенной мощности в плазме и геометрических параметров реактора.

Данная работа посвящена исследованию влияния условий роста и геометрии реактора на однородность осаждения алмазных покрытий на подложках с диаметром 25 мм. В качестве метода исследований использовалось численное моделирование процесса плазмохимического осаждения, результаты которого были верифицированы при сравнении с экспериментальными данными [1]. На рис. 1 демонстрируется, как изменение геометрии реактора, а именно высоты молибденового держателя подложки, влияет на распределения электрического поля и концентрации плазмы при давлении в 120 Торр и мощности 5 кВт. Увеличение высоты держателя с 2,5 до 15 мм приводит к снижению пиковых значений модуля вектора напряженности электрического поля в центре подложки и его увеличению вблизи краев подложки. Так как ионизация экспоненциально зависит от величины электрического поля, то смещение пика электрического поля к краям подложки приводит к локализации скорости ионизации смеси газов и, следовательно, локальному повышению концентрации плазмы (рис. 1*е*). Таким образом, с увеличением высоты держателя пик плазмы смещается из центра на край подложки, что приводит к перераспределению джоулева тепловыделения в объеме реактора, а именно к убыванию тепловыделения в центральной области реактора.

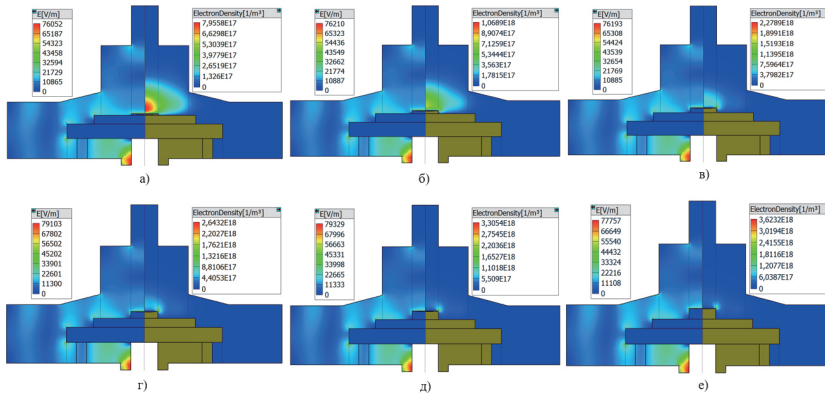


Рис. 1. Левая половина изображения — скалярное поле модуля вектора напряженности электрического поля, правая половина — поле концентрации плазмы в камере реактора (слева направо: *а*) 2,5, *б*) 5, *в*) 7,5, *г*) 10, *д*) 12,5, *е*) 15 мм)

Перераспределение концентрации плазмы и снижение температуры газа приводят к снижению скорости диссоциации молекул водорода и метана и, следовательно, снижению пиковых значений мольной доли H и CH_3 над подложкой и перераспределению их в объеме реактора. На рис. 2 видно, что с увеличением высоты держателя мольная доля CH_3 снижается, формируется два пика — над подложкой и на периферии у боковых стенок реактора.

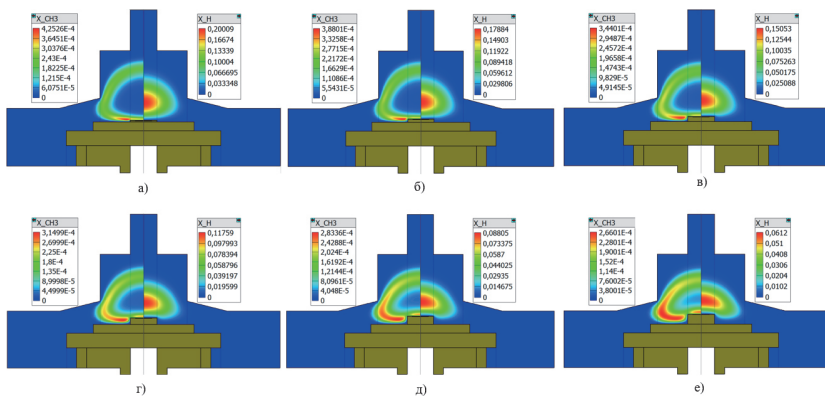


Рис. 2. Левая половина изображения — распределение мольной доли CH_3, правая половина — распределение мольной доли H в камере реактора (слева направо: *а*) 2,5; *б*) 5; *в*) 7,5; *г*) 10; *д*) 12,5; *е*) 15 мм)

Перераспределение мольной доли радикалов в реакторе приводит к общему снижению скорости роста алмазного покрытия, смещению пика скорости роста из центра подложки на периферию, причем данный тренд от изменения высоты

держателя сохраняется для диапазона давлений 100–200 Торр и мощности 2–5 кВт (рис. 3).

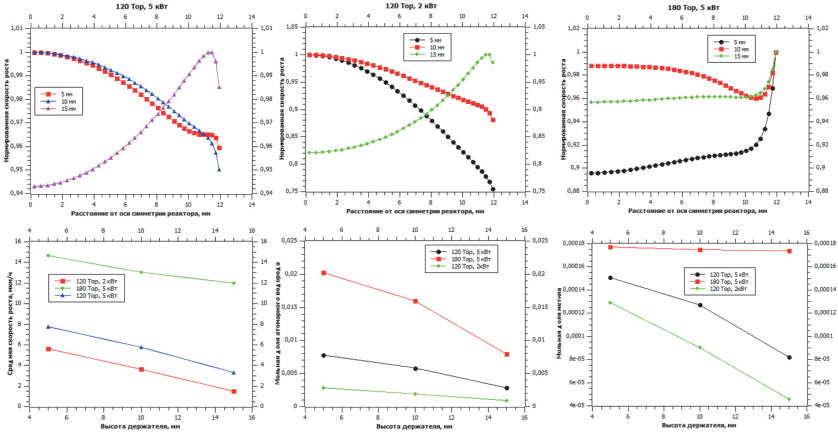


Рис. 3. Радиальные профили скорости роста алмаза, средние скорости роста покрытия, мольные H и CH_3 у подложки для разных условий проведения эксперимента (слева направо)

Согласованное изменение высоты держателя, давления и мощности позволяет менять распределение ключевых радикалов над подложкой, что отражается на радиальном профиле и скорости роста алмазного покрытия. В частности, повышение давления до 180 Торр и мощности до 5 кВт при увеличении высоты держателя до 10 и 15 мм позволяет получить более однородный радиальный профиль роста с небольшим краевым эффектом на масштабе 1 мм от края подложки. При этом скорость роста покрытия увеличивается в два раза, что качественно согласуется с литературными данными о ростовых режимах с повышенным давлением и мощностью [2].

Автор считает, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: на основе анализа режимов работы реактора на частоте 2,45 ГГц показано влияние мощности, вложенной в СВЧ-плазму, давления газа в смеси 5% CH_4/H_2 и высоты держателя HPHT-подложки на скорость и однородность роста алмазных покрытий. Определены оптимальные режимы роста и дизайн держателя, при которых наблюдается увеличение скорости роста в два раза при сопоставимой неоднородности по площади подложки.

Литература

1. Cuenca J. A. et al. Microwave plasma modelling in clamshell chemical vapour deposition diamond reactors // Diamond and Related Materials, 2022. Vol. 101. P. 108917.
2. Bolshakov A. P. et al. Single crystal diamond growth by MPCVD at subatmospheric pressures // Diamond and Related Materials, 2020. Vol. 101. P. 101635.

УДК 538.915

Исследование влияния кислородных вакансий на зонную структуру тонких пленок титаната бария с использованием методов теории функционала плотности

Левичев М. В., Андреева Н. В.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
mvlevichev@etu.ru

Проведен расчет структуры тетрагональной фазы титаната бария с кислородной вакансией в рамках теории функционала плотности. Исследовано влияние дефектов на электрофизические характеристики структуры. Произведена оценка вклада кислородных вакансий в подвижность носителей в структуре титаната бария.

Ключевые слова: мемристор; титанат бария; теория функционала плотности; тонкие пленки.

Для увеличения вычислительного ресурса и снижения энергопотребления современных компьютеров можно использовать вычисления в памяти. Для успешной реализации этого подхода необходима новая электронная компонентная база — мемристор [1], который позволяет одновременно хранить данные и производить операции над ними.

Тонкие пленки титаната бария при определенных условиях демонстрируют явление резистивного переключения, аналогичное мемристивным эффектам в оксидной резистивной памяти (ReRAM). За проявление этих свойств в значительной степени отвечают кислородные вакансии, поверхностные эффекты, а также сегнетоэлектрическая поляризация. Так как экспериментальное определение концентрации вакансий в структуре затруднительно, для оценки их вклада в мемристивные эффекты можно использовать моделирование на основе первопринципных методов. К таким методам относится теория функционала плотности [2], суть которой состоит в описании свойств структуры на основе ее пространственного распределения электрического заряда.

В работе представлены результаты исследования влияния кислородных вакансий в различных положениях в кристаллической ячейке на зонную структуру и величину поляризации тетрагональной фазы титаната бария с использованием методов теории функционала плотности. Показано, что кислородная вакансия отвечает за формирование *n*-типа проводимости, а также значительное уменьшение величины сегнетоэлектрической поляризации в структуре титаната бария. В целях анализа механизмов транспорта носителей проведена оценка вклада кислородных вакансий в подвижность электронов в структуре тетрагональной фазы титаната бария.

Литература

1. Strukov D. B. et al. The missing memristor found // Nature, 2008. Vol. 453. № 7191. P. 80–83.
2. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas // Physical review, 1964. Vol. 136. № 3B. P. B864.

УДК 519.6

Использование уравнения Ландау — Лифшица для моделирования структур с магниторезистивными свойствами

Щербаков В. С., Абгарян К. К., д. ф.-м. н., Ревизников Д. Л., д. ф.-м. н.
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2
basil-scherbakov@ya.ru

Доклад посвящен вопросам, связанным с применением уравнения Ландау — Лифшица для моделирования структур с магниторезистивными свойствами.

Ключевые слова: магнетизм; моделирование; спинтроника; магнитосопротивление; уравнение Ландау — Лифшица.

Уравнение Ландау — Лифшица является фундаментальным уравнением в физике, используемым для описания поведения магнитных материалов [1, 2]. Это уравнение описывает эволюцию магнитного момента во времени. Особый интерес данное уравнение представляет в связи с развитием энергонезависимых устройств хранения данных, к которым относится и MRAM — магниторезистивная память с произвольным доступом [3]. Принцип работы таких устройств основан на туннельном магнитосопротивлении — электрическом сопротивлении, возникающем на стыке двух ферромагнетиков, между которыми находится тонкий слой изолятора (диэлектрика). Поток электронов течет из одного ферромагнетика (закрепленного слоя) в антипараллельно ориентированный ферромагнетик (свободный слой), у которого при превышении указанного порога скачкообразно меняется намагниченность с возникновением параллельной конфигурации [3].

В контексте моделирования структур с магниторезистивными свойствами уравнение Ландау — Лифшица используется для предсказания поведения магнитных моментов в материалах, используемых в магниторезистивных устройствах. Различные вариации уравнения учитывают различные эффекты, такие как анизотропия, обменное взаимодействие и взаимодействие с электрическим полем [4]. Оно может быть использовано для моделирования процессов переключения магнитного состояния в магниторезистивной памяти.

В данной работе рассматриваются детали численного решения уравнения. Для решения использовался метод Рунге — Кутты четвертого порядка. Рассмотрено влияние различных факторов на изменение вектора намагниченности. Приведен анализ изменения вектора намагниченности при варьировании временного шага, консервативного и диссипативного слагаемых под воздействием внешнего поля и поля анизотропии.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-91-01012).

Литература

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. К теории магнитной проницаемости ферромагнитных тел // Л. Д. Ландау. Собрание трудов (в двух томах). — М.: Наука, 1972. — Т. I. — С. 128.

2. Apalkov D., Dieny B., Slaughter J. M. Magnetoresistive random access memory // Proceedings of the IEEE, 2016. Vol. 104. № 10. P. 1796–1830.
3. Степанов П. А. Моделирование энергонезависимой ячейки магнитной памяти // Научный журнал, 2016. — № 7 (8). — С. 6–9.
4. Garcia-Redondo F., Pranay Prabhat, Mudit Bhargava, Cyrille Dray. A Compact Model for Scalable MTJ Simulation // IEEE International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design, SMACD 2021.

УДК 621.382.323

Математическая модель для прогнозирования электрофизических характеристик GaAs HEMT на основе метода Монте-Карло

Карпов С. Н.
АО «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А. И. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
serge95a@mail.ru

Разработана математическая модель на основе метода Монте-Карло для описания транспорта электронов в GaAs HEMT. Проведена апробация модели, получено хорошее согласие с литературными данными. Проведено моделирование GaAs DpHEMT, обнаружены колебания тока стока, обусловленные эффектом Ганна, при напряжениях затвор-исток от 0,2 В и сток-исток от 1,2 В.
Ключевые слова: GaAs HEMT; метод Монте-Карло; статические электрофизические характеристики; метод частиц.

Введение

В настоящее время при разработке HEMT большое внимание уделяется математическому моделированию. В ходе моделирования могут быть обнаружены новые физические эффекты, которые могут оказать значительное влияние на характеристики приборов. Наиболее точными для моделирования транзисторов являются модели на основе метода Монте-Карло, однако в открытом доступе таких моделей нет, поэтому разработка собственной математической модели представляет большой интерес.

Математическая модель

В основе модели лежит метод частиц, описанный в [1]. Алгоритм модели содержит следующие шаги:

1) раздача заряда в узлы сетки;
2) решение уравнения Пуассона и вычисление электрического поля;
3) движение частиц во внешнем поле в течение временного шага;
4) возврат к шагу 1.

Моделируемая область транзистора представлена на рис. 1.

Модели частицы представляют собой заряженные стержни с линейной плотностью заряда:

$$d\rho = \frac{q}{N}\iint N_d(x, y)dxdy,$$

где q — элементарный заряд; $N_d(x, y)$ — профиль легирования; N — количество частиц, используемых при моделировании.

Вычисление плотности заряда проводится по CIC-схеме:

$$\rho(x, y) = \frac{d\rho}{\Delta x \Delta y}\sum_{p=1}^{N} P\left(\frac{x - x_p}{\Delta x}\right) P\left(\frac{y - y_p}{\Delta y}\right),$$

где $P(z) = \begin{cases} 1 - |z|, |z| \le 1 \\ 0, |z| > 1 \end{cases}$; Δx, Δy — шаг сетки по оси X и Y; (x_p, y_p) — координаты частицы.

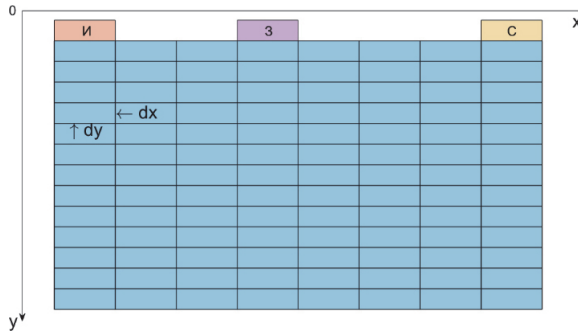


Рис. 1. Моделируемая область транзистора

Уравнение Пуассона решалось методом конечных разностей с помощью пятиточечной аппроксимации. В электродных узлах задавались граничные условия 1-го рода, на всех остальных границах — условия 2-го рода. В области электродов истока и стока поддерживалась постоянная концентрация электронов, имитирующая омический контакт. Для вычисления напряженности электрического поля использовалась двухточечная аппроксимация.

Движение частиц во внешнем поле представляет собой попеременные свободные пролеты и рассеяние на одном из центров рассеяния. Зонная структура материала описывалась в трехдолинном приближении непараболичных зон. Свободный пролет описывался схемой с перешагиванием:

$$r^{i+1} = r^i + \frac{V_r^{i+1} + V_r^i}{2} t,$$

$$V_r^i = \frac{\hbar k_r^i}{m(1 + 2\alpha W)},$$

$$k_r^{i+1} = k^i - \frac{qE_r t}{\hbar},$$

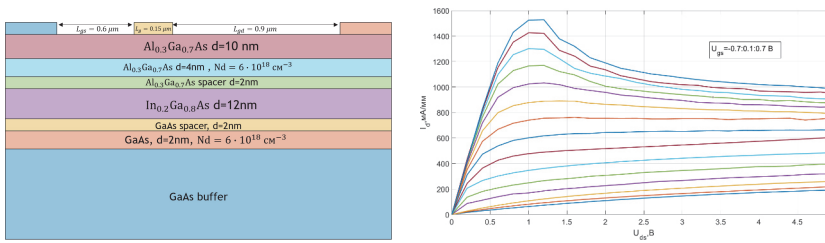
где r^i — координата x или y; V_r^i — скорость по оси r; α — коэффициент непараболичности; W — энергия; k_r^i — волновой вектор; t — время свободного пролета; E_r — напряженность электрического поля.

Интеграл столкновений рассматривался в приближении времен релаксации. Учитывалось рассеяние на акустических, полярных оптических и междолинных фононах, рассеяние на ионизированных примесях, а также рассеяние на несогласованностях решетки для тройных соединений. Алгоритм выбора времени пролета и рассеяния описан в [2].

Апробация модели

Для проверки адекватности модели было проведено моделирование транзисторов с конструкциями, взятыми из литературы [3]. Получено хорошее согласие результатов моделирования.

Проведено моделирование характеристик GaAs HEMT с конструкцией, представленной на рис. 2*а*. Было получено семейство ВАХ (рис. 2*б*), на которых видны участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Модель позволяет исследовать зависимость I(t). Анализ показал, что для рабочих точек в области ОДС наблюдаются колебания тока стока. Зависимость I(t) при $U_{gs} = 0{,}7$ В, $U_{ds} = 3$ В представлена на рис. 3. Анализ литературы показал, что наблюдаемые колебания связаны с эффектом Ганна.



а *б*

Рис. 2. GaAs HEMT: *а*) структура транзистора; *б*) семейство ВАХ GaAs HEMT

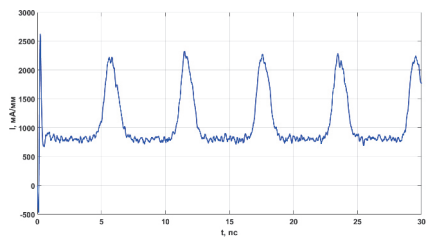


Рис. 3. Зависимость I(t) при $U_{gs} = 0{,}7$ В, $U_{ds} = 3$ В

Заключение

Разработана математическая модель для прогнозирования характеристик GaAs HEMT. Результаты моделирования находятся в хорошем согласии с литературными данными. Показано, что модель может быть использована для наблюдения различных физических эффектов, протекающих внутри транзисторов, и дальнейшей оптимизации их характеристик.

Литература

1. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц: Пер. с англ. — М.: Мир, 1987. — 640 с.
2. Goodnick S., Valeska D. Computational Electronics: Morgan & Claypool Publishers, 2006. 208 p.
3. Yoshida J., Kurata M. Analysis of high electron mobility transistors based on a two-dimensional numerical model // IEEE electron device letters, 1984. Vol. 5. № 12. P. 508–510.

УДК 621.382.323

Особенности моделирования HEMT-транзистора на основе гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN со спейсерным слоем AlN

Неволина Т. Н., Рыжук Р. В., к. т. н., Цунваза Д., Гусев А. С., к. ф.-м. н., Каргин Н. И., д. т. н., Захарченко Р. В., к. т. н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
t_nevolina@inbox.ru

Исследованы особенности TCAD-моделирования гетероэпитаксиальных HEMT-структур на основе AIIIN. Указаны особенности описания ультратонкого слоя AlN в структуре, а также его влияние на электрофизические характеристики транзистора. Рассмотрено влияние полевой пластины на величину напряжения пробоя.

Ключевые слова: HEMT; TCAD; напряжение пробоя; полевая пластина; ультратонкий AlN.

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктур AlGaN/GaN перспективны в качестве элементной базы для применения в СВЧ и силовой электронике благодаря особым свойствам нитридов III группы (широкая запрещенная зона, высокое поле пробоя). При создании электронных устройств необходимо учитывать ряд важных факторов, влияющих на характеристики устройства. Для силовых транзисторов увеличение напряжения пробоя является одной из ключевых задач при их разработке, поэтому необходимо изучение механизмов пробоя и нахождение оптимальных решений в проектировании для повышения надежности и эффективности устройства [1].

Важным этапом в процессе проектирования является моделирование, которое позволяет точно предсказать электрофизические характеристики транзисторов до их фактического изготовления. Создание таких моделей позволяет разработчикам прогнозировать поведение устройства в различных условиях, оптимизировать их параметры и повышать производительность конечных устройств.

В среде Silvaco Atlas была смоделирована структура HEMT-транзистора, включающая пассивирующий слой SiO_2, cap-слой GaN, барьерный слой AlGaN, спейсерный слой AlN 1 нм, буферный слой GaN и зародышевый слой AlN. Для расчета структуры транзистора были использованы модели Шокли — Рида — Холла и Оже-рекомбинации. Для описания распределения частиц по состояниям энергии использовалась статистика Ферми — Дирака. Для подвижности была выбрана модель FLDMOB (учитывает зависимость от поля) и модель ALBRCT. Особое внимание было уделено заданию спейсерного AlN и учету поляризационных эффектов, характерных для AlGaN/GaN. Поляризация (спонтанная и пьезоэлектрическая) в материалах учитывается посредством задания заряда на границе слоев. Данный способ является предпочтительным перед использованием модуля polarization в Silvaco Atlas, позволяя корректно описать 2DEG в канале транзистора и исключить проблемы со сходимостью при расчетах.

Слой AlN между AlGaN и GaN вводится для уменьшения рассеяния носителей на гетерогранице, при этом сохраняется высокая концентрация 2DEG в канале. Для анализа влияния толщины слоя AlN на 2DEG в канале были построены

энергетические зонные диаграммы для различных значений толщин. Оптимальная толщина слоя AlN составляла 1 нм, что соответствует литературным данным [2].

Для увеличения напряжения пробоя в модель была добавлена полевая пластина (электрод над затвором для управления распределением электрического поля) из-за относительной простоты интеграции в существующие производственные процессы и гибкости в проектировании [3]. Было исследовано влияние длины пластины на ток стока и напряжение пробоя. Показано, что имеется пиковое значение длины полевой пластины, при котором напряжение пробоя максимально. Дальнейшее увеличение длины пластины приводит к росту емкости затвора, что снижает характеристики транзистора.

В работе исследованы особенности TCAD-моделирования гетероэпитаксиальных HEMT-структур на основе AlGaN/GaN, учитывая особенности задания ультратонкого слоя AlN и поляризационных эффектов. Показано, что использование слоя AlN 1 нм на границе AlGaN/GaN позволяет снизить рассеяние носителей. Применение полевой пластины приводит к увеличению значения напряжения пробоя, при этом существует оптимальная длина пластины, при которой напряжение пробоя максимально. Полученная модель может быть использована при разработке силовых транзисторов на основе нитридов III группы.

Работа выполнена в рамках проекта № FSWU-2023-0088.

Литература

1. Research Progress in Breakdown Enhancement for GaN-Based High-Electron-Mobility Transistors // Electronics, 2021. Vol. 12. № 21. P. 4435.
2. Balmer R. S. et al. Analysis of thin AlN carrier exclusion layers in AlGaN/GaN microwave heterojunction field-effect transistors // Semiconductor science and technology, 2004. Vol. 19. № 6. P. L65.
3. Shi N. et al. Optimization AlGaN/GaN HEMT with field plate structures // Micromachines, 2022. Vol. 13. № 5. P. 702.

УДК 621.382.323

Разработка системы генерации данных для системы Machine Learning TCAD

Бабурин А. И., Силкин Д. С., к. т. н., Попов Д. А., к. т. н., Пригородов Р. А., Яковлева Е. Д.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
da.popov@hse.ru

Разработан демонстратор инструмента автоматизации сбора датасета для полупроводниковых структур. Проведено обучение нейронной сети для прогнозирования электрических характеристик МОП- и биполярных транзисторов на основе данных, полученных с помощью системы приборно-технологического моделирования Synopsys TCAD. Получены и проанализированы предсказанные характеристики рассматриваемых полупроводниковых структур.
Ключевые слова: МОП-транзистор; биполярный транзистор; машинное обучение; датасет; TCAD.

Введение

Системы приборно-технологического моделирования (TCAD) позволяют разрабатывать конструкцию и технологию производства полупроводниковых приборов. В основе работы таких систем лежит моделирование физических процессов переноса носителей заряда в материале с учетом типа материала, его легирования, зонной и кристаллографической структуры и т. п. При проведении расчетов полупроводников структур TCAD составляет систему уравнений, включающую сотни–тысячи уравнений для расчета физических параметров в каждой точке структуры. Решение таких систем требует значительных затрат времени и вычислительных ресурсов. Для упрощения решения таких задач предлагается использовать средства машинного обучения. Нейронная сеть, обученная на большом объеме собранных данных о влиянии физических параметров структуры на электрические характеристики прибора, значительно ускоряет решение таких типовых задач. Работы в этой области, проводимые зарубежными учеными [1, 2], показывают, что обучение нейронной сети с помощью набора данных от 1000 записей требуется, чтобы получить приемлемую точность совпадения прогнозов нейронной сети с результатами моделирования непосредственно в TCAD.

Демонстратор ML-TCAD Demo

Работа с системой осуществляется через разработанный демонстратор ML-TCAD Demo (рис. 1), состоящий из следующих разделов:

1) функция генерации датасета входных параметров требуемых полупроводниковых приборов в заданном диапазоне значений для выгрузки их в подготовленный проект программы Sentaurus TCAD;

2) функция обучения нейросети с выбором количества данных для обучения и выбором типа транзистора для правильного отображения наименований осей генерируемых характеристик;

3) функция тестирования нейронной сети на подготовленных файлах входных параметров выходных характеристик транзистора;

4) функция предсказания характеристик транзистора в заданном диапазоне значений.

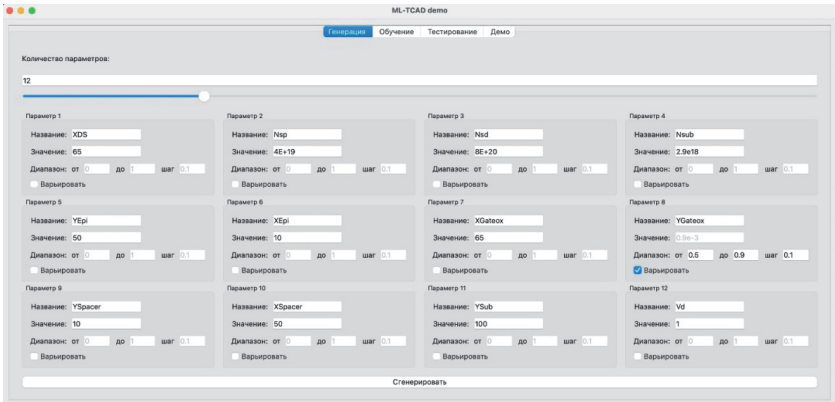


Рис. 1. Вкладка «Генерация» приложения (ML-TCAD Demo)

Формирование датасета для обучения нейронной сети

По результатам расчетов Sentaurus TCAD были получены входные и выходные характеристики для 1 000 вариантов структуры МОП-транзистора и 1 000 вариантов структуры биполярного транзистора, отличающихся физическими параметрами структуры. Данные характеристики использовались в качестве датасета входных и выходных параметров, пригодных для обучения нейросети.

Обучение нейронной сети

На основе полученного датасета входных и выходных параметров рассматриваемых полупроводниковых структур было проведено обучение на разном объеме выбранных параметров, где видно, как менялась точность предсказания от выборки к выборке с увеличением количества посчитанных структур транзистора (рис. 2 и 3).

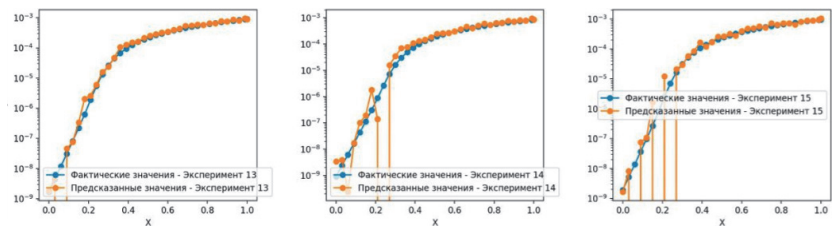


Рис. 2. Тестирование нейросети на 100 просчитанных структурах МОП-транзистора

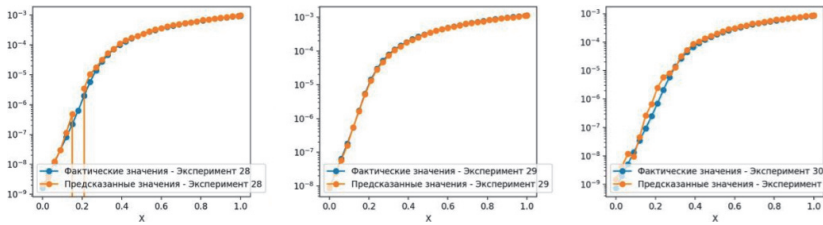


Рис. 3. Тестирование нейросети на 400 просчитанных структурах МОП-транзистора

После обучения на полном наборе датасета была достигнута точность 99,9 % (рис. 4) при изменении параметров для МОП-транзистора и биполярного транзистора.

```
Mean Absolute Error (MAE): 1.906456037708628e-06
Mean Squared Error (MSE): 8.752977248419588e-12
R2 Score: 0.9999295821163875
```

Рис. 4. Параметры точности предсказания отлаженной нейросети

Заключение

В работе разработан демонстратор инструмента автоматизации сбора датасета для полупроводниковых структур. С использованием демонстратора проведена отработка процедуры сбора датасета входных и выходных параметров в количестве 1 000 для МОП- и для биполярного транзистора в количестве 1 000, что является достаточным для достижения высокой точности и скорости предсказаний. Точность предсказания характеристик транзисторов по результатам обучения нейросети составила 99,9 %.

Литература

1. Ghoshhajra R., Biswas K., Sarkar A. Device Performance Prediction of Nanoscale Junctionless FinFET Using MISO Artificial Neural Network // Silicon, 2022. Vol. 14. P. 8141–8150.
2. Mehta K., Raju S. S., Xiao M., Wang B., Zhang Y., Wong H. Y. Improvement of TCAD Augmented Machine Learning Using Autoencoder for Semiconductor Variation Identification and Inverse Design // IEEE Access, 2020. Vol. 8. P. 143519–143529.

УДК 621.3.049

Эффект аутдиффузии примеси из приповерхностного слоя полупроводника при моделировании в TCAD термических процессов в среде, содержащей кислород

Федотов А. В.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
avfed05@mail.ru

При моделировании в TCAD термических процессов в среде, содержащей кислород, возникает ложный эффект аутдиффузии примеси: концентрация примеси в приповерхностных слоях сильно сокращается, из полупроводника уходит значительная доза примеси. Такая картина не соответствует экспериментальным данным. В работе проанализирована степень проявления этого эффекта при моделировании и описаны рекомендации по корректному моделированию термических процессов в TCAD.
Ключевые слова: Sentaurus TCAD; термический отжиг; моделирование; диффузия; аутдиффузия.

Профили распределения примесей оказывают определяющее влияние на электрофизические характеристики приборов. При проектировании и моделировании устройств в приборно-технологическом программном обеспечении Sentaurus TCAD важно воспроизводить корректные профили распределения.

В модуле SProcess в ПО Sentaurus TCAD реализовано множество моделей термической диффузии примеси [1]. Однако обнаружено, что при моделировании термических процессов в среде, содержащей кислород, при использовании любой модели возникает паразитный эффект аутдиффузии примеси из приповерхностных слоев полупроводника. Данный эффект характеризуется тем, что концентрация примеси в приповерхностных слоях сильно сокращается, из полупроводника уходит значительная доза примеси. При этом доза примеси, которая попадает в тонкую пленку вырастающего термического окисла, значительно меньше ушедшей дозы. Таким образом, в результате паразитного эффекта аутдиффузии из структуры уходит доза примеси, которая не компенсируется в других слоях. Величина уходящей из приповерхностных слоев дозы составляет до 50 % от исходной.

Такая картина, возникающая при моделировании со стандартными моделями диффузии и окисления в TCAD, не соответствует экспериментальным данным: результаты ВИМС-анализа тестовых структур демонстрируют отсутствие такого эффекта.

В данной работе описано проявление эффекта аутдиффузии и показаны условия его возникновения. Продемонстрировано сопоставление моделируемых результатов с экспериментальными данными и описаны рекомендации по моделированию термических процессов в TCAD, позволяющие избежать данного эффекта.

Литература

1. Sentaurus Process User Guide. Version H-2013.03, March 2013.

УДК 004.94

Численное моделирование процесса резистивного переключения элемента энергонезависимой памяти на основе технологии ReRAM

Журавлев А. А., Абгарян К. К., д. ф.-м. н., Ревизников Д. Л., д. ф.-м. н.
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, к. 2
zhuravlyow.andrei@gmail.com, kristal83@mail.ru, reviznikov@gmail.com

Для исследования процессов, происходящих в ходе переключения элемента ReRAM, используется комплексная математическая модель, состоящая из уравнения дрейфа-диффузии ионов, уравнения электропроводности и уравнения теплопроводности с источниковым слагаемым в виде джоулева тепла. Так как уравнения модели взаимосвязаны, задача рассматривается в сопряженной постановке. В работе представляется подход к численному решению данной задачи. Используется конечно-объемная аппроксимация уравнений на динамически адаптируемой к особенностям решения разностной сетке. Получение самосогласованного решения достигается с помощью глобальных итераций. Результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: математическое моделирование; дрейф-диффузионная модель; ReRAM; мемристор.

Переключение мемристивного элемента между различными состояниями связано с формированием проводящих филаментарных структур. Такие структуры могут образовываться за счет обеднения оксидной пленки ионами кислорода с образованием большого числа кислородных вакансий либо полным превращением оксида в чистый металл. В процессе переключения электропроводность и теплопроводность моделируемого элемента существенно изменяются в зависимости от концентрации ионов.

Для моделирования процесса переключения мемристивных элементов могут использоваться различные подходы [1–3]. В данной работе для исследования процессов, происходящих при переключении элемента ReRAM, используется комплексная математическая модель, состоящая из уравнений дрейфа-диффузии для подвижных частиц (ионов), уравнения электропроводности и уравнения теплопроводности с источниковым слагаемым в виде джоулева тепла. При этом уравнения электропроводности и теплопроводности рассматриваются в квазистационарной постановке, тогда как концентрация подвижных частиц эволюционирует во времени.

В рамках данной модели предполагается, что подвижные частицы, отвечающие за проводимость материала, движутся вследствие диффузии, происходящей за счет хаотического теплового движения атомов, и дрейфа, вызванного приложением к ячейке внешнего напряжения.

Коэффициент электропроводности зависит от концентрации проводящих частиц и температуры, в простейшем случае он может являться интерполяцией коэффициентов электропроводности двух состояний исследуемого материала.

При этом для малых концентраций проводящей фазы используется дополнительный барьер активации тока, который позволяет улучшить совпадение результатов в низкопроводящем состоянии ячейки.

Коэффициент теплопроводности может зависеть от концентрации проводящих частиц и температуры, он также может определяться интерполяцией коэффициентов теплопроводности двух состояний исследуемого материала.

Уравнения модели взаимосвязаны. Коэффициент диффузии и скорость дрейфа в уравнении для концентрации ионов существенно зависят от температуры, которая определяется уравнением теплопроводности, где коэффициент теплопроводности зависит от концентрации ионов, а правая часть зависит от протекающего тока. Плотность тока в ячейке определяется уравнением электропроводности, в котором коэффициент электропроводности зависит от концентрации ионов и температуры. Для получения самосогласованного решения уравнений ионной динамики на каждом временном шаге требуется организация специального итерационного процесса. В дальнейшем будем называть такие итерации глобальными, тогда как итерации, используемые для решения каждого из уравнений по отдельности, будем называть локальными. Таким образом, в общей вычислительной схеме в ходе временного цикла на каждом шаге по времени в рамках глобального итерационного процесса, объединяющего решение уравнений, осуществляются локальные итерационные процессы. В процессе моделирования в решениях часто возникают области с высокими локальными перепадами концентраций, что требует использования достаточно мелких сеток, однако повсеместное измельчение сеток приводит к существенным вычислительным затратам. Для уменьшения вычислительных затрат решение уравнений производится на адаптивной сетке, которая подстраивается под особенности решения, локально измельчаясь в областях с высокими градиентами решений и обратно укрупняясь при сглаживании решения.

Вычислительные эксперименты, проведенные с использованием описанной модели, показали хорошее согласование с имеющимися экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-91-01012).

Литература

1. Zhuravlev A. A., Abgaryan K. K., Reviznikov D. L. Multiscale Modeling of Ion Dynamics in Memristive Elements // Physica status solidi (b), 2022. Vol. 259. № 11. P. 2200151.
2. Sadi T. et al. Investigation of resistance switching in SiO_x RRAM cells using a 3D multi-scale kinetic Monte Carlo simulator // Journal of Physics: Condensed Matter, 2018. Vol. 30. № 8. P. 084005.
3. Larentis S. et al. Resistive switching by voltage-driven ion migration in bipolar RRAM—Part II: Modeling // IEEE Transactions on Electron Devices, 2012. Vol. 59. № 9. P. 2468–2475.

ДК 004.052.2

Определение объема аппаратной избыточности, вводимой в целях повышения отказоустойчивости матриц памяти ReRAM

Петрова С. И.[1,2], Теплов Г. С.[1,2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А

В работе построена математическая модель, позволяющая получить статистику возникновения ошибок в матрицах памяти ячеек ReRAM. Разработан алгоритм, позволяющий оценить необходимый объем аппаратной избыточности для предотвращения отказов матриц на заданном ресурсе. Оптимизирован способ введения аппаратной избыточности.
Ключевые слова: ReRAM; матрицы памяти; аппаратная избыточность.

В настоящее время исследовательскими технологиями энергонезависимой памяти ReRAM обладают порядка десятка компаний во всем мире [1], однако переход к коммерческим технологическим решениям на основе данного типа памяти затруднен. Одним из основных препятствий на пути внедрения технологии ReRAM является ее низкая повторяемость характеристик от устройства к устройству, в том числе по количеству операций записи. Повышение отказоустойчивости памяти ReRAM при наличии разброса данного параметра является одним из необходимых условий перевода технологии ReRAM из экспериментальной в промышленную. Одним из возможных методов решения данной задачи является применение аппаратной избыточности, которое можно реализовать посредством использования самокорректирующихся кодов и введения дополнительных слов для матриц памяти.

В рамках данной работы для матриц размерами 1, 4 и 16 Кбит с выходом годных 95 и 99,7 %, каждая из которых разбита на слова по 8, 16 и 32 бит, была построена математическая модель, для которой методом Монте-Карло [2] была получена статистика возникновения ошибок в матрицах памяти, на основе которой произведен расчет вероятностей возникновения ошибок в словах матрицы. Под процентом выхода годных в данном случае понимается процент ячеек, переключающихся в соответствии со своей спецификацией. Основываясь на полученных результатах, был произведен повторный расчет вероятностей с учетом добавления избыточных слов и использования кода Соломона — Рида — одного из типов самокорректирующихся кодов [3]. По итогам проведения повторного расчета были выделены наиболее оптимальные способы введения аппаратной избыточности для каждого из вариантов построения матриц, при которых для исправления возникающих ошибок происходит минимальное увеличение матрицы памяти. Результаты повторного расчета в этих случаях приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Результаты повторного расчета для матриц с выходом годных 99,7 % для оптимальных по увеличению матрицы случаев

Длина первоначального слова	Количество ошибок, исправляемых самокорректирующимся кодом	Количество необходимых дополнительных слов	Итог по затраченным битам	Увеличение матрицы относительно первоначального размера
Матрица 1 Кбит				
8 бит	0	5	1056	1,03
16 бит	0	4	1088	1,06
32 бита	0	4	1152	1,13
Матрица 4 Кбит				
8 бит	0	13	4200	1,03
16 бит	0	13	4304	1,05
32 бита	1	3	4454	1,09
Матрица 16 Кбит				
8 бит	0	50	16784	1,02
16 бит	0	51	17200	1,05
32 бита	1	6	17612	1,07

Таблица 2. Результаты повторного расчета для матриц с выходом годных 95 % для оптимальных по увеличению матрицы случаев

Длина первоначального слова	Количество ошибок, исправляемых самокорректирующимся кодом	Количество необходимых дополнительных слов	Итог по затраченным битам	Увеличение матрицы относительно первоначального размера
Матрица 1 Кбит				
8 бит	0	68	1568	1,53
16 бит	3	9	1606	1,57
32 бита	7	3	1610	1,57
Матрица 4 Кбит				
8 бит	1	77	5890	1,44
16 бит	3	19	6050	1,48
32 бита	5	14	5964	1,46
Матрица 16 Кбит				
8 бит	1	260	23080	1,41
16 бит	2	121	22900	1,40
32 бита	5	29	22722	1,39

Таким образом, при выходе годных ячеек 99,7 % увеличение матриц в оптимальном случае происходит в пределах от 2 до 13 %, а для матриц с выходом годных 95 % — от 39 до 57 %. Также установлено, что с увеличением длины слова растет эффективность использования самокорректирующегося кода. Таким образом, для более коротких слов наименьшее относительное увеличение размера матрицы наблюдается в случае, при котором превалирует количество битов, затраченных на введенные избыточные слова. А при удлинении слова наибольший вклад в избыточность начинают вносить биты, вводимые для использования самокорректирующегося кода.

Литература

1. Choe J. Memory technology 2021: Trends & challenges // 2021 international conference on simulation of semiconductor processes and devices (SISPAD). IEEE, 2021. P. 111–115.
2. Соболь И. М. Метод Монте-Карло. — М.: Наука, 1968.
3. Ghosh S. Guaranteeing fault tolerance through scheduling in real-time systems: дис. University of Pittsburgh, 1996.

УДК 537.311.322

Исследование контактных явлений в многослойных фотоэлектрических преобразователях на кристаллических и неупорядоченных полупроводниках

Полагин М. В., Мишустин В. Г.
Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1
meowpolagin@yandex.ru

В работе рассмотрены многокаскадные фотоэлектрические преобразователи на основе различных полупроводниковых материалов. Проведено моделирование электрофизических характеристик двухкаскадного тонкопленочного фотоэлектрического преобразователя на основе a-Si:H и a-SiC:H. Разработана физическая модель фотоэлектрического преобразователя и предложен алгоритм расчета его характеристик. Результаты моделирования могут быть использованы для оптимизации конструкции фотоэлектрических преобразователей в целях повышения их эффективности.

Ключевые слова: многокаскадные фотоэлектрические преобразователи; неупорядоченные полупроводники; p-i-n-структура; электрофизические свойства; вольт-амперные характеристики.

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) занимают определенную нишу в электроэнергетике и обладают хорошими перспективами дальнейшего развития. Особенно актуально их применение в труднодоступных местах, где нет возможности или экономической целесообразности прокладки линий электропередач. В случае космического применения они являются фактически безальтернативными источниками энергии.

Перспективное направление развития ФЭП — это использование неупорядоченных полупроводников. Они обладают такими преимуществами, как радиационная стойкость, возможность напыления на искривленные поверхности большой площади, низкотемпературный технологический процесс, относительно невысокая стоимость. Ограничение данной технологии — невысокий относительно кристаллических полупроводников коэффициент полезного действия. Очевидный способ преодолеть это ограничение — использование многокаскадных тонкопленочных ФЭП на основе неупорядоченных полупроводников, обладающих разной шириной запрещенной зоны, что позволяет расширить спектр поглощаемого излучения.

В данной работе проводится исследование контактных явлений в многослойных ФЭП на основе неупорядоченных полупроводников. Рассматриваются основные физические процессы, протекающие в контактах металл — полупроводник, а также полупроводник — полупроводник. На основе физических моделей, описывающих контактные явления, разработано программное обеспечение для расчета вольт-амперных характеристик двухкаскадных солнечных элементов на основе системы a-Si:H/a-SiC:H. Это необходимо для проведения работ по улучшению КПД серийно производимых фотоэлектрических преобразователей, а также разработки новых перспективных конструкций. Численное моделирование ВАХ является

более быстрым, гибким и недорогим способом отработки конструкции и технологии производства ФЭП по сравнению с реальным экспериментом.

На основании анализа литературных данных выбраны структура, материалы и модель для разработки программы. В программе MatLab реализован алгоритм для численного моделирования двухкаскадного ФЭП на основе a-Si:H и a-SiC:H. Модель для расчета разработана специально для многослойных ФЭП на основе неупорядоченных полупроводников. Она базируется на уравнениях для расчета фототока и темнового тока p-i-n-перехода, учитывающих особенности электрофизических характеристик неупорядоченных полупроводников. На основе предложенной модели проведен расчет основных параметров и характеристик многокаскадного фотоэлектрического преобразователя с p-i-n-структурой на основе a-Si:H и a-SiC:H.

Данная работа выполнена с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В. Ф. Уткина.

УДК 621.383.51

Расчетно-экспериментальная оценка срока службы солнечных элементов в заданных радиационных условиях

Степанов М. А.
АО «МИКРОН»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Основной целью исследования является изучение влияния радиационных факторов на долговечность и эффективность работы солнечных элементов. На основе полученных результатов проведена расчетно-экспериментальная оценка срока службы солнечных элементов в заданных радиационных условиях.
Ключевые слова: солнечный элемент; радиационная стойкость; моделирование; срок службы.

Воздействие ионизирующих излучений космического пространства приводит к деградации характеристик солнечных элементов [1].

В работе применяется комплексный подход, который включает анализ радиационных условий, литературный обзор и изучение существующих методик, разработку расчетных моделей, проведение экспериментов и анализ результатов. В работе используется специализированная аппаратура, включая солнечные симуляторы, измерительные приборы, климатическую аппаратуру, а также расчетные модели и программное обеспечение для моделирования и анализа данных. Ожидаемыми результатами исследования являются оценка срока службы солнечных элементов в заданных радиационных условиях, анализ факторов, влияющих на их деградацию, и формулирование рекомендаций по улучшению долговечности и эффективности работы солнечных элементов.

Представлено исследование деградации характеристик однопереходных гетероструктурных GaAs/Ge солнечных элементов. Описана методика исследования, которая включает облучение солнечных элементов различными флюенсами быстрых нейтронов в специально созданных радиационных условиях. Далее было проведено измерение световых вольт-амперных характеристик солнечных элементов до и после облучения, а также анализ полученных данных. Результаты экспериментов позволяют оценить степень деградации характеристик солнечных элементов под воздействием радиации. На основе полученных результатов проведена расчетно-экспериментальная оценка срока службы солнечных элементов в заданных радиационных условиях. Для этого использованы методы моделирования деградации солнечных элементов, такие как метод JPL и метод NRL [2].

Результаты и выводы работы могут быть полезными для разработки и оптимизации солнечных энергетических систем, а также для принятия решений в области использования солнечной энергии в различных климатических и радиационных условиях.

Литература

1. Таперо К. И., Диденко С. И. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники: радиационные эффекты в изделиях электронной техники: Уч. пособие. — М.: изд. дом МИСиС, 2013.
2. Messenger S. R., Summers G. P. Modeling solar cell degradation in space: A comparison of the NRL displacement damage dose and the JPL equivalent fluence approaches. 2000.

УДК 681.7.069

Прогнозирование электрических параметров кремниевых солнечных элементов на низкой околоземной орбите

Феклистова А. А.[1,2], Рябцева М. В.[1], Чуянова Е. С.[1,2], Вагапова Н. Т.[1,2]
[1] АО «НПП «Квант»
129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, 16
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
feklistova_aa@npp-kvant.ru

Рассмотрена полупроводниковая структура Si солнечного элемента (СЭ) космического назначения. Представлены результаты моделирования деградации Si СЭ в результате воздействия электронов с энергией 1 МэВ с флюенсом, эквивалентным пяти годам эксплуатации на орбите: $I_{кз}$ уменьшилось на 97,8 %, а $U_{хх}$ — на 93,4 %.

Ключевые слова: ионизирующее излучение; солнечный элемент; полупроводниковые материалы; моделирование; космические аппараты.

Основным источником энергообеспечения космических аппаратов (КА) и станций является батарея солнечная (БС), фотогенерирующая часть которой состоит из солнечных элементов (СЭ). Для низкоорбитальных КА (400–2000 км), таких как «Метеор-М», «Электро-Л», «Арктика-М», основным материалом СЭ является кремний (Si), который хорошо изучен и имеет качественную отработанную технологию производства, а также невысокую стоимость в сравнении с другими полупроводниковыми материалами.

В качестве объекта исследования был рассмотрен Si СЭ (рис. 1). Особого внимания заслуживает использование СЭ с базой *p*-типа, так как, например, при облучении СЭ электронами малых энергий 0,3–1 МэВ отношение коэффициентов электронного повреждения *n*- к *p*-типу равняется 30–100, что говорит о большем возникновении центров рекомбинации именно в Si *n*-типа.

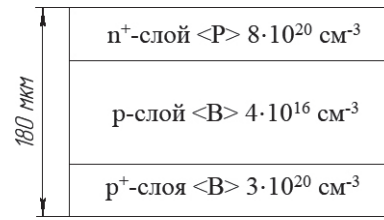


Рис. 1. Схематическое изображение структуры исследуемого ФЭП

В космическом пространстве существует большое количество факторов, которые влияют на выходные характеристики СЭ и БС в целом, например ионизирующее излучение, микрометеориты, электростатические разряды, атомарный кислород и т. д.

Известно, что ионизирующим излучением (ИИ) называется любое излучение, которое прямо или косвенно ионизирует среду, в которой оно взаимодействует. Каждый

вид излучения характеризуется типом частицы (зарядом, массой, энергией) относительно взаимодействующей среды и плотностью потока частиц (флюенсом).

Существует два основных принципа взаимодействия ИИ: структурные нарушения, возникающие в результате смещения и перестройки атомов в твердом теле, и эффекты ионизации, которые возникают при реакции между ядром и бомбардирующими частицами. В структуре СЭ в основном встречается первый вид дефектов, который в зависимости от величины флюенса подразделяется на междоузельные дефекты (Френкеля, Шоттки), линейные дефекты и т. д.

Эти атомные смещения, которые нарушают периодическую структуру решетки полупроводниковых материалов, препятствуют движению неосновных носителей заряда (НЗ), что приводит к уменьшению времени жизни НЗ и, соответственно, диффузионной длины НЗ, что описывается формулой

$$\frac{1}{L_\phi^2} - \frac{1}{L_0^2} = K_L \phi, \quad (1)$$

где L_0 и L_ϕ — диффузионная длина неосновных НЗ (0 до и ϕ после облучения соответственно), см; K_L — коэффициент повреждения; ϕ — накопленный флюенс электронов, см$^{-2}$.

Соответственно, в результате моделирования были получены деградационные кривые [2], на основе которых можно рассчитать относительное изменение тока короткого замыкания ($I_{кз}$) и напряжения холостого хода (U_{xx}), равных в начале срока активного существования (САС) 44,02 мА/см^2 и 584,65 мВ соответственно. Из [3] известно, что эквивалентный поток электронов 1 МэВ на низкой околоземной орбите составляет $3{,}78 \cdot 10^{11}$ электрон/см^2·год (табл. 1).

Таблица 1. Относительная деградация электрических параметров СЭ

САС, лет	Эквивалентный поток, электрон/см^2	$I_{кз}/I_{кз0}$, отн. ед	U_{xx}/U_{xx0}, отн. ед
2	$7{,}6 \cdot 10^{11}$	0,98	0,97
5	$1{,}9 \cdot 10^{12}$	0,97	0,93

Известно, что в спецификации на схожие кремниевые СЭ марки Azur Space указано, что при флюенсе $3{,}0 \cdot 10^{14}$ электрон/см^2 относительное изменение U_{xx} составляет 0,91, а $I_{кз}$ — 0,88, что говорит о том, что полученные смоделированные данные сопоставимы с существующей статистикой, экспериментально подтвержденной крупными производителями СЭ.

Литература

1. Cappelletti M. A. et al. Theoretical study of the maximum power point of n-type and p-type crystalline silicon space solar cells // Semiconductor science and technology, 2013. Vol. 28. № 4. P. 045010.
2. Феклистова А. А., Рябцева М. В., Чуянова Е. С. Моделирование деградационных кривых электрических параметров облученных фотоэлектрических преобразователей на основе кремния // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем “Стойкость-2024”». — Лыткарино: научно-исследовательский институт приборов, 2024. — С. 35–36.
3. Tada H. Y.; Carter J. R. et al. Solar cell radiation handbook, 1977. 300 p.

УДК 60 ББК 32.853.1

Электронно-лучевая полировка пластин карбида кремния

Атаманчук А. А., Авдеев С. П.
Южный федеральный университет
344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42
aatamanchuk@sfedu.ru, savdeev@sfedu.ru

Предложен способ полировки пластин карбида кремния через сублимацию кремния из-за диссоциации карбида кремния во время электронно-лучевого воздействия. Способ может быть альтернативой популярному химико-механическому способу полировки пластин карбида кремния после резки его слитка на пластины.

Ключевые слова: SiC; диссоциация SiC; карбид кремния; полировка; электронно-лучевая обработка.

На этапе резки слитка карбида кремния на пластины режущим инструментом вносится множество дефектов в поверхностный слой изготавливаемых пластин. Они препятствует проведению последующих операций, например литографии, легированию, эпитаксии и другим [1]. Улучшение качества пластин осуществляется шлифовкой и полировкой. Наиболее популярным методом является химико-механическая полировка (CMP) [2, 3]. Однако этот метод не лишен недостатков. Так, дефектный поверхностный слой пластины не удаляется полностью; из-за наличия механического воздействия на пластину могут возникнуть новые дефекты; метод имеет высокую стоимость, к тому же в случае SiC-пластин их полировка сталкивается с проблемами длительного времени обработки и низкой технической гибкости [1, 4].

Более перспективным немеханическим подходом в полировке SiC может стать термическая модификация поверхности сканирующим электронным лучом [5–17].

Обработка поверхности карбида кремния сканирующим электронным ленточным лучом вызывает ее нагрев. При достижении определенной температуры карбид кремния начинает диссоциировать, распадаясь на кремний и углерод. Кремний будет возгоняться (сублимироваться), а углерод будет графитизировать поверхность SiC. Этот классический процесс электронно-лучевой диссоциации SiC имеет достаточно простую модель, дающую оценку глубины сублимации Si из SiC [18]. Сублимация кремния приведет к уменьшению объема всех элементов рельефа поверхности пластины SiC. Можно было бы ожидать, что такая сублимация Si будет равномерной, неселективной и не даст заметного выглаживания поверхности.

Это предположение было проверено на модели поверхности, в которой рельеф поверхности строился из правильных четырехугольных пирамид. Моделирование показало, что верхние части пирамид нагреваются до больших температур, чем нижние, поэтому сублимация Si будет идти селективно: верхние части пирамид будут сокращаться быстрее, чем нижние, и это приведет к планаризации поверхности. В рамках этой модели была получена оценка изменения шероховатости ΔRa поверхности:

$$\Delta Ra = \frac{3wF(1 + M_C / M_{Si})}{2\rho v_{л.} S^2_{выст.}},$$

где w — ширина электронного луча; F — скорость сублимации, выраженная в массовых единицах; M_C и M_{Si} — молярные массы углерода и кремния соответственно; ρ — плотность SiC; $v_{л.}$ — скорость прохода луча над обрабатываемой поверхностью; $S_{выст.}$ — средний шаг местных выступов профиля в соответствии с ГОСТ 2789-73.

К тому же термическое воздействие способно сократить плотность более глубоких дефектов в пластине, также улучшая ее качество.

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

- предложен альтернативный способ финишной обработки пластин карбида кремния;
- создана модель, отражающая поведение рельефа поверхности пластины SiC во время электронно-лучевой обработки;
- в рамках данной модели дана оценка изменения шероховатости поверхности в результате электронно-лучевой обработки.

Литература

1. Атаманчук А. А. Исследование и разработка технологического процесса электроннолучевой финишной обработки подложек карбида кремния для силовой электроники: Выпускная квалификационная работа. — Таганрог: Южный федеральный университет, 2023.
2. HORIBA. Chemical Mechanical Planarization (CMP) [Electronic resource]. URL: https://www.horiba.com/int/semiconductor/process/chemical-mechanical-planarization-cmp/ (accessed: 09.07.2024).
3. Srivastava M. et al. Review on the various strategies adopted for the polishing of silicon wafer — A chemical perspective // Materials Today: Proceedings, 2022. Vol. 63. P. 62–68.
4. Zantye P. B., Kumar A., Sikder A. K. Chemical mechanical planarization for microelectronics applications // Materials Science and Engineering: R: Reports, 2004. Vol. 45. № 3–6. P. 89–220.
5. Gusev E. Y. et al. Investigation of Structure Formation Modes for Metasurfaces and Confocal Optical Systems // Physics of the Solid State, 2023. Vol. 65. № 12. P. 2081–2084.
6. Avdeev S., Mileshko L., Garanga S. Thermodynamic Analysis of the Reactions of Formation of Potassium, Zin. and Aluminum Phosphates during the Electron-Beam Processing of Blue-Green Glass SZS23 // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2019. Vol. 13. P. 456–457.
7. Gusev E. Yu., Avdeev S. P., Ageev O. A. Thermodynamic Analysis of Interface-Interaction Processes in a Silicon/Silicon Carbide Structure during Electron-Beam Treatment // Surf J. Investig., 2019. Vol. 13. № 2. P. 256–260.
8. Пат. 2389109 C2 Российская Федерация, МПК7 H 01 L 21/42, B 82 B 3/00. Способ подготовки поверхности пластин бинарных и многокомпонентных материалов / Авдеев С. П., Агеев О. А., Гусев Е. Ю., Чередниченко Д. И., Светличный А. М., Коноплев Б. Г., заявитель и патентообладатель — ФГОАУ ВПО «Южный федеральный университет» (ЮФУ). — № 2008113559/28, заявл. 07.04.08; опубл. 10.05.10, бюл. № 13. 8 с.: ил.

9. Авдеев С. П. и др. Повышение механической и химической устойчивости поверхности оптического стекла боролантановой группы // Прикладная физика, 2010. — № 3. — С. 140–142.
10. Авдеев С. П., Гаранжа С. Н. Влияние электронно-лучевой обработки на элементный состав цинковоалюмофосфатного стекла // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения, 2012. — Т. 12. — № 2. — С. 26–27.
11. Авдеев С. П., Кравченко А. А., Гусев Е. Ю. Влияние электронно-лучевой обработки на параметры фотоэмитирующих структур и фактор шума МКП // Прикладная физика, 2007. — № 3. — С. 67–72.
12. Авдеев С. П. и др. Модификация параметров контактов металл-карбид кремния импульсной термообработкой // Физика и химия обработки материалов, 2004. — № 6. — С. 84–88.
13. Авдеев С. П. и др. Перспективы применения электронно-лучевой обработки для модификации золь-гельных пленок легированного диоксида кремния // Физика и химия обработки материалов, 1998. — № 2. — С. 77–83.
14. Авдеев С. П. и др. Вторично-эмиссионные характеристики свинцово-силикатного стекла после электронно-лучевой обработки в вакууме // Известия вузов. Электроника, 1997. — Т. 4. — № 3.
15. Авдеев С. П., Чередниченко Д. И. Электронно-лучевая обработка микроканальных пластин // Вакуумная техника и технология, 1996. — Т. 6. — № 3. — С. 23–26.
16. Авдеев С. П. и др. Вторичноэмиссионные свойства свинцовосиликатных стекол после электронного облучения // Физика и химия стекла, 1996. — Т. 22. — № 1. — С. 39.
17. Atamanchuk A. et al. Sublimation Mechanism for Polishing Silicon Carbide Wafers by Electron Beam // Russian Microelectronics, 2023. Vol. 52. № S1. P. S176–S178.
18. Дмитриев А. Н., Чередниченко Д. И. Формирование слоев графена сублимацией карбида кремния в вакууме сканирующим источником тепла // Известия вузов. Электроника, 2010. — Т. 86. — № 6. — С. 12–18.

УДК 621.396.96

Оптимизация формы сверхширокополосного зондирующего сигнала для максимизации нелинейного отклика от объекта зондирования по основанной на измерениях модели

Безрукова И. В., Семенов Э. В., д. т. н.
Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, Академический просп., 2/3

При помощи основанной на измерениях модели была найдена оптимальная форма тестового сигнала для эффективного воздействия на нелинейный объект (малоразмерный FM-приемник) при определенной длительности импульса и напряженности поля 200 В/м. При использовании тестового сигнала в форме производной импульса Гаусса наблюдается максимальный нелинейный отклик от объекта при постоянной времени 0,2 нс.
Ключевые слова: нелинейная видеоимпульсная локация; сверхширокополосные сигналы; нелинейные отклики.

Видеоимпульсные сигналы увеличивают информативность систем локации за счет расширения полосы частот тестового сигнала. Учет нелинейной составляющей отклика зондируемых объектов еще более повышает информативность [1], делая нелинейную видеоимпульсную локацию перспективной для различных задач. Одной из проблем нелинейной видеоимпульсной локации является отсутствие информации о рассеивающих свойствах объектов. Рассеивающие свойства объектов важно знать для анализа и оптимизации процессов воздействия на нелинейные объекты. В последнее время основанная на измерениях модель объекта зондирования создана и рассматривается далее в докладе. С использованием этой модели можно выяснить, какие формы тестовых сигналов обеспечивают максимальный нелинейный отклик от объекта зондирования.

Основанная на измерениях модель была получена при тестировании нелинейного объекта (малоразмерный FM-приемник). Тестирование объекта выполнялось в ТЕМ-камере, что обеспечивает воздействие на объект ступенчатыми электромагнитными импульсами, спектр которых начинается от постоянного тока [2].

В качестве формы тестового сигнала был взят моноцикл Гаусса, описываемый первой производной импульса Гаусса:

$$e(t) = -t \cdot \exp[(-t/\tau)^2], \qquad (1)$$

где τ — постоянная времени.

Моноцикл Гаусса — сверхширокополосный сигнал с центральной частотой и шириной полосы, полностью определяемой постоянной времени. Известно, что в обычной гармонической нелинейной локации оптимальная частота зондирования объектов составляет около 1 ГГц [3]. Мы выбрали диапазон для постоянной времени от 0,1 до 1 нс, что обеспечивает максимум спектра моноцикла также в окрестности 1 ГГц.

Для моноцикла Гаусса $e(t)$ нелинейные отклики от объекта зондирования по основанной на измерениях модели получены по формуле

$$\varepsilon_m(t) = A[e(t)]\ F^{-1}\{H_n(\omega)F[e(t)]\}, \qquad (2)$$

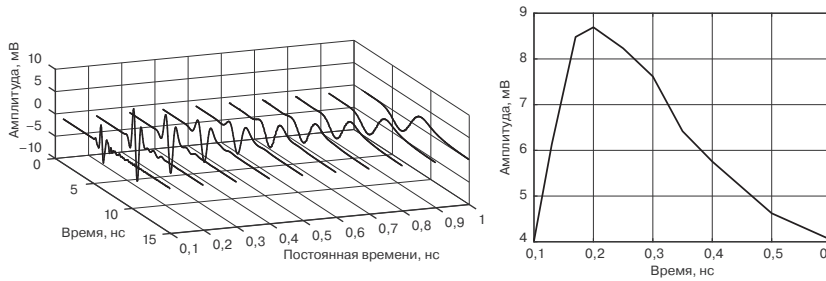
где $A[e(t)]$ — функционал, учитывающий степень отличия текущего тестового воздействия от того, которое применялось при вычислении передаточной функции объекта $H_n(\omega)$; F и F^{-1} — прямое и обратное преобразования Фурье.

Значение функционала определяется по формуле

$$A[e(t)] = A[\max(F^{-1}\{H_a(\omega)F[e(t)]\})], \quad (3)$$

где $H_a(\omega) = 1/(1 + j\omega t)$ — передаточная функция фильтра нижних частот.

На рис. 1*а* представлены в целом нелинейные отклики объекта на тестовый сигнал при изменении постоянной времени от 0,1 до 1 нс, а на рис. 1*б* — их амплитуда.



а *б*

Рис. 1. Нелинейные отклики объекта: *а*) в целом как функция времени и постоянной времени τ; *б*) амплитуда нелинейных откликов объекта как функция постоянной времени тестового сигнала

Из рис. 1*б* можно видеть, что максимальный нелинейный отклик наблюдается при постоянной времени τ, равной 0,2 нс. Максимальному нелинейному отклику соответствует максимум спектра тестового сигнала на частоте 1,1 ГГц.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2024-0001).

Литература

1. Авдеев В. Б., Панычев С. Н. Сверхкороткоимпульсная сверхширокополосная нелинейная радиолокация // Телекоммуникации, 2006. — № 8. — С. 23–27.
2. Семенов Э. В., Назаров М. А., Фатеев А. В., Полторыхин К. М., Березин А. А., Поздняков В. С. Измерение нелинейного рассеяния видеоимпульсных электромагнитных волн малоразмерными объектами // Приборы и техника эксперимента, 2024 [в печати].
3. Щербаков Г. Н. Применение нелинейной радиолокации для дистанционного обнаружения малоразмерных объектов // Специальная техника, 1999. — № 1. — С. 34–39.

УДК 621.3.049

Разработка компактных SPICE-моделей МОП-транзисторов с учетом разброса температурно-зависимых параметров

Хлынов П. А., Самбурский Л. М.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
pakhlynov@edu.hse.ru, lsambursky@hse.ru

Учет разброса параметров SPICE-моделей полупроводниковых компонентов необходим для получения более достоверных результатов схемотехнического моделирования в процессе проектирования электронной аппаратуры, особенно предназначенных для работы в условиях, отличных от нормальных, или в тех, к которым предъявляются строгие требования. В данной работе производятся сравнение и анализ двух подходов для получения значений разброса температурно-зависимых параметров SPICE-моделей транзисторов, а также представлена модель для реализации зависимости разброса электрических характеристик транзистора от температуры.

Ключевые слова: SPICE-модель; МОП-транзистор; температурно-зависимые параметры; разброс параметров модели; метод Монте-Карло.

При разработке специализированной электроники, как правило, требуется учитывать влияние внешней и внутренней температуры в широком диапазоне для предотвращения отказов во время работы устройства [1], причем достаточно достоверные результаты моделирования могут быть получены только с учетом вариативности параметров и характеристик отдельных электронных компонентов.

Проблема учета разброса усугубляется с расширением диапазона температуры (см. рис. 1). Разброс отдельных компонентов может быть учтен при схемотехническом моделировании различными способами: с помощью метода Монте-Карло, угловых моделей и др. [2].

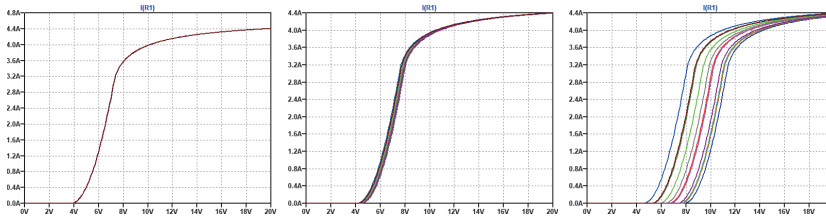
В данной работе рассматриваются несколько подходов для определения значений разброса параметров SPICE-моделей на основе результатов натурных измерений или анализа технических условий.

В соответствии с первым подходом определяют усредненные параметры SPICE-модели транзистора на основе усредненных характеристик, после чего подбирают коэффициенты разброса параметров модели на основе имеющегося разброса характеристик транзисторов. В соответствии со вторым подходом определяют параметры SPICE-модели для каждого имеющегося экземпляра транзистора, после чего применяют статистические методы для расчета коэффициентов распределения параметров модели (среднее и отклонение). В соответствии с третьим походом для определения разброса параметров SPICE-моделей используют ограниченные данные из ТУ.

Для сокращения времени разработки моделей рассчитывают разброс только выбранных статистически независимых параметров [3].

Сравнение подходов для определения значений разброса параметров SPICE-моделей производится по различным важным для практики проектирования

параметрам: затраченное время, сложность и трудоемкость процедуры, степень достоверности результатов. Верификация производится на практических примерах.



а *б* *в*

Рис. 1. Результаты моделирования при температуре 0 °C (*а*), 20 °C (*б*), 120 °C (*в*)

Литература

1. Елисеева Д. А., Сафонов С. О. Анализ механизмов деградации подзатворных диэлектриков на основе SiO_2 в МОП-транзисторах // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2020. — Т. 25. — № 6. — С. 517–524.
2. Денисенко В. Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС // Компоненты и технологии, 2004. — № 36. — С. 28–34.
3. Lange A. et al. A general approach for multivariate statistical MOSFET compact modeling preserving correlations // 2011 Proceedings of the European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC). IEEE, 2011. P. 163–166.

УДК 53.06

Моделирование селектора ReRAM на основе туннельного диода

Курьянов А. О.[1,2], Теплов Г. С.[1,2], к. ф.-м. н.
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
akuryanov@niime.ru
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

В работе было произведено моделирование селектора ReRAM на основе туннельного диода с использованием TiN в качестве электрода и различных материалов диэлектрика (Ta_2O_5, TiO_2, Si_3N_4). По результатам были выявлены геометрические размеры структуры, подходящие для соответствия требуемым параметрам элементов хранения.
Ключевые слова: ReRAM; моделирование; селектор.

В настоящее время микроэлектроника сталкивается с рядом проблем, характерных для устройств памяти, основанной на технологии Flash [1]. В целях решения этой проблемы разрабатываются новые технологии памяти, одним из которых является ReRAM. Резистивная память с произвольным доступом (ReRAM) — это вид энергонезависимой памяти, которая работает за счет изменения сопротивления тонкого диэлектрического слоя под действием внешнего электрического поля. Элементы хранения ReRAM (мемристоры, англ. memristors) обладают высокой масштабируемостью, надежностью, низким энергопотреблением и высокой скоростью работы.

Традиционный подход к описанию мемристора позволяет определить его как элемент энергонезависимой памяти, имеющий два контакта [2]. Реализация функции памяти на элементе осуществляется за счет изменения состояния проводимости между высокорезистивным (HRS), которое соответствует логическому значению «0», и низкорезистивным состоянием (LRS), соответствующим логическому значению «1». На текущий момент выделяется два типа памяти ReRAM: CBRAM, в которой происходит формирование проводящего «мостика» между электродами из материала электродов, и OxRAM, основанная на управлении кислородными вакансиями в оксиде переходного металла.

Данная работа посвящена рассмотрению селекторного устройства — компонента массивов Crossbar ReRAM, который применяется совместно с мемристором. Селекторное устройство предназначено для контролирования тока утечки. Среди типов селекторов выделяют PN-диод, MIM-структуру, селекторы порогового переключения, а также селектор со сверхлинейным пороговым слоем и селектор со смешенной ионно-электронной проводимостью. Основными параметрами селекторных устройств являются токи записи и чтения, их соотношение, пороговое напряжение, время переключения, рабочая температура. В описывающей работу селектора модели устройства на основе диоксида ванадия [3] используются механизмы, связанные с эффектами джоулева нагрева и Пула — Френкеля.

В работе произведено рассмотрение большого количества различных материалов, которые имеют широкое применение в российской микроэлектронике,

для создания селектора на основе туннельного MIM-диода. При выборе электрода было отдано предпочтение нитриду титана TiN, поскольку он обладает более подходящей величиной работы выхода в сравнении с нитридом тантала TaN. В качестве диэлектрика были рассмотрены оксид титана TiO_2, нитрид кремния SiN_x и оксид тантала Ta_2O_5. В результате моделирования были выявлены оптимальные размеры селекторных устройств для двух материалов. Селектор на основе структуры TiN-Ta_2O_5-TiN при площади электрода в 2,5 мкм^2 и толщине диэлектрического слоя d = 1,5 нм имел величину тока записи I_{on} 6 мА при напряжении 1,3 В и тока чтения I_{off} 54 мкА при напряжении 0,1 В. Селектор на основе структуры TiN-TiO_2-TiN при площади электрода в 0,4 мкм^2 и толщине диэлектрического слоя d = 1,5 нм имел величину тока записи I_{on} 4 мА при напряжении 1,3 В и тока чтения I_{off} 79 мкА при напряжении 0,1 В.

Литература

1. Meena J. S. et al. Overview of emerging nonvolatile memory technologies // Nanoscale research letters, 2014. Vol. 9. P. 1–33.
2. 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.
3. Farjadian M., Shalchian M. Hybrid electrothermal model for insulator-to-metal transition in VO_2 thin films // IEEE Transactions on Electron Devices, 2020. Vol. 68. № 2. P. 1–5.

УДК 621.382.323

Электротепловое моделирование мощных схем с использованием ПО Python Spice

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

Возможности ПО Python использованы для управления процессом электротеплового расчета силовых схем и ускоренного получения тепловых и динамических тепловых характеристик схем с большими постоянными времени вследствие использования радиаторов, имеющих большие теплоемкости. Приведены результаты электро--тепловых расчетов и измерений для ряда силовых схем.

Ключевые слова: МОП-транзистор; силовые схемы; радиаторы; цифровой двойник; Python Spice; электротепловая модель.

Введение

Силовые схемы на мощных МОП-транзисторах широко распространены в различных устройствах управления механизмами [1], в преобразовательной аппаратуре и т.д. За счет рассеиваемой мощности в схеме может происходить сильный нагрев кристаллов транзисторов, приводящий к ускорению процессов деградации их структур. Поскольку при этом мощные МОП-транзисторы работают с большими мощностями, то для их охлаждения они устанавливаются на радиаторах, имеющих значительную теплоемкость.

Для оптимизации электротепловых режимов работы мощных транзисторов в целях обеспечения безопасной области их работы используются методы схемотехнического, теплового и совместного электротеплового анализа конструкций мощных блоков.

Для повышения эффективности электротепловых расчетов силовых схем целесообразно использовать среду Python вместе со встроенным SPICE-симулятором схем.

Моделирование мостовой схемы для управления двигателем с мощными МОП-транзисторами

При моделировании мощных схем управления среда ПО Python использовалась для реализации и использования в расчетах ЦД мощных МОП-транзисторов [2] и управления процессом SPICE-расчета схем.

Приведен пример электротеплового моделирования мощной схемы управления двигателем (рис. 1) с использованием нескольких вариантов МОП-транзисторов и радиаторов охлаждения.

Импульсный сигнал, подаваемый на затворы транзисторов, переключает их с постоянной частотой, определяющей частоту и направление ротора.

Электротепловое моделирование было проведено для нескольких транзисторов и радиаторов в средах Python Spice и LtSpice (для контроля результатов). Пример

результатов моделирования с использованием транзистора IRF530 и радиатора изображен на рис. 2 слева, затраты времени процессора — t = 3220 сек.

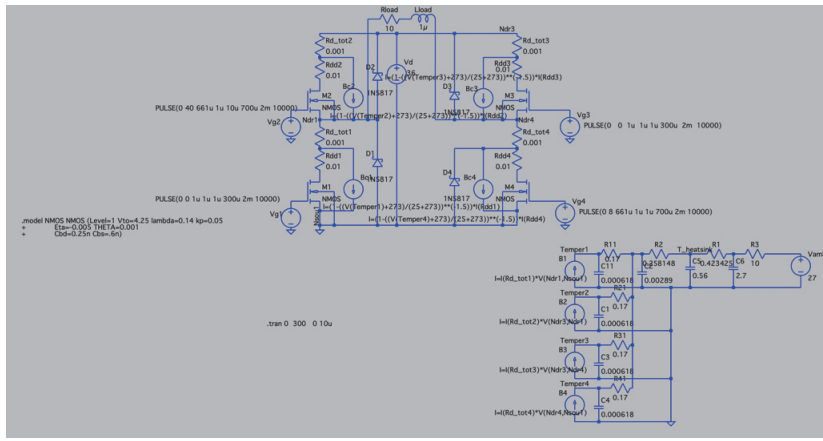


Рис. 1. Мостовая схема для управления двигателем с транзистором IRF610 при Rload = 10 Ом и радиатором с тепловыми параметрами: Cheatsink = 2,7 F, Rheatsink-amb = 10 C/Вт, ПО Lt Spice

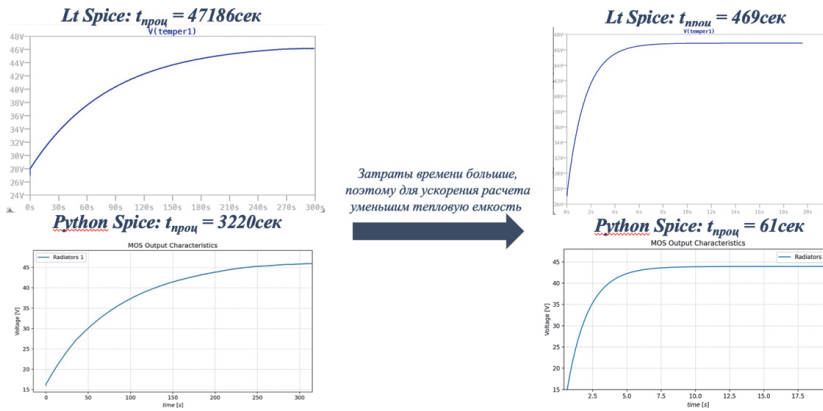


Рис. 2. Смоделированные изменения во времени значений температуры мощных МОП-транзисторов IRF530 мостовой схемы для управления двигателем при Rload = 10 Ом и радиатором с тепловыми параметрами: Rheatsink-amb = 10 C/Вт, Cheatsink = 2,7 F (слева) и Cheatsink = 0,027 F (справа)

Из-за больших тепловых емкостей радиаторов, отображаемых на тепловой схеме емкостью Cheatsink = 2,7 F, расчет длится от нескольких минут (при маленьких тепловых емкостях) до нескольких дней. Это связано с тем, что при больших

Ct радиаторы охлаждения выходят на постоянный тепловой процесс за время порядка минут, частота работы схемы высокая и SPICE-расчет идет с малыми шагами по времени.

Для ускорения электротепловых расчетов силовых схем с радиаторами при помощи ПО Python реализован алгоритм, позволяющий:

- быстрее получить значения температур мощных компонентов при выходе схемы на стационарный тепловой режим за счет уменьшения тепловых емкостей радиаторов;
- оценить время выхода схемы на стационарный тепловой режим за счет оценки постоянных времени тепловых схем.

На рис. 2 справа приведены смоделированные изменения температуры мощных МОП-транзисторов IRF530 при уменьшенных значения тепловых емкостей радиаторов. Результаты получены за t = 61 сек. времени процессора.

Заключение

В работе был отработан алгоритм ускорения процесса моделирования электротепловых характеристик схем управления с несколькими мощными МОП-транзисторами. В дальнейшем планируется усовершенствование данной программы с помощью добавления новых схем, моделей и возможностей.

Литература

1. Andrei Velcescu. Using power MOSFETs in DC motor control applications. URL: https://www.nexperia.com/applications/interactive-app-notes/IAN50004_using-power-MOSFETs-in-DC-motor-control-applications (дата обращения: 01.05.2024).
2. 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.
3. Петросянц К. О., Харитонов И. А. Улучшенная процедура электротеплового моделирования силовых ДМОП каскадов ИС // Труды Всероссийской НТК «Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем (МЭС) — 2020». — 2020.

УДК 62-713.3

Модернизация системы охлаждения фокальной плоскости оптико-электронного преобразователя

Трофимов Д. А., Лавренов В. А.
АО «Российские космические системы», НПЦ «ОПТЭКС»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Гуськова, 8, стр. 2

Приведено описание фокальной плоскости разрабатываемой системы и ее системы охлаждения. Проанализированы различные способы осуществления модернизации. Выполнена модернизация теплообменника в составе системы охлаждения. Проведены тепловые расчеты.
Ключевые слова: телескоп; фокальная плоскость; фотоприемник; система охлаждения; теплообменник.

Для обеспечения высокого разрешения съемки и покрытия большого объема неба современные телескопы имеют широкий диаметр объектива, в связи с этим в фокальных плоскостях устанавливают массив из определенного количества фотоприемников в виде мозаики. Также для астросъемки характерны большие выдержки для накопления слабого сигнала небесных тел, это, в свою очередь, предъявляет повышенные требования по чувствительности к массиву фотоприемников. Для увеличения чувствительности необходимо уменьшить значение темнового сигнала фотоприемника, сильно зависящее от температуры [1, 2]. Наилучшим способом снижения температуры является использование системы охлаждения.

Основными источниками тепла в фокальной плоскости разрабатываемой системы являются фотоприемники. Суммарный объем тепловыделения в системе составляет 85,5 Вт. Система охлаждения должна обеспечивать функционирование фотоприемников в температурном диапазоне 173±5 К. Для этого используется система охлаждения с газообразным азотом в виде хладагента, циркулирующего через теплообменник.

Исходный теплообменник имел сложную технологию изготовления и большое количество паяных соединений. Из-за больших перепадов температур теплообменник мог оказаться ненадежным и выйти из строя, что и стало причиной осуществления модернизации.

Проанализированы различные способы осуществления модернизации в целях повышения надежности и технологичности, после чего принято решение остановиться на методе изготовления теплообменника с помощью 3D-печати, а конкретно селективного лазерного плавления. В связи с этим был выбран новый материал теплообменника и внесены необходимые конструктивные изменения

Выполненные тепловые расчеты доказали работоспособность модернизированного теплообменника. Далее теплообменник был изготовлен по выбранной технологии.

Литература

1. Бакланов А. И. Системы наблюдения и мониторинга: Учебное пособие. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. — 234 с.
2. Квитка В. Е., Лавренов В. А., Мастюгин С. М., Блинов В. Д., Шепелев А. С., Петров В. В. Анализ возможности создания охлаждаемых мозаичных фокальных плоскостей на отечественных комплектующих // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. — Сочи, 2022. — С. 95–103.

УДК 621.3.049

Перераспределение примеси на границе поликремний — кремний при моделировании диффузии из поликремния в TCAD при различных моделях диффузии

Федотов А. В., Самбурский Л. М.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
avfed05@mail.ru

Параметры границы раздела поликремний — кремний при моделировании термических процессов существенно зависят от выбора модели диффузии из имеющихся в TCAD. В данной работе на основе экспериментальных данных проведено сравнение имеющихся в TCAD моделей диффузии в применении к этим материалам и даны рекомендации к выбору модели.
Ключевые слова: Sentaurus TCAD; поликремний; моделирование; диффузия; коэффициент сегрегации.

Термическая диффузия примеси из высоколегированного поликремния в монокристаллический кремний — один из распространенных способов формирования pn-переходов и легированных областей в подложке. При моделировании данного процесса важно задать правильные механизмы процесса диффузии примеси из поликремния в кремний. В TCAD имеется большое количество математических моделей процесса диффузии примеси, которые между собой значительно отличаются в характеристиках границы раздела поликремний — кремний [1]. В частности, коэффициент перераспределения примеси на границе (коэффициент сегрегации) может отличаться на несколько порядков, отличается доза примеси, внедренная в кремний, глубина залегания формируемого pn-перехода и др.

В данной работе продемонстрированы различия между математическими моделями диффузии примеси из поликремния в кремний, существующими в TCAD, на границе раздела материалов, а также показано, какие модели демонстрируют наибольшее соответствие с экспериментальными данными процесса диффузии примеси.

На основании ВИМС-измерений профилей распределения примеси в тестовых структурах проведена работа по калибровке результатов моделирования с результатами эксперимента путем внедрения калибровочных коэффициентов в математическую модель диффузии (для заряженных и незаряженных пар междоузлие — примесный атом). Продемонстрирована воспроизводимость соответствия профилей распределения, получаемых в результате моделирования диффузии с помощью откалиброванной модели, с экспериментальными данными. Описаны рекомендации по использованию откалиброванной модели.

Литература

1. Sentaurus Process User Guide. Version H-2013.03, March 2013.

УДК 544.18

Моделирование поведения частицы в наноструктурах методом конечных разностей во временной области в программной среде Matlab

Форофонов И. А.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

Исследован метод FDTD, определено отличие данного метода от метода FEM и разработана программа по моделированию поведения частицы при движении в сторону одномерных (или двумерных) односторонних потенциальных барьерных структур в программной среде Matlab для наноэлектронной области применения.

Ключевые слова: метод конечных разностей (FDTD); метод конечных элементов (FEM); Matlab; частица; волна.

Finite-difference time-domain (FDTD) [1], возможно, самый простой, как концептуально, так и с точки зрения реализации, из полноволновых методов, используемых для решения проблем при моделировании электромагнитного излучения.

Finite element method (FEM) [3] — это общий численный метод решения дифференциальных уравнений в частных производных с двумя или тремя пространственными переменными. Чтобы решить задачу, FEM подразделяет большую систему на более мелкие и простые части, как раз и называемые конечными элементами. В методе конечных разностей аппроксимируются производные искомых функций, а в методе конечных элементов — само решение (т. е. зависимость искомых функций от пространственных координат и времени). В основе аппроксимации лежит идея упрощения сложных данных с целью получить более компактное представление. Аппроксимация может быть полезна, когда у вас есть много сложных функций и вы хотите найти более удобное представление для анализа.

Приведенные вычисления, использованные в работе, показывают, что FEM и FDTD даже при рассмотрении аппроксимации значительно отличаются друг от друга в пользу последнего с точки зрения удобства и точности.

Основываясь на технике воспроизводства алгоритма FDTD, предложенного Кейном Йи в 1966 году [4], рассмотрим более сложную систему моделирования поведения частицы (волны) в потенциальных барьерах: одностороннем и двустороннем.

1. Анализ поведения частицы в одном направлении, ограниченном барьером (рис. 1):

а) задаем количество шагов (steps), которое необходимо для задания времени (50 steps = 1 фс);

б) барьер начинается с 20 нм (т. е. 200 А). Вероятность расположения частицы не зависит от того, в каком месте расположен барьерный профиль. Вероятность зависит от направления движения частицы (волны), в этом случае идет слева направо. Дополнительно в программном коде были вычислены коэффициенты отражения и прохождения частицы через барьер;

в) идет построение как гауссовым распределением, так и синусоидальной функцией для показа универсальности кода метода FDTD в программной среде Matlab [5];

г) у синусоидальной функции временная составляющая неизменна в нулевой момент времени. Поэтому мнимая часть равна 0 (уходит пунктирная линия).

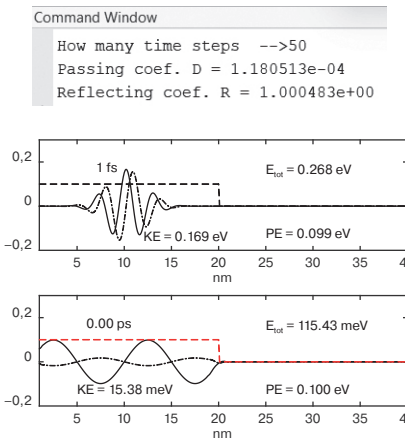


Рис. 1. Моделирование поведения частицы
в одномерном одностороннем потенциальном барьере

2. Аналогично предыдущему примеру можно изменить барьер, сделав двусторонний, как у транзисторов (рис. 2).

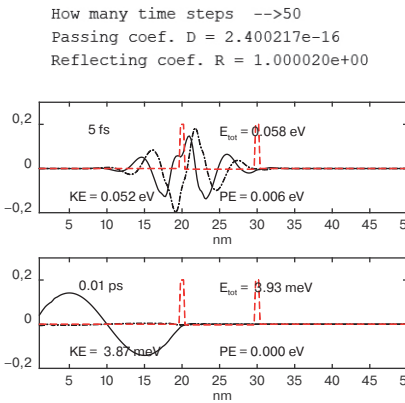


Рис. 2. Моделирование поведения частицы
в одномерном двустороннем потенциальном барьере

Был написан код в Matlab для моделирования распространения частицы (электрона) с использованием метода FDTD при движении в сторону области потенциальных барьеров [6]. FDTD в Matlab — эффективный инструмент для моделирования частиц в наноструктурах. Сравнение с FEM показало преимущество FDTD в решении задач с частицами и барьерами. Метод FDTD позволяет более точно описать поведение частиц в различных системах, включая потенциальные барьеры. Полученные решения важны для понимания процессов в нанохимии, микро- и наноэлектронике и могут способствовать разработке новых технологий и устройств.

Литература

1. Schneider J. B. Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method. Washington State University, 2023.
2. Скубачевский А. А., Хохлов Н. И. Численное решение уравнений Максвелла для моделирования распространения электромагнитных волн // Труды МФТИ, 2016. — Т. 8. — № 3 . — С. 121–130.
3. Taflove A., Hagness S. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method // London: Artech House, 2005. P. 51–80.
4. Kane Y. 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.
5. Harris F. E. Mathematics for Physical Science and Engineering. Symbolic Computing Applications in Maple and Mathematica // Amsterdam Elsevier, 2014.
6. Attaway D. C. MATLAB: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving // Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018.

УДК 621.396.67

Моделирование структур на криволинейных поверхностях

Чечеткин В. А., д. т. н., Шабунин С. Н.
УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
v.a.chechetkin@urfu.ru

Исследуются вопросы моделирования СВЧ-антенн на криволинейных поверхностях. Рассматривается влияние кривизны поверхности на характеристики излучения и проводится сравнение со структурами, расположенными на плоскости.

Ключевые слова: патч-антенна; криволинейная поверхность; диаграмма направленности.

Конформные антенны, повторяющие поверхность различных устройств, широко применяются в мобильной технике, носимой электронике, а также в транспортных системах, позволяя не нарушать аэродинамические свойства конструкций и не выходить за требуемые габаритные размеры. При этом круговые и дуговые антенные решетки позволяют обеспечить сканирование по всем азимутальным направлениям [1].

Численный анализ конструкций, состоящих из нескольких слоев диэлектрика, зачастую требует большого машинного времени и требователен к вычислительным ресурсам, особенно при проектировании устройств миллиметрового диапазона длин волн.

Применение аналитических методов анализа, основанных на аппарате тензорных функций Грина для слоистых структур, позволяет получить компактные выражения для нахождения поля излучения антенн, расположенных на плоских и криволинейных поверхностях [2]. Решение, полученное для структуры диэлектрических слоев, может быть использовано для быстрого пересчета поля отдельных антенн и антенных решеток в зависимости от их конфигурации. Анализ производится сразу во всем частотном диапазоне, поскольку все геометрические параметры выражаются в длинах волн.

Получены диаграммы направленности для патч-антенн, расположенных на проводящем цилиндре, покрытом диэлектриком, а также в присутствии диэлектрического антенного укрытия. Показано, что в зависимости от ориентации патч-антенны на цилиндре будет меняться форма диаграммы направленности.

Литература

1. Клыгач Д. С., Вахитов М. Г., Хашимов А. Б., Клыгач Д. С. Особенности динамических диаграмм направленности цилиндрических фазированных антенных решеток // Журнал радиоэлектроники, 2020. — № 3. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.3.12.
2. Chechetkin V., Knyazev S., Panchenko B., Shabunin S. Green's functions of layered structures in Cartesian, Spherical and Cylindrical Coordinates // Proceedings of the 13th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2019. Krakow, 2019.

УДК 621.371

К расчету электродинамических параметров несимметричной микрополосковой линии

Ярылков А. Д., Сазонов Е. С.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
yarlykov@mirea.ru, neo.sazonov2017@yandex.ru

Разработаны сверхбыстродействующие модели (СБМ) полосковых линий различного типа, позволяющие в широком диапазоне изменения их геометрических параметров, диэлектрической проницаемости подложки и частоты производить расчет коэффициента замедления и волнового сопротивления с высокой точностью при небольшом времени счета.
Ключевые слова: полосковые линии; электродинамические параметры; СВЧ-модули.

Современные подходы к разработке радиотехнических устройств на полосковых линиях сводятся к определению матрицы рассеяния с использованием метода декомпозиции, позволяющего производить ее расчет при помощи вспомогательных матриц передачи простейших (базовых) полосковых элементов, на которые расчленяется устройство. Для определения матриц рассеяния и передачи базовых элементов, а также при расчете топологии всего устройства СВЧ в целом необходимо предварительно производить расчет основных электродинамических параметров полосковых линий передачи, к которым следует отнести коэффициент замедления и волновое сопротивление. Однако при этом обнаруживается **актуальная научная проблема**, заключающаяся в том, что используемые в коммерческих программах приближенные (эвристические) методы для расчета основных электродинамических параметров полосковых линий значительно снижают точность полученных результатов, а строгие электродинамические методы требуют значительных временных затрат и высокой квалификации инженера-разработчика. Поэтому актуальной задачей является разработка сверхбыстродействующих моделей (СБМ) полосковых линий различного типа, позволяющих в широком диапазоне изменения их геометрических параметров, диэлектрической проницаемости подложки и частоты производить расчет коэффициента замедления и волнового сопротивления с высокой точностью при небольшом времени счета.

В начале статьи рассмотривается **математическая модель экранированной микрополосковой линии с использованием проекционного подхода**.

Решение задачи о собственных волнах экранированной микрополосковой линии решается в два этапа. На первом этапе решается задача возбуждения волновода с двухслойным диэлектриком поверхностным током на полосковом проводнике. В результате напряженность электрического и магнитного поля внутри идеально проводящего экрана можно представить как векторные функции в виде бесконечных рядов Фурье, которые:

1) удовлетворяют однородной системе уравнений электродинамики для комплексных амплитуд напряженностей поля;
2) удовлетворяют граничным условиям электродинамики на идеально проводящих стенках экрана;

3) обеспечивают непрерывность тангенциальной составляющей напряженности электрического поля на границе областей *I* и *II*;
4) удовлетворяют граничному условию для тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на границе областей *I* и *II*.

При этом полученные векторные функции дают решение задачи о собственных волнах через поверхностную плотность тока на полосковом проводнике:

$$\vec{\eta}(x,z) = \vec{\eta}(x)e^{-i\Gamma z},$$

где Г — постоянная распространения.

Из условия существования нетривиального решения однородной СЛАУ (равенства нулю ее определителя) в первом приближении получено дисперсионное уравнение, из которого определяется коэффициент замедления n_0 МПЛ:

$$\sum_{m=1}^{\infty}\left[\frac{1}{\chi_m^2}\left(n_0^2 G_m^{Э} + \alpha_m^2 G_m^{M}\right)\right] J_0^2(m\alpha)\sin^2(m\beta) = 0.$$

Используя выражения для собственных волн, можно получить следующее выражение для волнового сопротивления МПЛ:

$$Z_0 = \frac{240\pi}{k_0 a} n_0 \sum_{m=1}^{\infty}\left[-\left(n_0^2 (G_m^{Э})' + \alpha_m^2 (G_m^{M})'\right) + \frac{\alpha_m^2}{\chi_m^2}\left(G_m^{M} - G_m^{Э}\right)\right]\cdot\frac{1}{\chi_m^2} J_0^2(m\alpha)\sin^2(m\beta),$$

где $(G_m^{Э,M})'$ — производная функции $G_m^{Э,M}$ по n_0^2.

В результате анализа численных результатов установлено, что размеры экрана практически не влияют на точность расчета электродинамических параметров. При $a/h \geq 200$, $b \geq a/2$ результаты расчета n_0 и Z_0 совпадают с точностью до 4–5 значащих цифр с результатами расчета для открытой линии.

Вторая часть статьи посвящена математической модели микрополосковой линии с узким полосковым проводником в квазистатическом приближении.

В [1] получено следующее выражение для волнового сопротивления Z экранированной микрополосковой линии с узким полосковым проводником в квазистатическом приближении:

$$Z = \frac{240}{n}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{m}\frac{\sin^2(m\beta)}{cth\left(m\pi\frac{h}{a}\right) + cth\left(m\pi\frac{b-h}{a}\right)} J_0^2(m\alpha),$$

где n — коэффициент замедления, $\alpha = \frac{\pi}{2}\frac{W}{a}$, $\beta = \alpha\left(1 + \frac{S}{W}\right)$.

Были выявлены зависимости между электродинамическими параметрами и характеристиками полосковой линии. Исходя из этих зависимостей, можно определить параметры полосковой линии, необходимой нам для разработки архитектуры будущего устройства, и определить погрешность в работе данного устройства. Данный анализ достаточно точен и не требует долгих и сложных расчетов. Помимо ускорения расчетов электродинамических параметров, удалось получить низкое влияние погрешности с уменьшением габаритов микрополосковой линии.

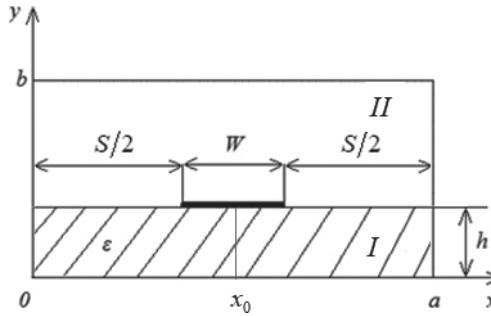


Рис. 1. Поперечное сечение экранированной микрополосковой линии

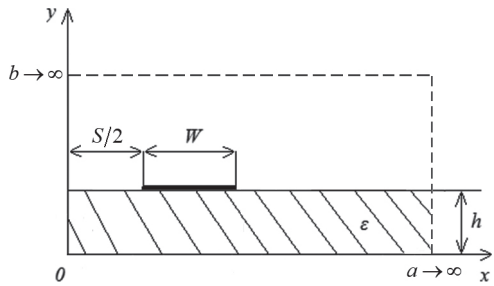


Рис. 2. Поперечное сечение линии

Литература

1. Коваленко А. Н., Ярлыков А. Д. Аналитические выражения для электродинамических параметров экранированной микрополосковой линии // Российский технологический журнал, 2021. — Т. 9. — № 4 (42). — С. 68–76.
2. Костин М. С., Ярлыков А. Д. Электродинамика, радиоволновые процессы и технологии: Учебное пособие. — Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. — С. 123–131.
3. Костин М. С., Ярлыков А. Д. Устройства и модули сверхвысоких частот: Учебник. — Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. — С. 124–142.
4. Коваленко А. Н., Ярлыков А. Д. Повышение эффективности проекционных моделей полосковых линий // Радиотехника и электроника, 2021. — Т. 66. — № 9. — С. 837–844.
5. Коваленко А. Н., Ярлыков А. Д. Математическое моделирование открытой микрополосковой линии // Радиотехника и электроника, 2022. — Т. 67. — № 11. — С. 1096–1102.
6. Коваленко А. Н., Ярлыков А. Д. К расчету дисперсионных характеристик экранированной микрополосковой линии // Радиотехника и электроника, 2024. — Т. 69. — № 4 (в печати).

7. Коваленко А. Н., Оводенко Г. Б., Ярлыков А. Д. Математическая модель экранированной микрополосковой линии // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения, 2018. — Т. 18. — № 3. — С. 552–556.
8. Коваленко А. Н., Ярлыков А. Д. Численный анализ связанных микрополосковых линий // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «Радиоинфоком-2019». Сборник научных статей IV Международной научно-практической конференции. — М., 2019. — С. 230–235.
9. Коваленко А. Н., Ярлыков А. Д. Численный анализ экранированной микрополосковой линии // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «Радиоинфоком-2021». Сборник научных статей V Международной научно-практической конференции. — Москва, 2021. — С. 331–334.
10. Шипорин В. М., Ярлыков А. Д. Границы применимости аналитических выражений для электродинамических параметров микрополосковой линии в квазистатическом приближении // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2023»). Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции. — Москва, 2023. — С. 304–308.

УДК 621.318.43

Масштабируемая модель круглой спиральной катушки индуктивности для проектирования МИС СВЧ по технологии GaAs

Луняков А. Е., Дудинов К. В., Ефимов А. С.
АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
termitko62@mail.ru

В данной работе рассмотрены результаты построения масштабируемой модели круглой спиральной катушки индуктивности по технологии GaAs, интегрированной в библиотеку пассивных и активных элементов, необходимой для проектирования МИС СВЧ. Результаты сравнения расчета СВЧ-характеристик моделей с измерениями тестовых образцов показали максимальное расхождение параметров ЭС менее 9 % в диапазоне частот до 50 ГГц включительно.
Ключевые слова: катушка индуктивности; арсенид галлия; библиотека элементов; монолитная интегральная схема; СВЧ; электромагнитное моделирование; параметрическая модель.

Проектирование твердотельных монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ требует наличия пользовательских библиотек пассивных и активных элементов. Элементы таких библиотек должны иметь достаточно точную математическую модель и содержать топологию с возможностью изменения геометрических параметров.

В данной работе представлены этапы построения масштабируемой модели круглой спиральной катушки индуктивности для GaAs-технологии, реализованной в АО «НПП» «Исток» им. Шокина». Масштабируемая модель включает схемотехническое и топологическое решения. Схемотехническое решение представлено эквивалентной схемой (ЭС), а топологическое — в виде макроса для автоматического построения топологии.

Катушка представляет собой круглую спираль из системы металлов Ti-Pt-Au-Ti (MET1 — верхняя металлизация). Для присоединения к внутреннему витку спирали изготавливается контактная линия (MET2 — нижняя металлизация). Изоляция между MET1 и MET2 обеспечивается слоем системы диэлектриков, а контакт обеспечивается посредством травления окна в диэлектриках.

В данной работе применена П-образная ЭС модели монолитной катушки индуктивности, представленная на рис. 1 [1].

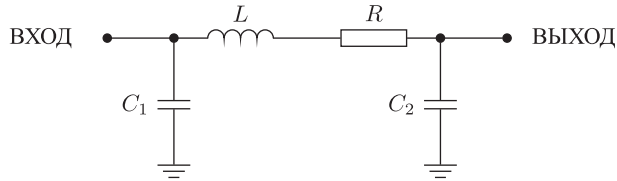


Рис. 1. ЭС спиральной катушки индуктивности

Эквивалентная схема включает следующие элементы: L — индуктивность (основной параметр), R — сопротивление (потери в проводнике), C_1 — емкость (между MET1 и подложкой), C_2 — емкость (между MET2 и подложкой).

Основные параметры для топологического проектирования:

- L — индуктивность (0,5–25 нГн);
- Rad — внутренний радиус (15–25 мкм);
- W — ширина линии (5–25 мкм);
- G — расстояние между витками (5–25 мкм).

Также был произведен анализ возможных выражений для связи геометрических (топологических) параметров с электрическими характеристиками спиральной катушки индуктивности, показывающих наибольшую сходимость с результатами ЭМ-расчета [2, 3].

Для верификации параметрической модели спиральной катушки индуктивности были изготовлены тестовые модули с различными геометрическими параметрами. На рис. 2 представлены зависимости мнимых частей входного импеданса от частоты тестовых модулей катушек индуктивности.

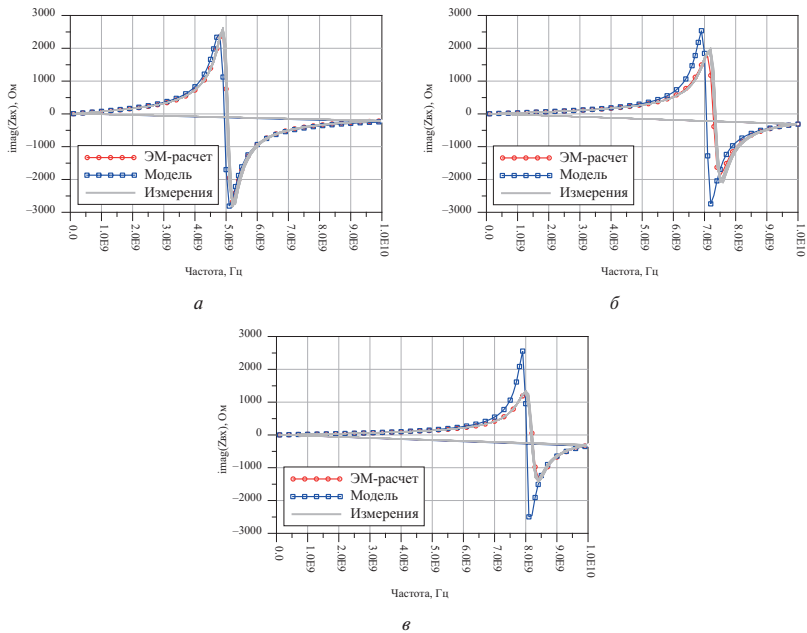


Рис. 2. Графики зависимости мнимых частей входного импеданса от частоты измерений, модели и ЭМ-расчета тестовых модулей

Из графиков зависимостей мнимых частей входного импеданса от частоты видно, что для разных измерений тестовых модулей, разработанной масштабируемой

модели и ЭМ-моделей максимальный сдвиг резонансных частот составляет 300 МГц.

В работе представлены результаты построения параметрического модели круглой спиральной катушки индуктивности по технологии GaAs. Диапазон изменения номинала индуктивности составляет 0,5–25 нГн. Для проверки точности модели изготовлены тестовые модули по технологии GaAs в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Сравнение параметров модели с параметрами тестовых модулей показало, что максимальное расхождение параметров ЭС составляет менее 9 % в диапазоне частот до 50 ГГц. Полученные значения точности модели обеспечивают возможность более корректного схемотехнического проектирования МИС СВЧ.

Литература

1. Shih Y. C., Pao C. K., Itoh T. A broadband parameter extraction technique for the equalent circuit of planar inductors // IEEE Microwawe Symposium Degest, 1992. Vol. 3. P. 1345–1348.
2. Neguyen N. M. and Meyer R. G. Si IC-Compatible Inductors and IC Passive Filters // IEEE J. Solid-State Circuits, 1990. Vol. 25. P. 1028–1031.
3. Wheeler H. A. Simple inductance formulas for radio coils // Proc. IRE, 1928. Vol. 16. № 10. P. 1398–1400.

УДК 539.216.2

Новый подход интеграции гетероструктур AlGaN/GaN и алмазного теплоотвода

Колобкова Е. М., Езубченко И. С., к. ф.-м. н. Занавескин М. Л.
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
kolobkovaevg@gmail.com

Предложена новая технология интеграции нитрида галлия и алмазного теплоотвода, которая заключается в уникальной методике формирования подложек из поликристаллического алмаза с тонким слоем кремния и последующей нитридной эпитаксии. Данный подход позволяет понизить температуру активной области транзистора на 50 °C по сравнению с аналогичными элементами HEMT GaN/SiC.

Ключевые слова: GaN HEMT; нитридные гетероструктуры; алмаз; кремний; аммиачная молекулярно-лучевая эпитаксия.

Темпы технического прогресса в области телекоммуникаций, систем связи и передачи сигнала требуют новых разработок в микроэлектронике, которые бы удовлетворяли растущий запрос на высокие рабочие частоты и высокие удельные мощности выходного сигнала. Для решения этих задач наиболее перспективны нитриды металлов третьей группы и их твердые растворы. Их физико-химические свойства обеспечивают высокую удельную мощность и КПД, надежность работы устройств в непрерывном режиме работы. Однако при работе на высоких мощностях нитридные сверхвысокочастотные (СВЧ) устройства перегреваются и требуют обеспечения эффективного теплоотвода из активной области транзистора. Классические материалы подложек для GaN вроде кремния и сапфира обладают слишком низкой теплопроводностью, что ограничивает потенциал этих технологий.

С 2000-х годов исследователи осваивают новый тип СВЧ-устройств — нитрид-галлиевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) с алмазным теплоотводом. Несмотря на то что данной тематике было посвящено много публикаций, на данный момент не существует общепринятого подхода к формированию теплоотвода из алмаза для нитридных гетероструктур [1].

Нашей научной группой был предложен альтернативный способ создания теплоотвода на основе алмаза для GaN HEMT силовой и СВЧ электроники [2]. Новая технология состоит в формировании уникальных составных подложек поликристаллического алмаза с тонким слоем монокристаллического кремния Si (111) и последующем синтезе GaN-гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Экспериментально определены условия контролируемой нитридизации поверхности кремниевого слоя на подложках нового типа в процессе эпитаксии GaN. Показано, что растягивающие напряжения в нитридных пленках можно скомпенсировать сжимающими, накопленными с помощью архитектуры с тремя последовательно выращенными вставками состава AlN/AlGaN/$Al_{0,365}Ga_{0,635}N$, что решает проблему значительных деформаций и растрескивания под действием механических напряжений в эпитаксиальных слоях нитридных гетероструктур. В результате получены гетероструктуры с двумерным электронным газом, электрофизические

характеристики которого находились на уровне приборного качества (концентрация носителей $1{,}1 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$, подвижность носителей 1600 см^2/В·с, слоевое сопротивление 330 Ом/кв).

Термометрические измерения при рассеиваемой мощности выше 7 Вт/мм показали, что использование нового типа подложек позволяет понизить температуру активной области более чем на 50 °С по сравнению с подложками карбида кремния. Предложенный подход является перспективным для увеличения выходной мощности устройств на основе нитрида галлия, а также для увеличения их надежности.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. Mendes J. C., Liehr M., Li C. Diamond/GaN HEMTs: Where from and Where to? // Materials, 2022. Vol. 15. P. 415–461.
2. Chernykh M. Y., Andreev A. A., Ezubchenko I. S. et al. GaN-based heterostructures with CVD diamond heat sinks: A new fabrication approach towards efficient electronic devices // Appl. Mater. Today, 2022. Vol. 26. P. 101338.

УДК 621.382.323

Нормально-закрытый GaN силовой транзистор на рабочие напряжения до 100 В

Гребенников В. А.[1,2], Желаннов А. В.[1], Баранов Г. Б.[3,4], Леоненков Е. И.[3,4], Дорофеев А. А.[3,4]

[1] АО «ОКБ-Планета»
11810446, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13А
grebennikovva@okbplaneta.ru
[2] Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого
173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41
[3] ООО «НИИМЭ-МД»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
[4] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

В данной работе представлены результаты разработки отечественного силового транзистора на основе гетероструктуры p-GaN/AlGaN/GaN/Si. Оптимизированы процессы селективного плазмохимического травления p-GaN и процесс формирования низкоомных омических контактов. Разработана топология для рабочего тока до 10 А и рабочее напряжение до 100 В. Представлены результаты измерений изготовленных транзисторов.

Ключевые слова: p-GaN; E-HEMT; нормально-закрытый транзистор; p-GaN/AlGaN/GaN/Si-гетероструктуры; селективное плазмохимическое травление; быстрый термический отжиг.

Нормально-закрытые (e-mode) HEMT на основе гетероперехода AlGaN/GaN благодаря своим уникальным характеристикам в части соотношения V_{br}&R_{on}, потерь и скорости переключения активно завоевывают рынки потребительской и индустриальной электроники в классах устройств 100 и 650 В [1]. Разработка отечественной технологии изготовления GaN силовых транзисторов носит стратегический характер, в частности, для реализации программ развития электрического транспорта, реализуемых госкорпорацией «Росатом».

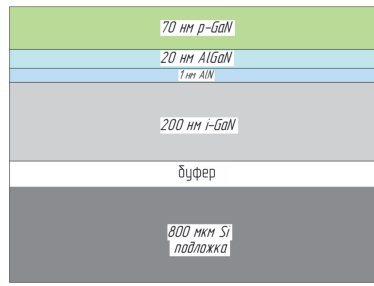


Рис. 1. Конструкция p-GaN/$al_{0,25}ga_{0,75}$N/GaN/Si-гетероструктуры

В качестве исходного материала в исследовании использовалась гетероэпитаксиальная структура p-GaN/$al_{0,25}ga_{0,75}$N/GaN, выращенная на подложке из кремния (111), диаметром 100 мм (рис. 1).

На рис. 2 представлена фотография кристалла, разработанного p-GaN e-mode HEMT. Ширина затвора транзистора составляет W = 65 мм (130 единичных затворов шириной 500 мкм каждый), длина p-GaN-затвора Lз = 1 мкм, расстояние сток-исток — 15 мкм. Отработан технологический процесс формирования затвора — селективное травление p-GaN-слоя. Травление проводилось на установке плазмохимического травления ICP в атмосфере Cl_2-Ar-O_2 (60/10/5 sccm) при значениях ICP и RF мощности 100 и 60 Вт соответственно. Давление в камере составляло 1,2 Па, температура подложки — 0 °C. Данный режим обеспечил скорость травления 30 нм/мин и селективность p-GaN/AlGaN, равную 15. Для формирования омического контакта использована система Ti/Al/Mo/Au 15/60/55/50 нм. Быстрый термический отжиг проводился атмосфере гелия при температуре 780 °C в течение 60 сек. с предварительным прогревом 420 °C 40 сек., получены омические контакты с сопротивлением менее 0,3 Ом·мм.

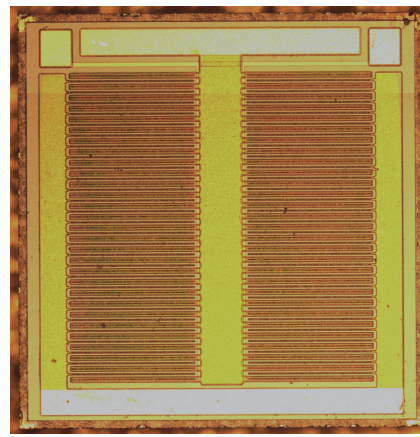


Рис. 2. Кристалл p-GaN e-mode HEMT. W_g = 65 мм, размер кристалла 2×2 мм

Для измерения кристаллы транзисторов были установлены в металлокерамические корпуса (рис. 3).

Измерения проводились на характериографе Л2-100 ТЕКО. Результаты измерений: ток сток-исток I_{cmax} = 13 А (импульсный режим, длительность импульса около 5 миллисекунд, напряжение на стоке 5 В, напряжение на затворе 6 В), сопротивление сток-исток открытого транзистора — 0,33 Ом, пробивное напряжение сток-исток — более 300 В (при напряжении на затворе 0 В).

Также были измерены (при токе стока 10 А):

- время открытия транзистора — 2,4 нс;
- время закрытия транзистора — 2,6 нс;
- время задержки — 5,6 нс.

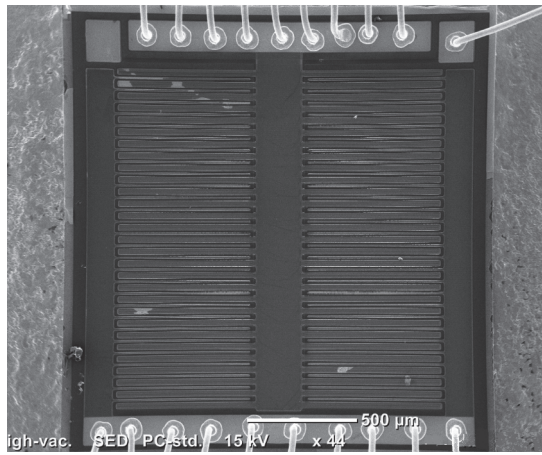


Рис. 3. Кристалл p-GaN HEMT в металлокерамическом корпусе МК КТ-95С-1

Литература

1. Миядзава Н. и др.Высокомощные HEMT-транзисторы на основе нитрида галлия S-диапазона мощностью 600 Вт и X-диапазона мощностью 200 Вт для импульсного режима // СВЧ электроника, 2018. — № 1. — С. 4–8.

УДК 537.311.322

Несплавные омические контакты к структурам HEMT GaN

Добров А. В.[1], Рогачёв И. А.[1], Орехова О. А.[1], Котосонова А. В.[1], Дудинов К. В.[1], Красник В. А.[1], Каргин Н. И.[2], Цацульников А. Ф.[3], Егоркин В. И.[4]

[1] АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
DobrovBM@mail.ru
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
[3] НТЦ микроэлектроники РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
[4] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Исследованы технологические особенности формирования несплавных омических контактов к GaN HEMT с ультратонким барьерным слоем AlGaN на подложках Si и SiC. Получены удельные сопротивления несплавных омических контактов 0,15 Ом·мм, изготовлен мощный транзистор X-диапазона.

Ключевые слова: омические контакты; СВЧ; нитрид галлия; широкозонные полупроводники; MBE; MOCVD GaN HEMT.

Требования к электронной компонентной базе (ЭКБ) СВЧ ускоренно растут каждый год. Одной из актуальных задач по развитию отечественной СВЧ-микроэлектроники является развитие технологии изготовления полупроводниковых приборов на основе GaN. Одной из актуальных задач производства приборов на основе нитрида галлия, работающих в частотных диапазонах X, Ku и выше, является получение удельного сопротивления омических контактов порядка 0,1 Ом·мм, что обеспечивает более высокие КПД, мощностные и шумовые характеристики приборов [1].

В данной работе представлена технология получения омических контактов к GaN HEMT с применением селективного эпитаксиального роста сильнолегированных слоев GaN и дальнейшего изготовления HEMT, реализованная в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Гетероструктуры с ультратонким барьерным слоем AlGaN были изготовлены в НТЦ микроэлектроники РАН методом MOCVD. Селективный эпитаксиальный рост проводился методами MBE (МИЭТ) и MOCVD (НТЦ микроэлектроники РАН).

В качестве исходного материала была использована гетероструктура с тонким барьерным слоем AlGaN (15 нм) и AlN (1 нм). Несплавной омический контакт представляет собой систему металлов, нанесенную на область с селективно выращенным сильнолегированным слоем GaN [2]. Для получения оптимальных параметров сопротивления перед ростом эпитаксиального слоя N++ GaN необходимо удалить барьерные слои, содержащие Al [3]. Был проведен эксперимент по исследованию влияния глубины травления барьерных слоев на удельное сопротивление омических контактов. Процесс формирования несплавного омического контакта представлен на рис. 1.

Измерения параметров удельного контактного сопротивления проходили с использованием метода длинной линии (TLM): сопротивление активного слоя измерялось методом Ван дер Пау. Исходя из параметра сопротивления активного

слоя, определялось контактное сопротивление омических контактов. Результаты представлены на рис. 2.

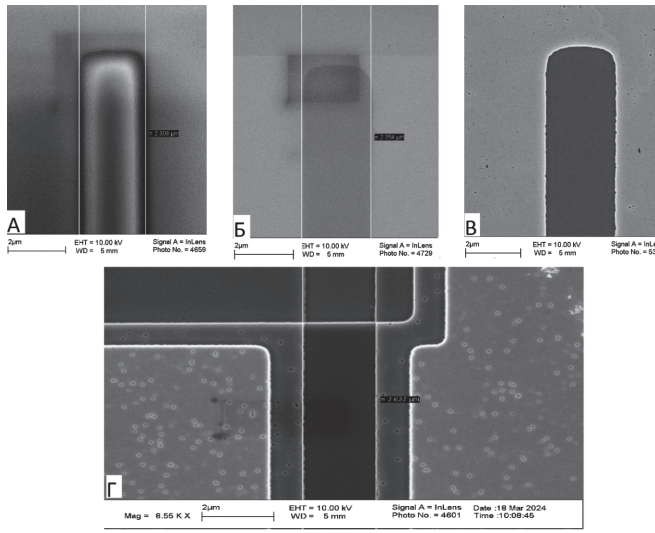


Рис. 1. Процесс формирования несплавного омического контакта:
А — формирование маски; Б — травление AlGaN/AlN; В — выращивание N++ GaN;
Г — напыление металла и травление мезаизоляции

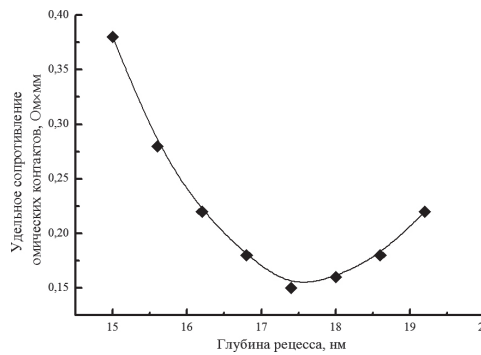


Рис. 2. График зависимости удельного омического сопротивления от глубины травления AlGaN/AlN

Был изготовлен опытный образец (рис. 3) мощного дискретного СВЧ-транзистора X-диапазона с удельной выходной мощностью 4 Вт/мм, коэффициентом усиления в 15 дБ и КПД 48 %, измеренных на частоте 12 ГГц (рис. 4).

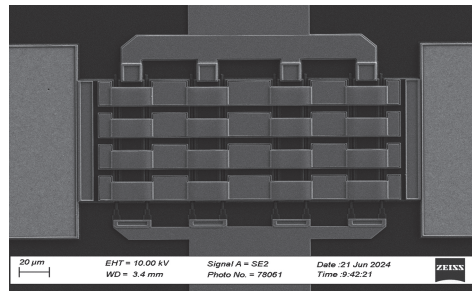


Рис. 3. Фотография опытного образца мощного дискретного GaN HEMT-транзистора, работающего в X-диапазоне частот

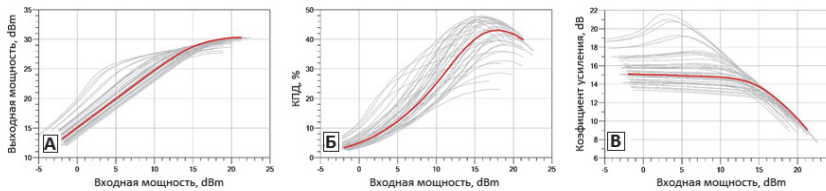


Рис. 4. Измеренные параметры: А — выходная мощность; Б — КПД; В — коэффициент усиления

В работе представлена технология формирования несплавной системы омических контактов с низким значением удельного сопротивления порядка 0,15 Ом·мм. Показана зависимость глубины травления приповерхностных барьерных слоев гетероструктуры от значений удельного сопротивления. Изготовлены и измерены опытные мощные дискретные СВЧ-транзисторы X-диапазона с удельной выходной мощностью 4 Вт/мм, коэффициентом усиления в 15 дБ и КПД 48 %, полученные на частоте 12 ГГц. Представленные в работе результаты позволяют создавать ЭКБ СВЧ-приборов на HEMT GaN на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина.»

Литература

1. Çakmak H., Öztürk M., Özbay E. and İmer B. Nonalloyed Ohmic Contacts in AlGaN/GaN HEMTs With MOCVD Regrowth of InGaN for Ka-Band Applications // IEEE Transactions on Electron Devices, 2021. Vol. 68. № 3. P. 1006–1010. DOI: 10.1109/TED.2021.3050740.
2. Song B. et al. Ultralow-Leakage AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors on Si With Non-Alloyed Regrown Ohmic Contacts // IEEE Electron Device Letters, Jan. 2016. Vol. 37. № 1. P. 16–19. DOI: 10.1109/LED.2015.2497252.
3. Toprak A., Özbay E. Nonalloyed ohmic contact development with n+ InGaN regrowth method and analysis of its effect on AlGaN/GaN HEMT devices // Microelectronics Journal, 2023. Vol. 135. 105762. ISSN 1879-2391. URL: https://doi.org/10.1016/j.mejo.2023.105762.

УДК 538.91

Исследование тенденций развития конструкций силовых вертикальных GaN-транзисторов

Беляев А. О.[1,2], к. ф.-м. н., Баранов Г. В.[2,3], Дорофеев А. А., Панасенко П. В.
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
abelyaev@niime.ru
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] ООО «НИИМЭ-МД»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Рассмотрены ключевые особенности, проблемы и перспективы создания силовых вертикальных GaN-транзисторов на собственной подложке. С использованием средств приборно-технологического моделирования разработаны, исследованы и верифицированы модели MOSFET и FinFET конструкции транзисторов с рабочим напряжением 1,2 кВ.
Ключевые слова: силовой транзистор; trench MOSFET; GaN; FinFET.

Среди множества материалов с широкой запрещенной зоной нитрид галлия (GaN) стал ключевым материалом для создания силовых устройств благодаря балансу электрофизических свойств и технологичности [1]. Пьезоэлектрическая природа нитрида галлия позволяет создавать транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT — high electron mobility transistor) в сочетании с высокой концентрацией носителей заряда в канале. Минимальное значение входной емкости и низкое сопротивление затвора обуславливают скорость переключения транзистора на уровне единиц наносекунд, что позволяет кратно снизить форм-фактор источников питания на его основе. Однако горизонтальная конструкция транзистора ограничивает диапазон рабочих напряжений до 650 В из-за технологических сложностей с созданием толстых непроводящих эпитаксиальных слоев твердых растворов $Al_xGa_{1-x}N$ на гетерородных подложках (Si, SiC, Al_2O_3). Вертикальная конструкция силового транзистора ДМОП-типа, известная из кремниевой технологии, способна обеспечить существенное расширение области рабочих напряжений. Продолжительное время сдерживающим фактором в развитии данного конструктивно-технологического направления являлась недоступность собственных подложек GaN. Однако в настоящее время достигнут существенный прогресс и доступны низкорезистивные подложки GaN диаметром 100 мм, что определяет актуальность данного направления.

В настоящей работе рассмотрены конструктивные особенности силовых вертикальных GaN-транзисторов. В работе представлены анализ и сравнение таких конструкций, как CAVET, trench MOSFET, FinFET, JFET и др. [2]. Несмотря на широкое разнообразие вертикальных структур, именно trench MOSFET и FinFET демонстрируют наилучшие характеристики в совокупности с технологичностью изготовления.

С использованием средств приборно-технологического моделирования были разработаны и верифицированы модели trench MOSFET и FinFET, а также

предложены конструктивные подходы для улучшения их электрических характеристик.

Литература

1. Баранов Г. В., Беляев А. О., Дорофеев А. А. и др. Анализ приборных требований к гетероэпитаксиальным структурам AlGaN/GaN на Si для силовой и СВЧ ЭКБ // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 4 (188). — С. 5–17. — DOI: 10.7868/S2410993222040017. EDN JERFSF.
2. Langpoklakpam C. et al. Vertical GaN MOSFET power devices // Micromachines, 2023. Vol. 14. № 10. P. 1937.

УДК 538.91

Глубокие ловушки и диффузионные длины носителей заряда в гетеропереходах NiO/β-Ga_2O_3

Поляков А. Я.[1], Якимов Е. Б.[1], Саранин Д. С.[1], Черных А. В.[1], Васильев А. А.[1], Гостищев П.[1], Кочкова А. И.[1], Алексанян Л. А.[1], Матрос Н. Р.[1], Щемеров И. В.[1], Пиртон С. Дж.[2]

[1] *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
kolyamatro@gmail.com
[2] *Университет Флориды*
Gainesville, FL 32611, Соединенные Штаты

Исследованы гетеропереходы NiO/Ga_2O_3 и диоды Шоттки, изготовленные на одинаковых эпиструктурах. Приведена характеризация структур с точки зрения электрических свойств и диффузионных длин неравновесных носителей заряда. Показано снижение обратного тока в гетеропереходе по сравнению с диодом Шоттки.

Ключевые слова: β-Ga_2O_3; гетеропереход; диод Шоттки; глубокие уровни в запрещенной зоне; выпрямитель.

Оксид галлия бета-полиморфа — это полупроводник с шириной запрещенной зоны около 4,8 эВ, достаточно высокой подвижностью электронов, высокой скоростью насыщения электронов, что делает его очень привлекательным для создания силовых приборов с характеристиками, потенциально сильно превышающими характеристики уже хорошо освоенных широкозонных полупроводников — карбида кремния, нитрида галлия. Однако одним из факторов, сдерживающих использование оксида галлия, является трудность создания в нем *p*-типа проводимости, что позволяет создавать на его основе только монополярные устройства, такие как диоды Шоттки и полевые транзисторы.

Одним из возможных решений может стать использование гетеропереходов с материалами, демонстрирующими значительную проводимость *p*-типа. Для использования в таких структурах были рассмотрены некоторые оксиды переходных металлов, такие как NiO, Cu_2O, Ag_2O и $ZnCo_2O$. Наиболее перспективным из них является NiO. В данной работе исследуется возможная природа сигналов, похожих на дырочные ловушки, в гетеропереходе NiO/Ga_2O_3 и процессы, связанные с диффузией носителей заряда в таких структурах [1].

Эксперименты проводились на эпитаксиальных структурах β-Ga_2O_3 *n*-типа с ориентацией (001) и толщиной 10 мкм, выращенных методом галоидной газофазной эпитаксии (HVPE) на n+ Sn-легированных подложках толщиной 600 мкм. Концентрация нескомпенсированных мелких доноров в пленках составляла $2{,}6 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$, а концентрация электронов в подложке — $3 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. Верхние никелевые контакты Шоттки диаметром 1 мм (толщиной 20 нм) были осаждены методом электронно-лучевого напыления при комнатной температуре. Для выращивания NiO в структурах с гетеропереходом использовался процесс ионно-лучевого напыления.

Полученные результаты подтверждают потенциальное преимущество гетеропереходов NiO/Ga_2O_3 по сравнению с их аналогами — диодами Шоттки. Обратный

ток ниже из-за более высокого барьера для потока электронов на границе гетероперехода, а последовательное сопротивление не сильно отличается от диода Шоттки и уменьшается с ростом температуры. В *p-n*-переходах, кроме того, обратный ток регулируется потоком неосновных носителей. В гетеропереходах NiO/Ga_2O_3 энергетические барьеры для неосновных носителей (электронов в NiO и дырок в Ga_2O_3) отсутствуют, поскольку выравнивание энергетических зон для этого гетероперехода относится к типу II. Поэтому низкий обратный ток будет обусловлен главным образом тем, что концентрация неосновных носителей в широкозонных полупроводниках очень мала. Длина диффузии неравновесных носителей заряда в части *n*-типа NiO/Ga_2O_3 ГП выше, чем в диоде Шоттки, приготовленном на той же пластине, что коррелирует с меньшей концентрацией ловушек E2* на *n*-стороне ГП по сравнению с диодом Шоттки. Спектры адмиттанса NiO/Ga_2O_3 ГП демонстрируют наличие значительного уменьшения емкости с понижением температуры. Энергия активации этого процесса, определенная из спектроскопии адмиттанса, составляет 0,17–0,19 эВ. Этот процесс связан с вымораживанием проводимости в слое p-NiO [1].

Полученные данные могут быть использованы для оптимизации структур выпрямителей на основе оксида галлия.

Работа выполнена в рамках соглашения № 075-15-2022-1113 от 28 июня 2022 г. о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидий в целях реализации федерального проекта «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок», научного исследования «Новые радиационные явления в оксиде галлия и их применение в приборах».

Литература

1. Polyakov A.Y. et al. Trap states and carrier diffusion lengths in $NiO/\beta\text{-}Ga_2O_3$ heterojunctions // Journal of Applied Physics, 2024. Vol. 135. № 16.

УДК 53.088.7

К вопросу определения фазовых сдвигов в смесителе

Сердюков В. В.
Кубанский государственный университет
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149
serdyukov-vladimir1996@mail.ru

Проблемой является выявление погрешностей измерений абсолютных фазовых сдвигов, возникнувших из-за нелинейности. Цель — решение проблемы нелинейности. Результат — метод уменьшения значения погрешностей. Практическая значимость — снижение погрешностей измерений абсолютных фазовых сдвигов.
Ключевые слова: смеситель СВЧ-сигналов; сдвиг фаз; гетеродинное преобразование частоты.

В настоящее время разработаны шесть способов определения сдвигов фаз, возникающих в смесителе при гетеродинном преобразовании частоты:

- метод трех смесителей [1], когда последовательно измеряются сдвиги фаз трех смесителей, один из которых испытуемый, а два других вспомогательные, с последующим вычислением результатов измерений сдвига фаз испытуемого смесителя [2];
- метод двойного преобразования частоты [2], в котором с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) измеряют общий сдвиг фаз двух последовательно соединенных смесителей, применяемых один в прямом, а второй в обратном направлениях, с общим гетеродином; полученный результат делят пополам и приписывают каждому их смесителей;
- метод отражения [2], при котором через смеситель пропускается сигнал в прямом направлении, который на его выходе отражается от нагрузки с известным коэффициентом отражения и возвращается через смеситель на его вход, где измеряют сдвиг фазы между прямым и отраженным сигналами, который равен сдвигу фаз [2];
- метод фазовой опоры, в котором используют ВАЦ, содержащий генератор комбинационных частот, вырабатывающих гармоники путем умножения частоты кварцевого генератора 10 МГц с дискретностью гармоник 10 МГц, которые используют для получения испытательного сигнала, смесителя и сигнала ПЧ, который сравнивают по фазе с выходным сигналом ПЧ, в результате чего измеряют фазовый сдвиг;
- сигнал гетеродина также сравнивают с надлежащей ему гармоникой и измеряют фазовый сдвиг, после вычитают это значение из данного измерения сигнала ПЧ и вносят его в сигнал ПЧ. Сигналы всех гармоник когерентны, поэтому значения соответствуют фазе сигнала кварцевого генератора, умноженной на номер гармоники.

Фазы гармоник отличаются на величину $\Delta\varphi$П, разную для каждой гармоники, что является погрешностью, так как измеряется не истинный фазовый сдвиг, а реплика, отличающаяся от истинного сдвига фаз на величину $\Delta\varphi$П. Поэтому необходима таблица коррекции сдвигов фаз с дискретностью, равной частоте кварцевого генератора.

Методы имеют недостатки. В первом при измерении возникает погрешность из-за согласования входных сопротивлений смесителей. Погрешность измерения фазы при КСВ входов смесителей может достигать 10–15°. Третий метод применим для измерения параметров смесителей и фазы, только когда потери преобразования во всех направлениях равны и не превышают 10 дБ. Второй метод пригоден только для измерения двух идентичных смесителей и непригоден для последовательного соединения с разными потерями преобразования. При последовательном соединении амплитуда сигнала на входе второго смесителя будет меньше, чем амплитуда первого, на величину его потерь преобразования, что приводит к разным сдвигам фаз у обоих смесителей.

Литература

1. Епифанов Е. И., Новиков В. А., Чемес Е. А. Экспериментальные исследования радиочастотных смесителей // Радиотехника, 1988. — № 10.
2. Дансмор Д. П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей / Перевод с английского и научная редакция Е. Ю. Харитонова и др. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — 735 с. ISBN 978-5- 94836-505-3.

УДК 621.382.323

Комплексная разработка технологии изготовления СВЧ монолитных интегральных схем дециметрового диапазона на основе гетероструктур GaAs

Орлова Д. А.[1], Драгуть М. В.[1,2], Смирнов Ю. Ю.[1]
[1] АО «ОКБ-Планета»
173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. 1н
OrlovaDA@okbplaneta.ru
[2] Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого
173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 44

Разработана технология СВЧ монолитных интегральных схем дециметрового диапазона и изготовлены опытные образцы тестовых транзисторов на двух типах исходных гетероструктур GaAs. Приведены результаты комплексного анализа характеристик СВЧ pHEMT-транзисторов.
Ключевые слова: СВЧ МИС; гетероструктура; арсенид галлия; дециметровый диапазон; pHEMT-транзистор.

В настоящее время дециметровый диапазон частот 0,3–3 ГГц является наиболее освоенным, в нем работает значительное количество устройств телекоммуникации, радиолокации и т. д. [1]. Поэтому задача разработки электронной компонентной базы, в том числе и монолитных интегральных схем (МИС), являющихся основой передовой радиоэлектронной аппаратуры, важна и актуальна.

Основные этапы исследования включали разработку конструкции исходной гетероструктуры, топологического проекта, формирование маршрута постростовых операций и изготовление опытных образцов с последующим измерением их параметров. В качестве исходного материала использовались односторонние pHEMT-гетероструктуры с селективным легированием. При разработке СВЧ МИС применялись структуры двух типов с различной толщиной барьерного слоя n-GaAs, выращенные на полуизолирующей арсенид-галлиевой подложке при помощи метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). На контрольных пластинах проводилась проверка электрофизических характеристик — подвижности и слоевой концентрации носителей заряда. По результатам испытаний параметры обеих исходных гетероструктур одинаковы ($\mu_n = 6095$ см^2/(В·с); $n_s = 2{,}09 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$).

На следующем этапе был разработан топологический проект и технологический маршрут постростовых операций, позволяющий помимо активных элементов (усилительные и ключевые транзисторы) формировать и пассивные (однослойный и двухслойный конденсатор, резисторы, элементы заземления). pHEMT-транзисторы изготавливались по самосовмещенной технологии, в которой подзатворная канавка и затвор формируются в одном технологическом цикле. Длина затвора для полевого транзистора, работающего в дециметровом диапазоне, может составлять 1 мкм, она получена при помощи отработанного и производительного процесса контактной фотолитографии.

В процессе исследования СВЧ pHEMT-транзисторов, изготовленных на двух типах гетероструктур с толщиной барьерного слоя n-GaAs 10 и 20 нм, были

проведены измерения тестовых структур в целях комплексного анализа статических и высокочастотных параметров.

Таблица 1. Результаты измерений статических и высокочастотных параметров

Статические и высокочастотные параметры транзистора	Толщина барьерного слоя исходной ГС	
	20 нм	10 нм
Максимальная удельная крутизна (мСм/мм)	186,5	206,8
Напряжение отсечки (В)	−2,3	−0,8
Начальный ток стока (мА/мм)	320,6	95
Пробивное напряжение (В)	12	12
Максимальная частота генерации (ГГц)	29	30
Граничная частота (ГГц)	18	15
Сопротивление в открытом состоянии (Ом·мм)	2,47	4,01
Проходная емкость в закрытом состоянии (пФ/мм)	0,252	0,222

Полученные значения транзисторов, а именно максимальная частота генерации и граничная частота, превышают по величине дециметровый диапазон, который варьируется в интервале от 0,3 до 3 ГГц. Исходя из данных результатов, можно судить о том, что данная технология пригодна для изготовления СВЧ МИС в дециметровом диапазоне.

Литература

1. Верхулевский К. Монолитные СВЧ-компоненты Microsemi Corpation для ответственных применений // Компоненты и технологии, 2016. — № 7. — С. 36–42.

УДК 621.382.323

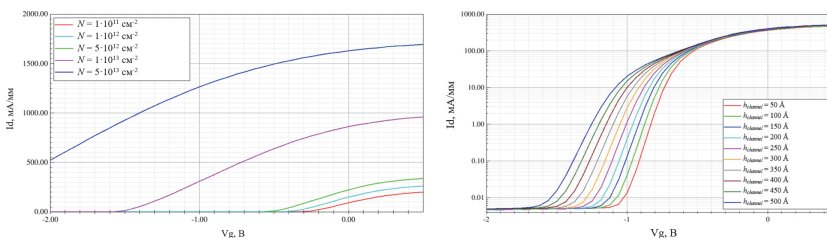
Исследование технологических особенностей изготовления малошумящих GaAs pHEMT с длиной Т-затвора 150 нм и монолитных интегральных схем на их основе

Шестериков А. Е.[1], Шестерикова Д. А.[1], к. т. н., Ерофеев Е. В.[1,2]
[1] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40
[2] Институт оптики атмосферы им. академика В. Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Исследовано влияние длины рецесса подзатворной области GaAs-транзисторов на их электрические характеристики. На основе подобранных технологических режимов была разработана и изготовлена СВЧ МИС малошумящего усилителя с коэффициентом усиления не менее 27 дБ и коэффициентом шума не более 1,6 дБ.

Ключевые слова: pHEMT; малошумящий транзистор; рецесс подзатворной области; МИС; моделирование; гетероструктура; пассивация.

В настоящее время прогресс в улучшении характеристики монолитных СВЧ интегральных схем (МИС) во многом определяется развитием технологии эпитаксиального выращивания полупроводниковых гетероструктур [1]. Качество выращивания гетероструктуры и структура используемых в ней слоев во многом определяют предельные характеристики получаемых СВЧ полупроводниковых приборов [2]. При разработке технологического процесса крайне важно изначально подобрать гетероструктуру, обеспечивающую наилучшие характеристики разрабатываемых МИС. Для выбора оптимальной конструкции гетероструктуры было произведено моделирование гетероструктуры в программном комплексе Synopsis TCAD в целях определения оптимальной поверхностной концентрации δ-легирования (N_{delta}) и толщины канального слоя транзистора (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Результаты моделирования передаточных характеристик транзистора: *а*) зависимость от концентрации дельта-легирования; *б*) зависимость от толщины канального слоя

С увеличением концентрации дельта-легирования растет ток стока при фиксированном напряжении на затворе, но при этом увеличивается напряжение отсечки транзистора. Для достижения напряжения отсечки порядка 0,6–0,9 В

минимальная концентрация дельта-легирования должна составлять порядка $(3–5)\cdot 10^{12}$ см$^{-2}$, а толщина канального слоя должна находиться в пределах 100–150 Å. На рис. 2 представлены результаты измерений для образцов с различной входной обработкой перед пассивацией в сравнении с обработкой в изопропиловом спирте при фиксированном времени травления рецесса подзатворной области (t_{etch}).

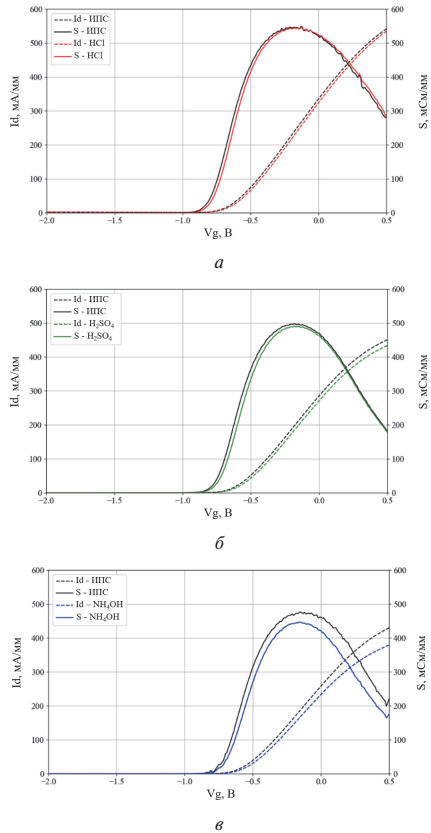


Рис. 2. Результаты измерений для образцов с различной входной обработкой перед пассивацией в сравнении с обработкой в изопропиловом спирте: *а*) HCl при t_{etch} = 60 с; *б*) H_2SO_4 при t_{etch} = 90 с; *в*) NH_4OH при t_{etch} = 120 с

Дополнительная обработка в HCl и H_2SO_4 незначительно ухудшает передаточные характеристики транзистора. Однако при дополнительной обработке образцов в NH_4OH происходит значительная деградация электрических характеристик транзисторов. На основе подобранных оптимальных режимов изготовления pHEMT была разработана и изготовлена СВЧ МИС малошумящего усилителя диапазона частот от 8 до 11 ГГц (рис. 3).

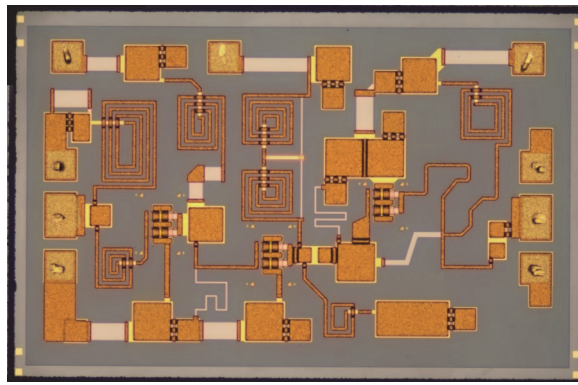


Рис. 3. Топология кристалла СВЧ МИС малошумящего усилителя

Результаты измерений СВЧ и шумовых характеристик усилителя представлены в табл. 1. Среднее значение коэффициента усиления в рабочем диапазоне частот равно 27 дБ. Максимальное значение коэффициента шума составляет 1,6 ГГц.

Таблица 1. Основные характеристики изготовленного малошумящего усилителя

Параметр	Значение	Единица измерения
Диапазон частот	8–11	ГГц
Коэффициент усиления	27	дБ
Возвратные потери по входу	−12	дБ
Возвратные потери по выходу	−10	дБ
Коэффициент шума	1,6	дБ
Напряжение питания	5	В
Ток потребления	50	мА
Размер кристалла	1,7×1,1	мм^2

В рамках данной работы были исследованы технологические особенности изготовления малошумящих GaAs-транзисторов с длиной Т-затвора 150 нм. С помощью моделирования в программном комплексе Synopsys TCAD были подобраны оптимальные характеристики гетероструктуры. В рамках исследования влияния длины рецесса подзатворной области на характеристики HEMT выявлено, что с ростом длины рецесса происходит увеличение пробивных напряжений транзисторов вследствие увеличения электрического пути между затвором и стоком. Дополнительная обработка ухудшает электрические характеристики, но позволяет увеличить на 10–20 % напряжение пробоя транзисторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.

Литература

1. Chaturvedi A. Review of semiconductor materials for monolithic microwave millimeter wave integrated circuits // Materials Today: Proceedings, 2021. 37, 1567–1570.
2. Leuther A., Ohlrogge M., Czornomaz L., Merkle T., Bernhardt F. and Tessmann A. A 250 GHz millimeter wave amplifier MMIC based on 30 nm metamorphic InGaAs MOSFET technology // 2017 12th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), Nuremberg, Germany, 2017. P. 130–133.

УДК 621.315.61

Технология заполнения вертикальных зазоров в квазимонолитных СВЧ-устройствах полиимидом

Гусева Е. А., Аворник Т. В., Аворник О. Ф., Тихонов В. А., Петрова И. В.
АО «ОКБ-Планета»
173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а
gusevaEA@okbplaneta.ru

В данной работе исследовалась технология заполнения вертикальных зазоров в квазимонолитных СВЧ-устройствах. Проведены исследования по использованию фоточувствительного и нефоточувствительного полиимида для заполнения узких глубоких зазоров и получена оценка возможности его использования для данного случая.

Ключевые слова: зазоры; СВЧ-устройство; фоточувствительный полиимид; нефоточувствительный полиимид.

Совершенствование технических характеристик радиолокационных станций неразрывно связано с разработкой и производством СВЧ-компонентов приемо-передающих модулей (ППМ) с требуемыми параметрами. Повышение надежности работы, помехозащищенности и помехоустойчивости, снижение массогабаритных параметров требует применения современных подходов при конструировании и изготовлении СВЧ-элементов. Для расширения функциональных возможностей ППМ необходимо использовать высокочастотные монолитно-интегральные схемы (МИС). Для снижения массогабаритных показателей ППМ все чаще применяются инновационные подходы при выполнении сборочных операций, такие как 3D-технологии [1]. За счет интеграции множества кристаллов внутри одного интерпозера, используемые платы могут быть меньшими по размеру, а короткие межсоединения улучшают как электрические характеристики, так и функциональные возможности приемо-передатчиков. Потенциальным недостатком такого способа компоновки СВЧ-модулей являются некоторые технологические проблемы, возникающие из-за особенностей конструкции.

В данной работе рассматривается создание технологии заполнения вертикальных зазоров в квазимонолитном СВЧ-устройстве, реализующем комплексную электрическую схему, а именно ППМ АФАР. Он состоит из интерпозера с расположенными в его объеме кристаллами МИС и со сформированной на его лицевой стороне планарной структурой из нескольких чередующихся слоев диэлектрика и металлизации. Вследствие монтажа кристаллов СВЧ МИС в полости интерпозера остается зазор между ними и подложкой.

Из-за наличия зазора возникают следующие технологические сложности: отсутствие контакта при напылении затравочного слоя под формирование переходной металлизации; возникновение дефектов в виде пузырей во время проведения фотолитографии; образование трещин в планаризующем межслойном диэлектрике. Для устранения всех обозначенных проблем было необходимо подобрать материал и сформировать технологию заполнения зазора между кристаллами СВЧ МИС и интерпозером.

Данные работы выполнялись с использованием двух видов полиимида в качестве такого материала. Для светочувствительного полиимида Sun-Pi100

от компании Suntific Materials был проведен подбор режима фотолитографии на тестовых образцах без развитого рельефа и образцах с наличием вертикальных зазоров. Для несветочувствительного полиимида АД-9103 ИС от компании МИПП-НПО «Пластик» были проведены исследования по заполнению вертикальных зазоров с оценкой адгезии и возможности как его плазмохимического удаления, так и стойкости полиимида к некоторым технологическим операциям по созданию квазимонолитного СВЧ-устройства. Было представлено заключение по проведенным экспериментам, а именно возможности использования двух видов полиимида для заполнения вертикальных зазоров, и были сформулированы предложения по усовершенствованию сформированной технологии.

Литература

1. Васильев А. Современные технологии 3D-интеграции // Компоненты и технологии, 2010. — № 102. — С. 156–158.

УДК 621.3.049.776.422:621.396.96

Исследование проблем теплового распространения в малогабаритных СВЧ приемо-передающих модулях АФАР

Панасенко П. В., д. т. н., Волосов А. В., к. т. н., Пяточкин М. Д.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
ppanasenko@niime.ru, avolosov@niime.ru, mpyatochkin@niime.ru

Рассмотрены особенности теплоотвода для различных конструктивов СВЧ приемо-передающих модулей см- и мм-диапазонов частот. Показано, что исследованные конструктивы могут использоваться в качестве базовых решений при создании ППМ, для обеспечения улучшенного рассеивания тепла и повышения КПД подсистемы.

Ключевые слова: СВЧ приемо-передающий модуль; активная фазированная антенная решетка; кремниевая коммутационная плата; TSV-интерпозер.

Одной из главных тенденций, утвердившихся в последние десятилетия в развитии связных и радиолокационных систем различного назначения, является их реализация на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР).

Одним из ключевых элементов систем АФАР является приемо-передающий модуль (ППМ), который строится на основе полупроводниковой электронной компонентной базы, представленной в виде монолитных интегральных схем (МИС) различного функционального назначения. Уровень излучаемой в согласованном тракте выходной мощности современных СВЧ МИС может достигать 25 Вт и более, что при КПД (25–40) % приводит к большим значениям рассеиваемой мощности и требует организации эффективных систем теплоотвода. Ситуация усугубляется тенденциями к миниатюризации конструкции ППМ и использованию сложнофункциональных СВЧ СнК, что обусловлено требованиями к шагу антенной решетки АФАР в половину длины излучаемой волны. Так, при частоте 10 ГГц габаритные размеры в плоскости антенного полотна модуля не должны превышать 15×15 мм [1]. Проблематика усугубляется ростом требуемых излучаемых уровней мощности СВЧ-сигнала, а также переходом на дешевые менее энергоэффективные технологии.

В работе выполнен анализ базовых конструктивных технологических решений, физических и технических ограничений в отношении приемо-передающих модулей в целом. Проведен аналитический обзор конструкций и технологий проектирования систем теплоотводов в многокристальных 2.5D и 3D электронных узлах. Разработаны и верифицированы тепловые модели 2.5D–3D-микросборок, применимые для моделирования различных приемо-передающих модулей систем АФАР. Предложены конструктивные решения конструктивно-технологической реализации и оценена эффективность различных систем теплоотвода для ППМ, построенных на основе TSV-интерпозера.

Определены условия максимальной эффективности системы теплоотвода на основе TSV-интерпозера. Разработан способ построения 3D-модели кристаллов из топологических файлов, который позволяет значительно сократить временные затраты на исследования и создание модели.

Существующие системы теплоотвода в ППМ представляют собой тепловые стоки в низкотемпературной совместно обжигаемой керамике (LTCC) и печатные платы на полимерной основе, их теплоотвод ограничен количеством теплостоков и имеет неудовлетворительные характеристики [2]. Одним из альтернативных подходов к организации систем теплоотвода, предложенным в данной работе, является охлаждение ППМ за счет адиабатического расширения газа, протекающего в объеме Si интерпозера или металлического основания. Предложена система теплоотвода ППМ, построенная на принципе адиабатического расширения газа и обладающая более высокой эффективностью по отношению к системам с циркуляцией охлаждающей жидкости при габаритах ППМ не менее 400 мм^2.

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. — Т. 13 (99). — С. 404–406.

УДК 621.3.049

Измерение электродинамических характеристик материала для производства малогабаритных антенн с помощью аддитивных технологий

Бурлаков К. А., Насибуллин Д. А.
УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
k.a.burlakov@urfu.ru, d.a.nasibullin@urfu.ru

Работа посвящена исследованию электродинамических свойств материалов, используемых для создания малогабаритных антенн с применением аддитивных технологий. В работе описаны методы, позволяющие определить диэлектрическую и магнитную проницаемость фотополимера на низкой и высокой частоте.

Ключевые слова: характеристики материалов; аддитивные технологии; антенны; СВЧ.

Малогабаритные антенны получили широкое применение в мобильных устройствах, автономных транспортных средствах, медицинских устройствах, космических технологиях, а также в Интернете вещей [1] и 5G [2]. В данных областях основными требованиями являются малые размеры, низкие масса и стоимость производства. Для достижения заданных требований существует множество решений. В настоящее время с использованием аддитивных технологий и новых материалов можно создавать антенны с уникальными свойствами, улучшенной эффективностью и еще меньшими размерами. Для производства таких устройств необходимо знать свойства материалов, из которых они будут изготавливаться.

Для измерения диэлектрической проницаемости смолы на низкой частоте был изготовлен образец в виде плоского конденсатора. Зная его емкость и габаритные размеры, можно рассчитать его диэлектрическую проницаемость по известной формуле. Для измерения магнитной проницаемости был изготовлен диэлектрический цилиндр, который помещался внутрь катушки индуктивности.

Измерения электродинамических характеристик полимера на высокой частоте осуществлялись путем изменения длины микрополосковой линии, что приводило к изменению фазы коэффициента отражения S11.

Также диэлектрическую и магнитную проницаемость диэлектрика можно измерить с помощью метода NRW [3], расположив образец между двумя волноводами.

Используя полученные характеристики фотополимерной смолы, провели электродинамическое моделирование диэлектрической резонаторной антенны.

Литература

1. Chietera F. P., Colella R. and Catarinucci L. The Promising Role of 3D-printed Dielectric Resonator Antennas in the IoT Framework // 2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), Bol and Split, Croatia, 2021. P. 1–4. DOI: 10.23919/SpliTech52315.2021.9566416.

2. Zhu Y.-Y., Wang J., Chen J.-X. and Wu W. A Compact Wideband Dual-Polarized Antenna Using Monolithic Dielectric for 5G Base Station Application // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022. Vol. 21. № 9. P. 1717–1721. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3173085.
3. Kuek Chee Yaw. Measurement of Dielectric Material Properties // Rohde & Schwarz, 2012. RAC-0607-0019. 36 p.

УДК 621.3.049

Генерация геометрии антенны с заданной диаграммой направленности

Бурцев В. Д., Филонов Д. С.
Центр фотоники и двумерных материалов,
Московский физико-технический институт
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 7
burtsev.vd@phystech.edu

В данной работе описывается алгоритм извлечения дальнего электрического поля из информации о диаграмме направленности антенны и ее поляризации, а также приводится пример получения геометрии антенны, обеспечивающей такие показатели, на основе анализа модового состава.
Ключевые слова: обратная задача; радиофизика; мультипольное разложение; вычислительная электродинамика.

На данный момент в перспективных системах связи избирательное излучение сигнала является технически сложной задачей. Например, формирование диаграммы направленности с выколотым сектором или многонаправленной диаграммы требует подбора большого количества параметров, а фундаментального решения поставленная задача не имеет [1]. Как правило, существующие решения только аппроксимируют входные данные о диаграмме и сводятся к следующим вариантам: метод апертурного синтеза антенных решеток, метод обратного распространения для метаповерхностей или итеративный алгоритм эвристического поиска [2–4].

В данной работе предлагается альтернативный способ поиска целевой геометрии излучателя, основанный на анализе информации о макроскопических характеристиках испускаемого им электромагнитного поля, — диаграмме направленности и карте поляризации. Все вычисления происходят в сферических координатах в дальней зоне источника. На первом шаге по излучаемой мощности и осевому соотношению эллипса поляризации оценивается вектор электрического поля в каждой точке. Затем по восстановленной карте электрического поля восстанавливается спектр мультипольных коэффициентов, однозначно отображающий возбужденные в системе гармоники. На последнем этапе мультипольный спектр аппроксимируется известными комбинациями антенных элементов, а их итоговое сочетание моделируется при помощи метода конечных элементов для подтверждения работоспособности алгоритма.

Литература

1. Тихонов А. Н., Дмитриев В. И. О методах решения обратной задачи теории антенн // Вычислительные методы и программирование. — Вып. XIII. — М.: изд-во МГУ, 1969. — С. 209–214.
2. Zhao X., Lin H., Chen H. et al. Back-propagation-assisted inverse design of structured light fields for given profiles of optical force // Nanophotonics, 2023. Vol. 12. № 11. P. 2019–2027.
3. Epstein A. and Eleftheriades G. V. Huygens' metasurfaces via the equivalence principle: design and applications // J. Opt. Soc. Am. B, 2016. Vol. 33. № 2. P. A31.
4. Bossard J. A., Lin L., Yun S. et al. Near-Ideal Optical Metamaterial Absorbers with Super-Octave Bandwidth // ACS Nano, 2014. Vol. 8. № 2. P. 1517–1524.

УДК 621.3.049

Учет условий эксплуатации при оценке электродинамических характеристик материалов

Кривоногова Д. Е., Малкин А. И.
УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
krivonogova.daria@urfu.me

Рассмотрен вопрос измерения электродинамических характеристик материалов при отрицательных температурах. Разработана модель оснастки, позволяющая проводить измерения при температурах до −150 °C.
Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость; магнитная проницаемость; S-параметр.

Современный процесс разработки новых изделий радиоэлектроники подразумевает создание цифровых двойников. Основной задачей является обеспечение максимально полного соответствия электродинамической модели цифрового двойника реальному изделию. Для этих целей недостаточно знать электродинамические параметры материалов только в определенных условиях измерения, таких как температура и влажность. Только учет зависимости комплексных значений диэлектрической и магнитной проницаемости, входящих в состав изделия материалов, от указанных величин позволит получить электродинамическую модель, близкую к реальности.

В ходе выполнения работы по учету условий эксплуатации при оценке электродинамических характеристик материалов был разработан измерительный комплекс, в котором в качестве способа охлаждения образца используется жидкий азот. Особенностью такого метода является резкий скачок температуры образца материала до −150 °C. При этом в комбинации процессов конденсации воды с поверхности волновода и кристаллизации воды под воздействием низкой температуры возникает иней, который обладает собственными значениями комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости [1]. Чтобы не допустить появление инея, реализована система вакуумирования измерительной линии. Для создания вакуума будет использован масляный одноступенчатый воздушный компрессор который способен создавать давление до 10^{-3} Торр.

Для измерения электродинамических характеристик планируется использовать метод линии передачи. Он объединяет в себе такие распространенные типы линий передачи, как коаксиальная линия с воздушным заполнением, волноводная линия передачи. Исследуемый образец материала будет помещаться в охлаждаемую линию передачи. Вычисление комплексных диэлектрической и магнитной проницаемости будет проводиться с использованием математического аппарата NRW [2].

В результате разработки измерительного комплекса создана модель измерительной оснастки и подобраны все необходимые комплектующие для изготовления натурного образца измерительного комплекса.

Литература

1. So H., Senesky D. G. Effect of Frost Formation on Operation of GaN Ultraviolet Photodetectors at Low Temperatures // IEEE Sens. J., 2017. Vol. 16. № 15. P. 4752–4756.
2. Malkin A. I., Knyazev N. S. Dielectric permittivity and permeability measurement system // CEUR Workshop Proceedings. CEUR Workshop Proceedings, 2017. Vol. 1814. P. 45–51.

УДК 621.3.049

Фазированная антенная решетка для низкоорбитальных спутниковых группировок

Филонов Д. С., Никулин А. В.
Центр фотоники и двумерных материалов,
Московский физико-технический институт
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 7
filonov.ds@mipt.ru

Описываются этапы проектирования и изготовления фазированной антенной решетки Ku-диапазона для задач спутниковой связи с низкоорбитальными группировками, подразделяемой на передающую и приемную подрешетки, работающие в диапазонах 14,0–14,5 и 10,95–11,7 ГГц соответственно.
Ключевые слова: спутниковая связь; фазированная антенная решетка; СВЧ-техника; низкоорбитальная спутниковая группировка.

В период до 2030 года в рамках развития отечественных низкоорбитальных спутниковых группировок осуществляется технологическая модернизация в областях систем связи нового поколения и беспилотных аппаратов. В отрасли связи «земля — космос» на данный момент наиболее научно и технически разработанным продуктом являются фазированные антенные решетки [1, 2], однако в то же время еще не существует готовых решений для полностью отечественных антенных решеток, отвечающих аппаратным требованиям спутников на низкой орбите.

В данной работе представлены результаты проектирования, изготовления и измерения фазированной антенной решетки Ku-диапазона, разрабатываемой в рамках обозначенной задачи. Физическая реализация решетки основывается на технологии печатных плат. В качестве элементарного излучателя используется круглая патч-антенна с круговой поляризацией, обеспечиваемой гибридным СВЧ-мостом на нижнем слое, а также вынесенным паразитным патчем-директором на верхнем слое для увеличения направленности всей структуры [3]. Итоговая фазированная антенная решетка представляет из себя совмещенную систему из приемной (40×24 элементов, 10,95–11,7 ГГц) и передающей (52×24 элементов, 14,0–14,5 ГГц) подрешеток. Основными атрибутами представленной решетки являются одна электрическая и одна механическая оси сканирования: электрическое сканирование по углу места осуществляется путем изменения фазы в СВЧ-тракте на фазоформирующем чипе, механическое сканирование по азимуту — путем осевого вращения всей структуры.

Литература

1. He G. et al. A review of multibeam phased array antennas as LEO satellite constellation ground station // IEEE Access, 2021. Vol. 9. P. 147142–147154.
2. Han G. et al. A novel hybrid phased array antenna for satellite communication on-the-move in Ku-band // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015. Vol. 63. № 4. P. 1375–1383.
3. Nikulin A. V. et al. Towards phased array antenna operating in Ku-band for satellite communications // Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2024. Vol. 58. P. 101216.

УДК 621.396.6

Фазированная антенная решетка для терминалов спутниковой связи Ка-диапазона

Цитович А. А.[1], Кучмий А. Д.[1,2], Кузнецов В. В.[1], Плотников И. С.[1], Дехтярь Т. А.[1,2]

[1] АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
[2] Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4

Разработана структурная схема построения активной фазированной антенной решетки (АФАР) терминала спутниковой связи Ка-диапазона длин волн. Разработан функциональный фрагмент АФАР, позволяющий добиться масштабируемости апертуры и тем самым обеспечивающий возможность изменения тактико-технических характеристик без серьезных затрат на модернизацию устройства.

Ключевые слова: антенные решетки спутниковой связи; микрополосковые антенные решетки; активные антенные решетки; цифровые антенные решетки; плоские антенны; излучающий элемент; система излучения; электрическое сканирование.

В последнее десятилетие во многих странах мира активно проводятся поисковые научно-исследовательские работы (далее — НИР) и опытно-конструкторские работы (далее — ОКР), целью которых является поиск технических решений для создания недорогих плоских сканирующих антенн (Flat-panel antennas, FPA) [1]. Сегодня главным драйвером для этого является возрастающее количество планируемых сценариев предоставления услуг широкополосного доступа (далее — ШПД) на подвижных объектах [2, 3].

Статья посвящена разработке фазированной антенной решетки в формате FPA по модульному принципу для возможности проведения масштабирования с учетом сценария использования терминала спутниковой связи. Проведен электродинамический анализ излучающего элемента и расчет диаграммообразующей схемы.

Литература

1. Овчинникова Е. В., Гаджиев Э. В., Кондратьева С. Г., Поландов А. Л., Шмачилин П. А., Соков М. А., Волков О. А. Антенные решетки спутниковых мобильных теллекоммуникоционных систем // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2021. — Т. 182. — № 3.
2. Nicholson J. Status of the Mobile User Objective System // Military Communications Conference (MILCOM), 2006. P. 1–4.
3. Marcellini L., Lo Forti R., Bellave-glia G. Future developments trend for Ku and Ka antenna for satcom on the move // Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on, 2011. P. 2346–2350.

УДК 621.382.3

Экспериментальное исследование температурных характеристик элементов на пластине GaAs в СВЧ-диапазоне частот

Цунваза Д., д. т. н. Каргин Н. И., к. т. н. Рыжук Р. В., д. ф.-м. н. Васильевский И. С., Неволина Т. Н., Клоков В. А.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
tsdamir321@gmail.com

Представлены экспериментальные результаты исследования температурных характеристик элементов на пластине GaAs для СВЧ МИС. Измерения параметров компонентов проводились при температурах до 125 °C и частотах до 50 ГГц. Получены зависимости величины ключевых параметров исследованных устройств от температуры.

Ключевые слова: СВЧ-диапазон; монолитные интегральные схемы; температурные характеристики.

Современные электронные устройства эксплуатируются в различных условиях окружающей среды. Факторы температуры, излучения и стабильности питания радиоэлектронной аппаратуры значительно влияют на эффективность функционирования того или иного прибора. Таким образом, возникает проблема прогнозирования надежности и отказоустойчивости электронных компонентов, а также необходимость изучения их поведения при помещении в экстремальные рабочие условия.

Кроме того, понимание зависимости характеристик устройств от внешних условий способствует корректировке технологического процесса в целях повышения эффективности разрабатываемой электронной аппаратуры. Так, например, одним из этапов техмаршрута является формирование диэлектрического слоя нитрида кремния, свойства которого определяются его стехиометрическим составом, который может несколько отличаться от Si_3N_4. Эти отличия будут влиять на величину диэлектрической проницаемости и, как следствие, тангенса угла диэлектрических потерь, что в свою очередь влияет на величину граничной частоты устройства. Учитывая, что монолитные интегральные схемы (МИС) используются в различных температурных режимах, эти характеристики могут сильно меняться и выходить за границы допустимого отклонения. Таким образом, исследование температурных характеристик компонентов для МИС СВЧ-диапазона частот является важной и актуальной задачей.

В качестве экспериментальных образцов использовались SiN_x МДМ-конденсаторы, планарные катушки индуктивности и TaN тонкопленочные резисторы, изготовленные в Центре радифотоники и СВЧ-технологий НИЯУ МИФИ [1]. Измерительный стенд состоял из векторного анализатора цепей PNA-X и зондовой станции MPI TS200-IFE. Исследование характеристик пассивных компонентов проводилось в температурном диапазоне 25–125 °C с шагом 25 °C при частотах до 50 ГГц и мощности СВЧ-сигнала −10 дБм. Контроль параметров конденсатора,

резистора и катушки индуктивности осуществлялся путем анализа измеренных параметров импеданса:

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right), \text{ откуда}$$

$$R = Re(Z);\ C = -\frac{1}{Im(Z)\cdot\omega};\ L = \frac{Im(Z)}{\omega}.$$

Показано, что изменение температуры окружающей среды существенно влияет на характеристики компонентов СВЧ МИС. Так, например, емкость конденсатора нелинейно увеличилась более чем на 15% при нагреве на 100°С в частотном диапазоне 10–20 ГГц [2].

Результаты исследования температурных характеристик пассивных компонентов легли в основу работы по уточнению моделей для СВЧ МИС, а также способствуют корректировке технологического процесса.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра радиофотоники и СВЧ-технологий НИЯУ МИФИ в рамках программы «Приоритет-2030».

Литература

1. Васильевский И.С. и др. Разработка отечественного техпроцесса 0,15 мкм РНЕМТ для МИС СВЧ МШУ // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. — Омск, 2022. — С. 75–83.
2. Цунваза Д., и др. Исследование температурных характеристик пассивных элементов на основе гетероструктуры соединений AIIIAs // Мокеровские чтения: Сборник трудов. — М.: НИЯУ «МИФИ», 2024. — С. 49–50.

УДК 621.371

Обзор моделей радиоканалов современных систем связи

Михайлов В. Ю.[1,2]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[2] *Московский физико-технический институт*
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
vmikhaylov@niime.ru

В статье описаны модели радиоканалов, используемые при разработке устройств и систем подвижной связи. Представлен обзор известных моделей радиоканалов, их характеристики, особенности и условия использования. Проведен анализ применимости моделей для NB-IoT.

Ключевые слова: 5G; LTE; радиоканал; моделирование.

При проектировании систем радиосвязи необходимо учитывать эффекты, возникающие при распространении радиоволн, особенно эффекты многолучевого распространения, которые являются основными для систем радиосвязи в городских условиях, офисных и промышленных помещениях и условиях сложных рельефов. Также эти эффекты необходимо учитывать и при разработке оконечных устройств, так как некоторые стандарты, например LTE или 5G, используют собственные модели радиоканалов [1], которые применяются [2] при функциональном исследовании устройств, работающих в рамках данных стандартов. Поэтому при создании микросхем приемо-передающих модулей для оконечных устройств на основе микроэлектронных технологий [3] на этапе проектирования необходимо моделировать работу системы с учетом радиоканала.

На текущий момент существует несколько подходов при создании модели каналов:

- расчет потерь с использованием моделей распространения радиоволн;
- представление канала в виде импульсной характеристики;
- пространственный подход, учитывающий расположение приемника и передатчика, а также диаграммы направленности антенн;
- трассировка лучей.

Построение строгих математических моделей, описывающих характер распространения радиоволн для городских условий, практически невозможно, поэтому на практике применяются различные приближенные модели, которые позволяют оценить уровень сигнала в точке приема. Выделяют шесть типов математических моделей распространения радиоволн [4], но для инженерных расчетов применяются в основном эмпирические модели:

- детерминированные;
- статические;
- полудетерминированные;
- полустатические;
- полуэмпирические;
- эмпирические.

Вторым вариантом является представление радиоканала в виде импульсной характеристики основной полосы частот:

$$h_b(t) = \sum_k \alpha_k \delta(t - \tau_k), \quad (1)$$

где α_k — коэффициент ослабления, τ_k — временная задержка k-го канала относительно первого канала.

При движении приемного или передающего устройства канал будет меняться, так как возникает эффект Доплера. В таком случае импульсную характеристику можно оценить как

$$h_b(t) = \sum_k \alpha_k \cdot e^{j2\pi f_D t} \cdot \delta(t - \tau_k), \quad (2)$$

где f_D — доплеровская частота.

Таким образом, канал представляет собой линии задержки с отводами на фиксированных позициях. Данный тип модели радиоканала применяется при разработке LTE-устройств (модели EPA, EVA, ETU) и модели TDL для 5G.

Пространственный подход предполагает, что местоположения передающего устройства и приемного известны в рамках локальной или глобальной систем координат. Подход представляет собой модифицированную импульсную характеристику канала, которая учитывает углы азимута и/или возвышения прихода. Примером такого подхода является модель CDL, которая применяется при моделировании и исследовании устройств 5G. Она построена на основе модели WINNER и рассматривает пять вариантов каналов (CDL-A, CDL-B, CDL-C ориентированы на распространение при отсутствии прямой видимости; CDL-D, CDL-E используются при наличии прямой видимости).

Таким образом, при разработке микросхем приемо-передающих модулей на этапе моделирования наиболее оптимальным является использование или модели распространения радиоволн, или модели представления канала в виде импульсной характеристики.

Литература

1. 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 17.0.0 Release 17).
2. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 1: Conformance testing (3GPP TS 36.521-1 version 17.7.0 Release 17).
3. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 13–19.
4. Попов В. И. Распространение радиоволн в лесах. — М.: Горячая линия, 2015. — 392 с.

УДК 621.396

Улучшение эффективности проектирования объемных СВЧ-меток через интеграцию методов машинного обучения

Пискун И. А.[1], Тельминов О. А.[1], Резник А. Ю.[2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
ipiskun@niime.ru
[2] АО «Микрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Работа посвящена применению методов машинного обучения для повышения эффективности проектирования антенн для СВЧ-радиометок.
Ключевые слова: радиочастотная идентификация; антенна; СВЧ; машинное обучение.

Системы радиочастотной идентификации [1] играют ключевую роль в автоматической идентификации объектов. Радиочастотные метки, представляющие собой важный элемент этих систем, имеют разнообразную конструкцию, включающую в себя антенну и чип [2]. Делятся на плоские или объемные идентификаторы, адаптированные к различным объектам.

Для разработки объемных меток необходимо обладать высокой квалификацией в области численного моделирования и использования специализированных программных средств. Кроме того, создание эффективных трехмерных антенн требует значительного опыта и тщательного анализа различных конфигураций.

Для упрощения проектирования объемных СВЧ-меток можно применять методы машинного обучения и нейронные сети. Алгоритмы машинного обучения могут использоваться в целях проектирования антенн, учитывая различные факторы, такие как материалы и их параметры, физические размеры антенн. Нейронные сети [3] могут обучаться на больших объемах данных и предсказывать оптимальные параметры для достижения заданных характеристик метки.

Новизна работы заключается в применении нейронной сети для регрессии методом машинного обучения для определения параметров антенны, обеспечивающей согласование с чипом на необходимой частоте.

В результате работы написана и обучена нейросеть с двумя скрытыми слоями, предсказывающая значение резонансной частоты на основании три входных параметров: длины антенны, диэлектрической проницаемости керамической основы и ширины антенны. Получаемые при предсказании значения резонансной частоты имеют незначительную погрешность относительно численного моделирования не более 4 МГц (0,5 % от значения резонансной частоты).

Использование нейронных сетей для оптимизации процесса проектирования антенн и радиочастотных меток может значительно сократить время и ресурсы, необходимые для создания эффективных устройств.

Литература

1. Dobkin D. The RF in RFID: UHF RFID in practice. Newnes, 2012.
2. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — С. 205–238.
3. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series). The MIT Press, 2016.

УДК 621.3.011.3, 004.942

Численное моделирование индукционных катушек антенн для идентификации подземных инфраструктурных сетей

Соболев И. А.[1,2], Резник А. Ю.[2], Тельминов О. А.[1]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
isobolev@niime.ru
[2] *АО «Микрон»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Работа посвящена моделированию и разработке индукционной катушки антенны маркера для поиска и идентификации подземных коммуникаций. По результатам расчета выбрана комбинированная катушка. Дальность считывания созданного прототипа превышает 1 м. Измеренные параметры показывают высокую сходимость с теоретическими данными.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация; индукционная катушка; НЧ; добротность; подземные коммуникации.

В современном мире подземные коммуникации играют жизненно важную роль, в частности они обеспечивают передачу электроэнергии, информации, подачу и отвод воды. Однако доступ к таким инфраструктурным сетям затруднен, что делает их потенциально опасными при проведении строительных или ремонтных работ. Одним из способов упрощения взаимодействия с ними является использование радиочастотных меток RFID [1–3].

Маркировка подземных коммуникаций необходима для идентификации различных типов подземных инфраструктурных сетей. Существует несколько способов маркировки подземных коммуникаций. Например, установка физических маркеров — опознавательных столбиков. Наиболее перспективный способ — электронная маркировка метками и считывание их в переменном магнитном поле в диапазоне 60–170 кГц. Эти метки представляют собой колебательный контур, состоящий из двух основных элементов: индукционной катушки, выступающей в роли антенны, и конденсатора. Для записи такой информации, как собственник или дата установки, используется чип [4]. Такие метки называются активными.

На сегодняшний день существующие аналоги меток имеют ограниченную дальность считывания. Необходимо разработать маркер, позволяющий с высокой точностью определять место и тип коммуникации на глубине до 1 м.

Для определения параметров катушки возможно использование уравнений Максвелла или эмпирических формул [5–7]. Эти методы либо достаточно сложны для практических расчетов, либо недостаточно точны, либо неприменимы для расчета катушек сложной формы. Поэтому оптимальным вариантом является моделирование в программном обеспечении, основанном на методе конечных элементов.

Исследовались три цилиндрические намотки с различным количеством слоев, а также катушка сложной формы, представляющая собой комбинацию двух типов намотки. По результатам расчета определено, что комбинированная катушка имеет оптимальные параметры, поэтому такая намотка была выбрана для создания прототипа.

На основе проведенных исследований был разработан опытный образец маркера подземных коммуникаций. Этот образец представляет собой комбинированную катушку, сочетающую в себе два типа намотки, что обеспечивает оптимальные параметры для высокоточной идентификации подземных структур. При помощи RLC-метра были измерены параметры прототипа на частоте 100 кГц. Расхождение составило не более 10%. Проведенные испытания показали, что образец успешно определяет местоположение и тип коммуникаций на глубине до 1,4 м.

В результате моделирования различных индукционных антенн была определена оптимальная конструкция. Создание опытного образца подтвердило, что его характеристики соответствуют теоретическим расчетам с учетом допустимых отклонений. Моделирование катушек в программном обеспечении на основе метода конечных элементов показало свою высокую эффективность и точность в определении параметров катушек сложной формы.

Литература

1. Дшхунян В.Л., Шаньгин В.Ф. Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты — М.: АСТ; НТ Пресс, 2004.
2. Финкенцеллер К. RFID-технологии: Справочное пособие / Пер. с нем. Сойунханова Н.М. — М.: ДМК Пресс, 2016.
3. Zubov I.A., Losevskoy A.Y., Ermakov I.V., Nuykin A.V., Kravtsov A.S. An UHF RFID Tag Design 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. 208–211.
4. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологии и микроэлектроника. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — С. 205–238.
5. Lundin A. Handbook Formula for the Inductance of a Single-Layer Circular Coil // Proc. IEEE, 1985. Vol. 73 (9). P. 1428–1429.
6. Knight D.W. Practical continuous functions for the internal impedance of solid cylindrical conductors // Technical report, 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.3865.1284.
7. Knight D.W. An introduction to the art of Solenoid Inductance Calculation With emphasis on radio-frequency applications, 2016.

УДК 004.383.8.032.26

Моделирование особенностей работы мемристивного кроссбар-массива в нейроморфных электронных модулях

Дудкин А. П., Андреева Н. В., Рындин Е. А.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
anddudkin000@gmail.com, nvandr@gmail.com, rynenator@gmail.com

Разработана модель мемристивного кроссбар-массива, учитывающая падение напряжения на межсоединениях, дискретизацию шага перестройки уровней проводимости и нелинейность характеристик мемристоров. Получены результаты тестирования импульсной нейронной сети с применением разработанной модели.

Ключевые слова: импульсные нейронные сети; мемристивный кроссбар-массив.

Основу современной энергонезависимой оксидной резистивной памяти (OxRAM) составляют мемристивные структуры.

Успешная интеграция OxRAM в нейроморфные системы требует решения задач сопряжения режимов аналоговой перестройки проводимости мемристивных структур с цифровым управлением, задавая необходимость дискретизации уровней проводимости, а также решения проблем, обусловленных вариабельностью параметров и нелинейностью характеристик структур. Поэтому разработка моделей и эффективных средств проектирования мемристивных кроссбар-массивов, учитывающих данные особенности мемристоров, является актуальной и важной задачей. В рамках работы по созданию модели нейроморфного модуля, учитывающего особенности аппаратного исполнения импульсных нейронных сетей (ИмНС), были разработаны:

- алгоритм определения программно предобученных весов мемристивного кроссбар-массива с учетом дискретного диапазона состояний проводимости мемристивных элементов;
- математическая модель для расчета падений напряжения на элементах соединений кроссбар-массива;
- комплекс алгоритмов, использующих экспериментальные вольт-амперные характеристики (ВАХ) мемристивных элементов при расчете кроссбар-массива и учитывающих нелинейность ВАХ, дискретность уровней проводимости мемристоров;
- симулятор импульсной нейронной сети, использующий разработанную модель нейроморфного модуля (*https://github.com/anddudkin/SNN_memristor_based*).

На рис. 1 приведена схема мемристивного кроссбар-массива.

Математическая модель для расчета токов и напряжений в кроссбар-массиве с учетом сопротивлений межсоединений представлена в виде следующей системы уравнений:

$$\left(2G_{WL}+G_{ij}\right)\cdot[V_{WL}]_{ij}-G_{WL}\cdot[V_{WL}]_{i,j+1}-G_{ij}\cdot[V_{WL}]_{ij}=G_{WL}\cdot V_i \quad \text{для } j=1,$$

$$\left(2G_{WL}+G_{ij}\right)\cdot[V_{WL}]_{ij}-G_{WL}\cdot[V_{WL}]_{i,j-1}-G_{WL}\cdot[V_{WL}]_{ij+1}-G_{ij}\cdot[V_{BL}]_{ij}=0 \quad \text{для } 1<j<n,$$

$$\left(G_{WL}+G_{ij}\right)\cdot[V_{WL}]_{ij}-G_{WL}\cdot[V_{WL}]_{ij-1}-G_{ij}\cdot[V_{BL}]_{ij}=0 \quad \text{для } j=n,$$

$$\left(G_{BL}+G_{ij}\right)\cdot[V_{BL}]_{ij}-G_{ij}\cdot[V_{WL}]_{ij}-G_{BL}\cdot[V_{BL}]_{i+1,j}=0 \quad \text{для } i=1,$$

$$\left(2G_{BL}+G_{ij}\right)\cdot[V_{BL}]_{ij}-G_{ij}\cdot[V_{WL}]_{ij}-G_{BL}\cdot[V_{BL}]_{i-1,j}-G_{BL}\cdot[V_{BL}]_{i+1,j}=0 \quad \text{для } 1<i<m,$$

$$\left(2G_{BL}+G_{ij}\right)\cdot[V_{BL}]_{ij}-G_{ij}\cdot[V_{WL}]_{ij}-G_{BL}\cdot[V_{BL}]_{i-1,j}=0 \quad \text{для } i=m,$$

где G_{ij}, G_{WL}, G_{BL} — проводимости резистивных устройств с индексами i, j, элементов межсоединений строки и столбца соответственно; V_{WL} и V_{BL} — падения напряжения на элементах соединительных линий; n и m — количество строк и столбцов в кроссбар-массиве.

Представленная математическая модель корректна в случае линейных ВАХ элементов кроссбар-массива. Однако, поскольку мемристивные структуры имеют нелинейные вольт-амперные характеристики [1], это необходимо учитывать при разработке нейроморфных модулей.

Для расчета выходных токов на столбцах кроссбар-массива с учетом сопротивления линий и нелинейности ВАХ мемристивных элементов разработан итерационный алгоритм, позволяющий найти решение приведенной выше системы уравнений методом последовательных приближений. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

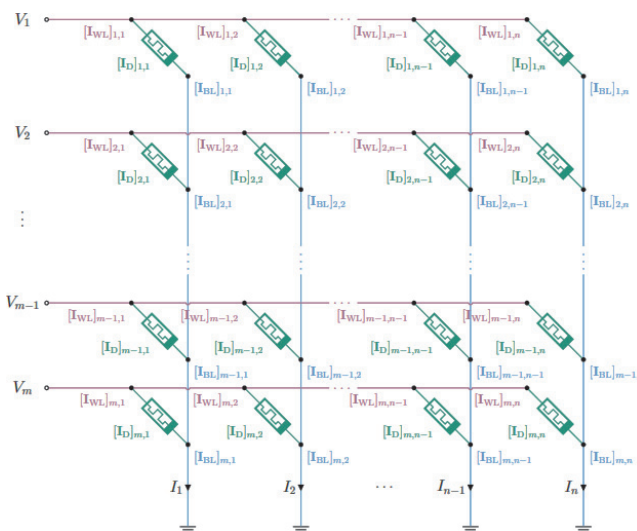


Рис. 1. Схема мемристивного кроссбар-массива

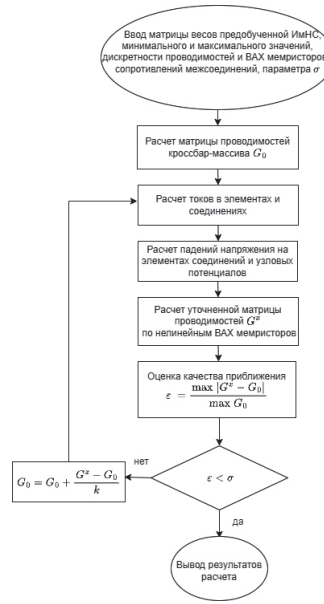


Рис. 2. Блок-схема итерационного алгоритма

Для оценки влияния особенностей аппаратного исполнения проведен ряд экспериментов для ИмНС в инференс-режиме в задаче распознавания изображений [2]. Полученные результаты показывают снижение точности распознавания изображений на 9–11 % в сравнении с результатами, полученными без учета падений напряжения на элементах соединений, дискретности состояний мемристоров и нелинейности их вольт-амперных характеристик, что свидетельствует о необходимости учета данных факторов при проектировании нейроморфных модулей.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант FSEE-2020-0013.

Литература

1. Bouvier Maxence, Valentian Alexandre, Mesquida Thomas, Rummens Francois, Reyboz Marina, Vianello Elisa and Beigne Edith. Spiking Neural Networks Hardware Implementations and Challenges: A Survey. — New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019. Vol. 15. P. 1550–4832.
2. Diehl Peter, Cook Matthew. Unsupervised learning of digit recognition using spike-timing-dependent plasticity // Frontiers in Computational Neuroscience, 2015. Vol. 9: 99. DOI: 10.3389/fncom.2015.00099.

УДК 537.312.7

Обзор современного состояния мемристорных структур на основе GaO_2

Мизгинов Д. С., Тельминов О. А., Горнев Е. С.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
niime@niime.ru

Проанализировано современное состояние мемристоров на основе оксида галлия, проблемы и перспективы развития.
Ключевые слова: мемристор; оксид галлия; кремний; элементная база.

В настоящее время разработка мемристоров на основе оксида галлия на кремниевой подложке является одной из важнейших задач [1]. В частности, разработка таких мемристоров необходима лля формирования элементной базы нового поколения на основе мемристоров [2]. Такая элементная база будет иметь ряд существенных преимуществ с точки зрения архитектуры процессоров [3]. В современной фоннеймановской архитектуре процессоров происходит потеря производительности за счет обмена данными между памятью и областью вычислений. В мемристорной элементной базе вычисления будут происходить непосредственно в памяти за счет изменения сопротивления мемристоров, что по сути является изменением синаптических весов в синапсах головного мозга.

На сегодняшний день одними из наиболее актуальных материалов для формирования мемристорных структур являются оксид галлия, нитрид кремния [4]. На рис. 1 изображен мемристор, разработанный в 2019 году на основе оксида галлия [5], в котором было обнаружено снижение напряжения записи под воздействием ультрафиолета за счет того, что фотогенерированные носители и кислородные вакансии снижают потенциальный барьер. Тем не менее остается открытым вопрос увеличения количества циклов переключения и надежности подобных структур. Соответственно, необходимы дальнейшие исследования в этой области. Одним из возможных решений данной проблемы может стать разработка структур с вариацией параметров толщин функционального слоя, материалов электродов, легирование активного слоя дополнительными примесями. В качестве материалов электродов могут быть рассмотрены Pt, TiN, TaN и другие [6].

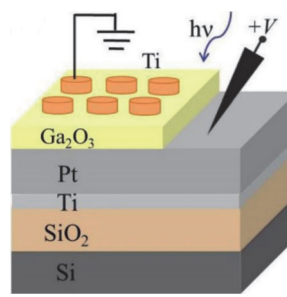


Рис. 1. Схематическое изображение мемристорной структуры на основе оксида галлия на кремниевой подложке [5]

Моделирование механизмов транспорта носителей заряда позволит определить оптимальные параметры для изготовления подобных структур, а проведение измерительных экспериментов в импульсном режиме позволит определить электрические параметры для задания режима работы мемристора, такие как ширина и амплитуда импульса переключения, время нарастания и спада импульса, время задержки между импульсами, обеспечивающие надежность структур [7].

Литература

1. Egorov K. V., Kirtaev R. V., Lebedinskii Y. Y., Orlov O. M. et al. Complementary and bipolar regimes of resistive switching in TiN/HfO_2/TiN stacks grown by atomic-layer deposition // Physica Status Solidi. A: Applications and Materials Science, 2015. Vol. 212. № 4. P. 809–816.
2. Strukov D. B. et al. The missing memristor found // Nature, 2008. Vol. 453. P. 80–83.
3. Egorov K. V., Lebedinskii Y. Y., Markeev A. M., Orlov O. M. Full ALD Ta_2O_5-based stacks for resistive random access memory grown with in vacuo XPS monitoring // Applied Surface Science, 2015. Vol. 356. P. 454–459.
4. Zhu L. et al. An overview of materials issues in resistive random access memory // J. Materiomics, 2015. Vol. 1. № 4. P. 285–295.
5. The modifcation of ultraviolet illumination to resistive switching behaviors in Ga_2O_3 memory device // Journal of Materials Science: Materials in Electronics, March 2019. Vol. 30. P. 8629–8635.
6. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2002. — С. 413–413.
7. Mehonic A., Kenyon A. J. Resistive Switching in Oxides // Defects at Oxide Surfaces. J. Jupille, G. Thornton (Eds.). Cham: Springer, 2015. P. 401–428.

УДК 538.915, 546.26

Исследование резистивного переключения в легированных азотом углеродных нанотрубках

Полывянова М. Р.[1], Соболева О. И. [1], Ильина М. В. [2], Ильин О. И.[1]
[1] Южный федеральный университет,
Научно-исследовательская лаборатория
технологии функциональных наноматериалов
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е
[2] Южный федеральный университет,
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е
polyvianova@sfedu.ru

Представлены результаты исследований резистивного переключения в легированных азотом углеродных нанотрубках в зависимости от параметров их роста. Установлено нелинейное изменение отношения сопротивлений HRS/LRS с увеличением аспектного отношения длины к диаметру, температуры роста и концентрации азота.

Ключевые слова: резистивное переключение; N-УНТ; бамбуковые перемычки; пьезоэлектрический эффект; мемристор.

Благодаря ряду преимуществ, таких как простая структура, низкая стоимость и энергопотребление, резистивная оперативная память (RRAM) привлекает большое внимание исследователей [1]. В качестве функциональных материалов для RRAM широко исследуются мемристорные структуры на основе оксидов металлов [2] и органических материалов [3]. Отдельное внимание уделяется углеродным наноматериалам, которые обладают более высокой термостойкостью и большей химической стабильностью. Одним из перспективных углеродных наноматериалов при разработке мемристоров для нейроморфных вычислений являются легированные азотом углеродные нанотрубки (N-УНТ) [4], которые демонстрируют многоуровневое резистивное переключение (РП). Целью данной работы является установление зависимости параметров РП N-УНТ от температуры роста, геометрических параметров, соотношения технологических газов и материалов нижнего электрода.

В качестве исследуемых образцов были использованы массивы N-УНТ, выращенные методом плазмохимического осаждения из газовой фазы в потоках технологических газов ацетилена (C_2H_2) и аммиака (NH_3). В качестве каталитического слоя выступал Ni, а в качестве материалов нижнего электрода использовались TiN, Ti, Mo и Cr. Исследование геометрических параметров массивов N-УНТ осуществлялось методом растровой электронной микроскопии. Исследования РП выполнялись методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). В процессе измерения вольт-амперных характеристик АСМ зонд был заземлен, на нижний электрод подавалось напряжение. При этом N-УНТ испытывали деформацию изгиба, вызванную прижимом зонда АСМ к вершине нанотрубки в процессе измерения.

В ходе исследования было выявлено, что температура роста значительно влияет на РП. С увеличением температуры роста от 500 до 575 отношение HRS/LRS снижается от 22 до 5, что связано с уменьшением дефектности N-УНТ и сокращением

количества «бамбуковых перемычек», которые являются источником пьезоэлектричества в N-УНТ и причиной РП в N-УНТ [5]. Также было установлено, что концентрация азота и геометрические параметры N-УНТ являются ключевыми факторами, влияющими на РП. С увеличением аспектного отношения длины к диаметру N-УНТ от 11 до 45 растет отношение сопротивлений HRS/LRS от 11 до 5549. Это связано с тем, что величина деформации N-УНТ при постоянной силе воздействия возрастает с ростом аспектного отношения нанотрубки, что приводит к увеличению внешнего электрического и внутреннего пьезоэлектрического полей. Увеличение отношения HRS/LRS с ростом концентрации азота связано с увеличением числа бамбуковых «перемычек».

Также было проведено исследование влияния материалов нижнего электрода на величину РП. Максимальное РП (HRS/LRS = 5434) наблюдалось для образца, выращенного на нижнем электроде из Mo, что связано с максимальной концентрацией азота пиррольного типа в N-УНТ, выращенных на нижнем электроде из Mo.

Таким образом, было показано влияние различных параметров на РП. Полученные результаты могут быть использованы при разработке мемристоров для нейроморфных вычислений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации; государственное задание в области научной деятельности № FENW-2022-0001.

Литература

1. Aziz T. N. T. A. et al. Transparent hybrid ZnO-graphene film for high stability switching behavior of memristor device // Mater. Sci. Semicond. Process, 2019. Vol. 89. P. 68–76.
2. Ryu H., Kim S. Self-Rectifying Resistive Switching and Short-Term Memory Characteristics in Pt/HfO_2/TaOx/TiN Artificial Synaptic Device // Nanomaterials, 2020. Vol. 10. № 11. P. 2159.
3. Sun Y. et al. Nonvolatile memory devices based on poly(vinyl alcohol) + graphene oxide hybrid composites // Phys. Chem., 2016. Vol. 18. № 16. P. 11341–11347.
4. Il'ina M. V. et al. Memristive switching mechanism of vertically aligned carbon nanotubes // Carbon, 2017. Vol. 123. P. 514–524.
5. Il'ina M. V. et al. Memristors based on strained multi-walled carbon nanotubes // Diam. Relat. Mater., 2022. Vol. 123. P. 108858.

УДК 621.382; 004.383.8.032.6; 519.6;

Дизайн матриц нейроморфных устройств для создания нейросетевых архитектур

Писарев А. Д., Николаева Е. А.
Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
evn.72@yandex.ru

В докладе рассмотрены топологии матриц нейроморфных компонентов с программируемыми синаптическими связями на мемристорах. Показано, что в матрицах необходима избыточность электронных узлов для динамического формирования нейросетевых архитектур, реализуемых на платформе биоморфного нейропроцессора.

Ключевые слова: биоморфный нейропроцессор; искусственный интеллект; мемристор; мемристорно-диодный кроссбар; импульсные нейронные сети.

На сегодняшний день в области нейроморфной электроники большой практический интерес представляет дизайн масштабируемых массивов мемристоров. Такие массивы могут найти применение не только в качестве резистивной памяти, но и в аппаратных средствах, предназначенных для реализации больших нейронных сетей, в том числе способных выйти на уровень моделирования сильного искусственного интеллекта (ИИ).

Искусственная система с малым количеством нейроморфных элементов не демонстрирует возможности сильного ИИ, но при этом как слабый ИИ сейчас находит широкое применение в различных народнохозяйственных сферах. Сильный ИИ потенциально может быть использован, что приведет к открытию новых способов познания. По мнению физиологов, для сильного искусственного интеллекта важно количество нейронов. В данном случае можно сформулировать тезис: в искусственных нейронных системах качество определяется количеством узлов сети и при достижении определенного размера искусственной нейронной системы можно получить качественный скачок от слабого к сильному ИИ.

Функциональность нейроморфных устройств в виде мемристорных запоминающей и логической матриц описана в работе [1]. В статье [2] представлены результаты схемотехнического моделирования работы импульсной нейросети на основе электрических схем запоминающей матрицы в режиме сложения взвешенных импульсов, логической матрицы в режиме маршрутизатора импульсов от нейронного блока на синапсы запоминающей матрицы. В [3] представлена концепция автономного аппаратного средства — нейропроцессора сверхбольших массивов электронных нейронов и синаптических связей.

Гипотеза настоящей работы заключается в создании универсального автономного аппаратного средства для любых нейросетевых архитектур, в том числе динамически изменяющихся, с помощью матриц нейроморфных устройств, которые выполняют нейронные функции с программируемыми связями и являются избыточными. В матрицах необходима избыточность электронных узлов для динамического формирования нейросетевых архитектур, реализуемых на платформе биоморфного нейропроцессора. Избыточность электронных узлов в нейропроцессоре необходима для гибкого формирования нейросетевых архитектур. Избыточность

предоставляет возможность формирования потенциальных узлов искусственной нейросети аналогично биологическим процессам образования и гибели нейронов.

Резюмируя, важно отметить, что для создания сильного искусственного интеллекта требуются миниатюрные устройства, совмещающие в себе запоминающие и базовые математические операции. На эту роль подходят мемристоры, стоимость формирования которых в интегральном виде по разработанным технологическим маршрутам на основе вакуумного магнетронного распыления низка по сравнению с площадью транзисторного кристалла, где для его создания используется много сложных технологических операций. Этот факт обуславливает использование понятия «избыточность» по отношению к нейроморфным электронным схемам.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства науки и высшего образования РФ «Приоритет-2030» и Центра природовдохновленного инжиниринга Тюменского государственного университета.

Литература

1. Pisarev A. D., Busygin A. N., Bobylev A. N., Udovichenko S. Yu. High element integration in logical and memory matrices of neuroprocessor by applying composite memristor-diode crossbar // International Journal of Nanotechnology, 2019. Vol. 16. № 1/2/3. P. 182–186. DOI: 10.1504/IJNT.2019.102404.
2. Udovichenko S. Yu., Pisarev A. D., Busygin A. N., Ebrahim A. H., Bobylev A. N., Gubin A. A. Modeling of processes of information processing in biomorphic neuroprocessor // OBM Neurobiology, 2022. Vol. 6. Special Issue № 3: Neuroscience and Information Technology. P. 1–15. DOI: 10.21926/obm.neurobiol.2203134.
3. Pisarev A. D., Busygin A. N., Udovichenko S. Yu., Maevsky O. V. The biomorphic neuroprocessor based on the composite memristor — diode crossbar // Microelectronic journal, 2020. 104827. DOI: 10.1016/j.mejo.2020. Art.104827.

УДК 621.382

Проектирование LIF-нейрона на основе обучаемых наноматериалов и компонентов твердотельной электроники

Боровинский В. К., Писарев А. Д.
Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
spcb.doc@gmail.com

В докладе представлены результаты проектирования LIF-нейрона с использованием процесса формирования проводящего филамента в металлооксидном мемристоре. Функция интегрирования импульсов напряжения реализована за счет латентного изменения длины филамента в мемристивном материале.
Ключевые слова: нейропроцессор; LIF-нейрон; мемристорно-диодный кроссбар; мемристор; филамент; LIF-нейрон.

Известные схемотехнические модели LIF-нейронов (Leaky Integrate-and-Fire) [1] не являются эффективными с точки зрения построения на их основе больших нейронных массивов, которые требуются для создания нейропроцессора. В настоящей работе рассматриваются варианты применения процесса роста филамента в металлооксидном мемристоре для моделирования скрытого параметра состояния LIF-нейрона. Такой подход является заменой электрического конденсатора в функции интегрирования LIF-нейрона и может быть реализован на основе мемристорно-диодного кроссбара [2] для формирования блоков больших массивов LIF-нейронов, комбинированных с компонентами твердотельной электроники.

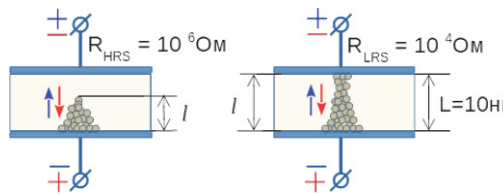


Рис. 1. Процесс роста филамента при подаче электрических импульсов

Срабатывание (Fire) LIF-нейрона основано на ключевом переключении электрического сопротивления мемристора, которое возникает на пороге перколяции проводящего канала в филаменте. На рис. 1 показано формирование филамента до порога перколяции и после. Рост филамента происходит за счет подачи положительного электрического импульса на мемристор, который модифицирует непроводящий оксид металла в проводящий металлический канал за счет движения ионов кислорода в сильном электрическом поле и формирования кислородных вакансий в объеме оксида. В момент срабатывания происходит замыкание проводящих слоев и резкий скачок сопротивления мемристора. В зависимости от полярности электрического импульса филамент может либо расти, либо уменьшаться в размерах, и этот процесс эквивалентен функции интегрирования (Integrate). За утечку (Leak) отвечает эффект «забывания» (диффузионный мемристор) [3], наблюдаемый в мемристорах, характеризуемый временем удержания малого резистивного

состояния τ_{LRS}, либо сброс состояния R_{LRS} путем подачи электрического импульса от внешней схемы.

В рамках настоящей работы с помощью рассмотренных схемотехнических решений с использованием скрытого параметра (длины филамента) и резистивного поведения мемристора в разработанной схеме LIF-нейрона промоделирован физиологический процесс формирования нейронной синаптической связи. Предложенное схемотехническое решение показывает, что можно увеличивать проводимость оставшихся мемристорных синапсов при обнаружении поврежденного, имитируя работу астроцита [4], что обеспечит возможность самовосстановления аппаратного устройства и значительно снизит требование к надежности мемристоров по аналогии с принципом защиты поврежденных нейронных связей в биологических системах. Таким образом, предложенную в статье [1] электрическую схему LIF-нейрона можно улучшить, заменив электрический конденсатор на мемристор и добавив помимо связок синапс — нейрон еще и третий объект, обеспечивающий обратную связь для защиты синапсов нейронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства науки и высшего образования РФ «Приоритет-2030» и Центра природовдохновленного инжиниринга Тюменского государственного университета.

Литература

1. Junxiu Liu, Yongchuang Huang, Yuling Luo, Harkin J., McDaid L. Bio-inspired fault detection circuits based on synapse and spiking neuron models // Neurocomputing, 2019. 331: 473–482. DOI: 10.1016/j.neucom.2018.11.078.
2. Pisarev A. D., Busygin A. N., Udovichenko S. Y., Maevsky O. V. A biomorphic neuroprocessor based on a composite memristor-diode crossbar // Microelectronics Journal, 2020. 104827. DOI: 10.1016/j.mejo.2020.104827.
3. Wang Z., Joshi S., Savel'ev S. et al. Memristors with diffusive dynamics as synaptic emulators for neuromorphic computing // Nature Mater, 2017. 16, 101–108. DOI: 10.1038/nmat4756.
4. Junxiu Liu, Harkin J., Maguire L. P., McDaid L. J., Wade J. J. SPANNER: A Self-Repairing Spiking Neural Network Hardware Architecture // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017. 29 (4): 1287–1300. DOI: 10.1109/TNNLS.2017.2673021.

УДК 621.382; 004.383.8.032.6; 519.6;

Разработка аппаратной импульсной нейронной сети

Писарев П. А., Писарев А. Д.
Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
spcb.doc@gmail.com

Исследование относится к области создания искусственного интеллекта путем разработки аппаратных средств для реализации больших импульсных нейронных сетей. Рассмотрен механизм синаптического взвешивания и процесс формирования информационных импульсов на уровне современной нейробиологической модели.

Ключевые слова: биоморфный нейропроцессор; искусственный интеллект; мемристор; мемристорно-диодный кроссбар; импульсные нейронные сети.

В настоящее время развиваются два фундаментально разных подхода к моделированию нейронных сетей: информационный и биологический. В информационном подходе используется модель формального нейрона в составе перцептрона [1]. Уровень упрощения процесса обработки информации по сравнению с биологическими нейронными системами слишком высок. Сложные биологические функции нейрона, определяющие пространственно-временные характеристики импульсных нейросигналов в его частях: дендрите, соме и аксоне, заменены на три последовательно выполняемые математические операции с числовыми данными: взвешивание уровня сигнала, суммирование взвешенных сигналов и активация суммы с помощью ступенчатой функции. Напротив, крайне сложна полная нейробиологическая модель нейрона Hodgkin, Huxley [2], в которой только изменение потенциала во времени на мембране нейрона описывается пятью дифференциальными уравнениями с тридцатью одним параметром. Вместе с тем биологический подход является более подходящим для воплощения в автономном аппаратном средстве, содержащем функционально похожие элементы на биологические нейроны.

На основе упрощенной системы уравнений [3], описывающей изменения потенциала во времени на мембране нейрона, в рамках настоящей работы выполнен анализ алгоритма прохождения информационного сигнала через биологический нейрон.

Механизм синаптического взвешивания сигнала между аксоном нейрона источника и дендритом нейрона приемника достаточно сложный. Этот процесс представлен на рис. 1 в виде блок-схемы алгоритма расчета параметров. Под действием импульсов в аксоне накапливается электрический потенциал (формируется кальциевый микродомен в аксонной терминали), что вызывает выброс молекул нейромедиатора в межсинаптическую щель.

Гипотеза данной работы заключается в том, что для создания сверхбольшой аппаратной импульсной нейросети необходимо построить физико-математическую модель нейрона, максимально упрощенную с точки зрения времени расчета, но без потери точности выполнения биологических функций, служащих для обработки информации. Этого можно достичь путем замены численного решения дифференциальных уравнений и алгоритмов, описывающих изменение потенциала на мембране нейрона, на явные передаточные функции подходящих электронных

компонентов. В качестве аппаратной основы для реализации биологически подобной нейросети будет использоваться мемристорно-диодный кроссбар — новый компонент наноэлектроники, разработанный для создания нейроморфных систем, на основе которого предложена концепция биоморфного нейропроцессора [5].

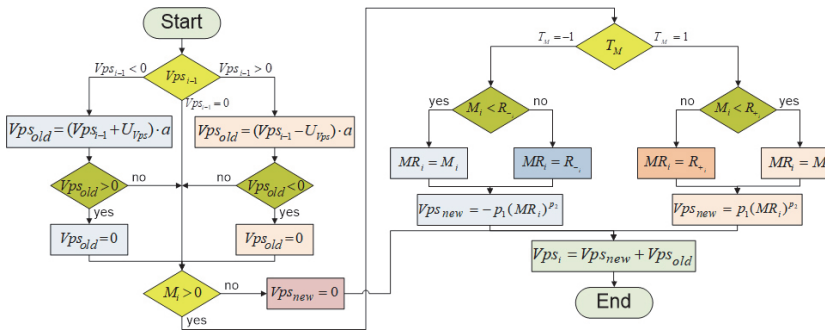


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета постсинаптического потенциала на мембране биологического нейрона [4]

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства науки и высшего образования РФ «Приоритет-2030» и Центра природовдохновленного инжиниринга Тюменского государственного университета.

Литература

1. Rosenblatt F. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain // Psychol. Rev., 1958. 65: 386–408. DOI: 10.1037/h0042519.
2. Hodgkin A. L., Huxley A. F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // Journal of Physiology, 1952. 117 (4): 500–544.
3. Malebra P., Rulkov N. F., Bazhenov M. Large time step discrete-time modeling of sharp wave activity in hippocampal area CA3 // Commun. Nonlinear. Sci. Numer. Simulat., 2019. 72: 162–175. DOI: 10.1016/j.cnsns.2018.12.009.
4. Filippov V. A., Bobylev A. N., Busygin A. N., Pisarev A. D., Udovichenko S. Yu. A biomorphic neuron model and principles of designing a neural network with memristor synapses for a biomorphic neuroprocessor // Neural Computing and Applications, 2020. 32. P. 2471–2485.
5. Pisarev A. D., Busygin A. N., Udovichenko S. Yu., Maevsky O. V. The biomorphic neuroprocessor based on the composite memristor — diode crossbar // Microelectronic journal, 2020. 104827. DOI:10.1016/j.mejo.2020. Art.104827.

УДК 004.032.26, 621.373.1.

Модель нейроморфного спайкового генератора на основе мемристивных наноустройств

Кипелкин И. М.
ННГУ им. Н. И. Лобачевского,
лаборатория стохастических мультистабильных систем
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
Ivan.kipelkin@yandex.ru

В работе исследуется мемристивная нейроморфная система. Благодаря внутренней адаптивности мемристоров было обнаружено, что встречно-параллельное подключение таких устройств способно имитировать работу ионных каналов нейрона и качественно воспроизводить основные характеристики нейрональной спайковой активности.
Ключевые слова: мемристор; ионный канал; нейрон; спайковая активность; нейроморфная система.

В последние годы в научных исследованиях активно исследуется возможность замены транзисторной технологии устройствами энергонезависимой памяти на основе эффекта резистивного переключения. Примером таких устройств можно считать мемристор — микроэлектронную двухполюсную структуру «металл — диэлектрик — металл» [1]. Исследования показали, что такого типа мемристор обладает свойством адаптивности [2]. Благодаря этому данное устройство является идеальным компонентом осцилляторных схем при имитации ионных каналов нейрона. Такие схемы разрабатываются как в упрощенном варианте, учитывающем исключительно кинетику одного канала [3, 4], так и в усложненном, представляющем модификации модели Ходжкина — Хаксли [5]. Однако данные устройства обладают высокой степенью стохастичности, что требует проведения комплексного исследования для точного управления системы в целом.

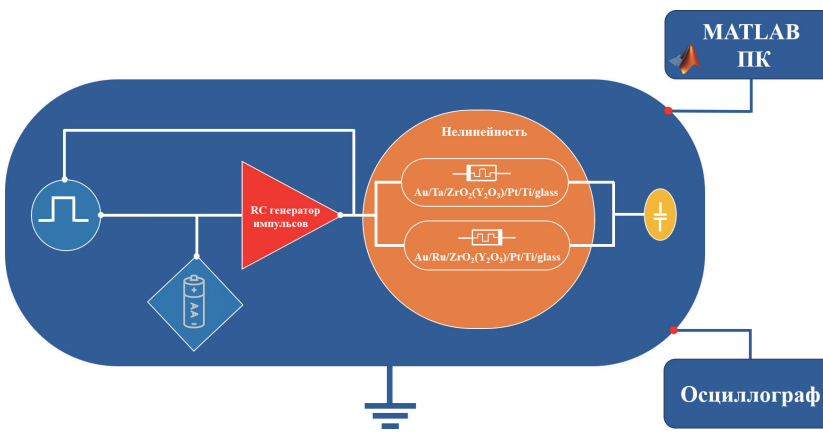


Рис. 1. Блок-схема мемристивной нейроморфной системы

Мемристивная нейроморфная система представляет из себя радиотехнический макетный образец, состоящий из ряда блоков и электронных компонентов (рис. 1). Конструктивной особенностью данного макета является использование встречно-параллельного подключения мемристивных устройств в блоке нелинейности, отвечающем за генерацию сигналов и имитацию ионных каналов, как и в живых нейронах. Благодаря этому данная система способна демонстрировать основные характеристики нейрональной спайковой активности, включая автоколебания, возбуждение, бистабильность, а также пачечнуюактивность.

Разработка таких систем открывает путь к современным и инновационным методам медицинского лечения травм спинного мозга, включающим в себя использование подкожных гибридных имплантов, основанных на нейрореабилитационном подходе и способных к самоадаптации и компенсации индивидуальных особенностей каждого конкретного медицинского случая.

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».

Литература

1. Chua L. Memristor-the missing circuit element // IEEE Transactions on circuit theory, 1971. Vol. 18. № 5. P. 507–519.
2. Yang F., Xu Y., Ma J. A memristive neuron and its adaptability to external electric field // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2023. Vol. 33. № 2.
3. Najem J. S. et al. Memristive ion channel-doped biomembranes as synaptic mimics // ACS nano, 2018. Vol. 12. № 5. P. 4702–4711.
4. Gonzalez-Raya T., Solano E., Sanz M. Quantized three-ion-channel neuron model for neural action potentials // Quantum, 2020. Vol. 4. P. 224.
5. Hu X., Liu C. Dynamic property analysis and circuit implementation of simplified memristive Hodgkin–Huxley neuron model // Nonlinear Dynamics, 2019. Vol. 97. P. 1721–1733.

УДК 004.048

Исследование свойств латентного пространства модели автоэнкодера для детектирования аномалий в отклике транзисторов

Чернова А. С.[1,2], Мещанинов Ф. П.[1], Жевненко Д. А.[1]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
achernova@niime.ru
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Предложен метод обнаружения аномальных вольт-амперных характеристик транзисторов на основе использования различных вариантов автоэнкодеров и энкодеров. Наряду с пороговой ошибкой восстановления рассматриваются скрытые представления при принятии решения об аномальности данных.
Ключевые слова: электроника; отказы; вольт-амперная характеристика; машинное обучение.

На этапе тестирования электронных устройств осуществляется контроль электрофизических параметров, включающий в себя процесс снятия вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзисторов в различных режимах функционирования [1]. Для анализа электронных устройств применяется специализированное программное обеспечение, содержащее в себе алгоритмы определения аномальности данных. Традиционные методы основываются на предварительно заданных пороговых значениях характеристик транзистора, требующих значительного объема статистических данных. Однако при разработке новых устройств такие пороговые значения зачастую не определены, а большие наборы данных недоступны. Методы на основе машинного обучения для детектирования аномалий, как правило, используют пороговое значение ошибки восстановления [2].

Предлагаемый подход обнаружения аномальных ВАХ транзисторов основан на использовании нейронных сетей в качестве инструмента для обнаружения аномалий. Применяемые нейросетевые модели представляют собой различные модели автоэнкодеров и энкодеров. Исходные данные кодируются энкодером в латентное пространство меньшей размерности, после чего в зависимости от архитектуры модели скрытые состояния с последнего слоя энкодера подаются на вход классификатору либо декодеру. Классификатор распределяет низкоразмерные векторные представления характеристик на классы. Двумерные представления можно визуализировать на графике, где по осям отложены координаты характеристики в латентном пространстве. На графике аномальные точки обозначены красным цветом. Точки без аномалий группируются вместе вдоль диагонали. Аномальные точки располагаются в стороне от диагонали. Дальнейшие исследования предполагают изучение подходов к формированию латентных пространств с более четкой структурой классов. Декодер восстанавливает характеристики до исходной размерности с некоторой ошибкой восстановления. В силу своей природы аномальные данные восстанавливаются с большей ошибкой восстановления [3]. Следовательно,

путем подбора порогового значения ошибки восстановления можно отделять аномальные точки данных от точек без аномалий.

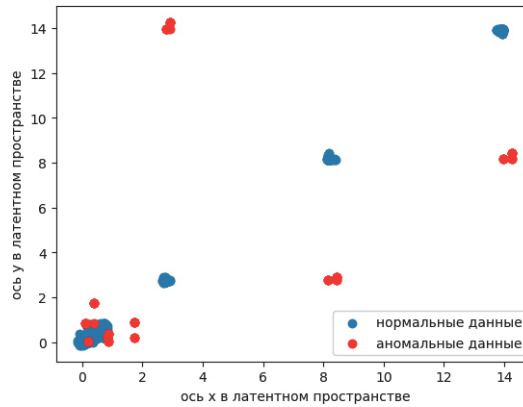


Рис. 1. Представления характеристик в латентном двумерном пространстве. Представление получено с помощью модели трехслойного полносвязного автоэнкодера, на вход которой подаются точки характеристики

Основной смысл данной работы заключается в изучении скрытых представлений, полученных нейросетевыми моделями в процессе обучения на данных без аномалий, наряду с пороговой ошибкой восстановления при принятии решения об аномальности данных. Эффективность предложенного подхода обнаружения аномалий была подтверждена в ходе валидации на 140 ВАХ с экспериментальными данными транзисторов. Данный поход к обнаружению аномалий ВАХ транзисторов может быть обобщен без фундаментальных изменений на другие прикладные задачи, например поиск аномалий во временных рядах.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.
2. Geiger A., Liu D., Alnegheimish S. et al. Tadgan: Time series anomaly detection using generative adversarial networks // 2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 2020. P. 33–43.
3. Cheng Z. et al. Improved autoencoder for unsupervised anomaly detection // International Journal of Intelligent Systems, 2021. Vol. 36. № 12. P. 7103–7125.

УДК 004.891.3

Разработка нейронной сети для системы поддержания работоспособности водителя на основе компьютерного зрения

Быканова У. Ф., Сметанин И. А., Сметанин Е. А., Асоян А. Р., д. т. н.
Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
bikanova.ulyana@yandex.ru

Система основана на анализе видеоряда с использованием компьютерного зрения. Она отслеживает мимику, позу, движения глаз водителя, оценивает его усталость и стресс. По результатам анализа система выдает своевременные предупреждения водителю в виде звуковых сигналов и уведомлений на приборной панели.

Ключевые слова: компьютерное зрение; машинное обучение; помощь водителю; безопасность дорожного движения; нейронные сети.

Повышение безопасности на дорогах — одна из важнейших задач современного мира. Усталость, невнимательность и стресс водителей часто становятся причинами аварий. Для решения этой проблемы активно разрабатываются системы, которые помогают водителям оставаться бодрыми и внимательными за рулем.

Одной из самых перспективных технологий в этой области является разработка систем на основе компьютерного зрения. Такие системы используют камеры, установленные в салоне автомобиля, чтобы анализировать поведение водителя в реальном времени.

С камеры в нейронную сеть подается видеоряд в режиме реального времени. Далее происходит предобработка данных и распознавание первичных признаков усталости по изменениям мимики водителя, положения его головы, частоты и длительности моргания глаз. При обнаружении признаков усталости или невнимательности программой подается предупреждающий звуковой сигнал для привлечения внимания водителя и сообщения на приборной панели или проекционном дисплее. В перспективе возможно подключение дополнительных функций, например световых сигналов или автоматического торможения.

Преимуществами данной разработки являются повышение безопасности, улучшение комфорта и снижение количества аварий. Разработка является инновационной, так как используются гибридные нейронные сети для получения более точных данных.

В перспективе возможно совершенствование алгоритмов компьютерного зрения, чтобы повысить точность и надежность систем. Также системы поддержания работоспособности водителя могут быть интегрированы с другими системами безопасности автомобиля, например с системой автоматического торможения или адаптивным круиз-контролем. В будущем система может даже помочь водителю выбрать оптимальный маршрут с учетом его физического и эмоционального состояния.

Разработка систем поддержания работоспособности водителя на основе компьютерного зрения — это одно из ключевых направлений в сфере безопасности дорожного движения. Эта технология имеет большой потенциал для спасения жизней и повышения комфорта вождения.

Литература

1. Володин А. А. и др. Интеллектуальная система контроля бдительности и действий машиниста // Бюллетень результатов научных исследований, 2024. — № 2. — С. 86–99.
2. Кириллова Е. С., Сериков С. А. Методы и средства контроля состояния водителя автомобиля // Международный журнал гуманитарных и естественных наук, 2024. — № 3-2 (90). — С. 169–172.
3. Макаев Д. В., Иванов И. И., Юров А. П. Система мониторинга состояния водителя как составная часть интеллектуальной системы управления транспортным потоком // Информационные технологии и инновации на транспорте, 2021. — С. 235–243.

УДК 004.056.55

Применение нейроморфных систем для решения задачи трекинга

Передерин И. Д., Евсиков В. А.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
idperederin@edu.hse.ru

Проанализированы основные алгоритмы глубинного обучения для решения задачи трекинга. Описаны некоторые нейроморфные алгоритмы, нейропроцессоры и событийные камеры, используемые для более эффективного трекинга. Произведено сравнение качественных и количественных характеристик этих устройств.

Ключевые слова: нейроморфные системы; глубинное обучение; трекинг объектов; нейропроцессоры; компьютерное зрение.

На сегодняшний день искусственные нейронные сети получают свое активное развитие в разных областях, в частности в задачах компьютерного зрения. Одной из задач компьютерного зрения является трекинг объекта на видеоизображении. Глубинное обучение, в частности алгоритмы, использующие сверточные нейронные сети, позволяют успешно решать эту задачу, однако у них есть ограничения по использованию: например, некоторые алгоритмы требуют ручной идентификации объекта трекинга. Некоторые из наиболее эффективных по качественным характеристикам алгоритмов включают:

- YOLO;
- FairMOT;
- Predator.

Эти алгоритмы используются на фон-неймановских компьютерах, и из-за необходимости проведения большого количества операций типа «обращение — получение» использование этих алгоритмов приводит к высокому энергопотреблению, увеличивающемуся с количеством объектов трекинга и размером изображения. Были разработаны нейроморфные алгоритмы, представляющие одну из компонент нейроморфной системы, имитирующие нейробиологические процессы зрения человека. Это позволяет повысить устойчивость системы к шумам на изображении, увеличить скорость работы и повысить количество объектов трекинга без потери точности. Нейроморфные алгоритмы трекинга успешно протестированы на задаче детектирования прохожих [1].

Другим компонентом нейроморфной системы является вычислительное устройство, на котором проводятся вычисления. Для ускорения вычислений в искусственных нейронных сетях и для снижения их энергопотребления были разработаны вычислительные устройства — нейропроцессоры. Их структура отличается от классических процессоров: сеть большинства их них состоит из соединенных между собой вычислительных блоков, имитирующих нейроны, у каждого из них свой блок памяти. Подчеркнем, что каждый нейрон потребляет энергию только в момент прохождения сигнала через него. Новый сигнал будет проходить лишь через определенный «путь», а не через всю сеть. То есть нет необходимости в питании

всей платы на этапf[использования нейропроцессора. Этот принцип был заимствован из импульсных нейронных сетей и позволяет в тысячи раз снижать энергопотребление. Некоторые из нейропроцессоров, успешно протестированных для задач компьютерного зрения:

- TrueNorth;
- Intel Loihi;
- Алтай;
- DynapCNN.

Можно также выделить третью компоненту нейроморфной системы: тип устройства захвата видеоизображения. Наиболее распространенными устройствами являются видеокамеры, представляющие изображения в виде множества пикселей. Такие устройства позволяют выделять «детали» на изображении, но обработка таких изображений является ресурсоемкой задачей. Если нет необходимости трекинга объекта, схожего с другими на изображении, можно использовать событийные камеры — они передают «локальные» изменения на уровне пикселей (эти изменения называются событиями), вызванными движением объекта на кадре. Таким образом, передается динамика изображения, при этом с гораздо более низкими затратами по памяти.

Нейромофные системы потребляют значительно меньше электроэнергии, могут работать в аналоговом режиме, ускоряя процесс трекинга, что делает их применимыми в системах контроля сверхбыстрых промышленных процессов, системах контроля ситуационной обстановки, беспилотных транспортных средствах и многих других отраслях.

Литература

1. Miau F., Papageorgio C. S. and Itti L. Neuromorphic algorithms for computer vision and attention // Proc. SPIE 4479, Applications and Science of Neural Networks, Fuzzy System. and Evolutionary Computation IV, (14 November 2001). URL: https://doi.org/10.1117/12.448343.
2. Kang J., Tariq S., Oh S., Woo S. A Survey of Deep Learning-Based Object Detection Methods and Datasets for Overhead Imagery // IEEE Access, 2022. 10. 1–1. 10.1109/ACCESS.2022.3149052.
3. Subramaniam A. A neuromorphic approach to image processing and machine vision // 2017 Fourth International Conference on Image Information Processing (ICIIP), Shimla, India, 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICIIP.2017.8313686.

УДК 004.056.2

Применение режима безопасных вычислений платформы «Эльбрус» в технологиях машинного обучения

Марченко И. В., Титов Е. М., Ярапов Д. В.
АО «МЦСТ»
117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108
iri3500@yandex.ru

Проанализированы пакеты поддержки алгоритмов машинного обучения, написанные на небезопасных с точки зрения работы с памятью языках программирования. Рассмотрены особенности процесса портирования в режим безопасных вычислений АПП «Эльбрус».

Ключевые слова: аппаратно-программная платформа «Эльбрус»; режим безопасных вычислений; машинное обучение; язык С.

Режим безопасных вычислений — режим исполнения программ на аппаратно-программной платформе «Эльбрус», обеспечивающий защиту от атак, использующих нарушение безопасности памяти, на аппаратном уровне. Таким атакам подвержены программы, имеющие исходный код на небезопасных с точки зрения работы с памятью языках программирования, таких как С и С++. Для обеспечения функционирования программы в режиме безопасных вычислений ее необходимо портировать в режим безопасных вычислений [1].

Существуют библиотеки, используемые в технологиях машинного обучения, написанные на языках программирования С и С++. Рассмотрены особенности портирования библиотек, используемых в машинном обучении, в режим безопасных вычислений.

Портированы соответствующие библиотекам пакеты поддержки алгоритмов машинного обучения, входящие в состав дистрибутива ОС Linux. Данные пакеты вошли в состав безопасного системного окружения, которое представляет собой изолированное системное окружение, предназначенное для работы с режимом безопасных вычислений на аппаратно-программной платформе «Эльбрус».

Литература

1. Артемьев И. А. и др. Сравнительный анализ технологий безопасного использования памяти с учетом аппаратно-программных особенностей вычислительных комплексов // Цифровые технологии и решения в сфере транспорта и образования, 2023. — С. 11–20.

УДК 004.89

Использование LLM при проектировании РЭА и ЭВМ

Зинченко Л. А., д. т. н., Казаков В. В., к. т. н., Терехов В. В., к. т. н., Карышев Б. В., Дорофеев А. В.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
numizma96@gmail.com

Разработана система поиска и агрегации информации из документации на электронные компоненты на основе больших языковых моделей (LLM). Проведено исследование качества работы системы на основе LLM GigaChat.
Ключевые слова: когнитивные технологии; языковые модели; LLM; электроника.

В настоящее время электроника стала неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. Она используется практически во всех сферах деятельности человека, начиная от обычных офисных задач и заканчивая сложными научными исследованиями.

Производство электроники состоит из множества этапов. Практически на каждом из них возникает проблема поиска и анализа информации. Конструкторы вынуждены проводить значительное время за поиском, что увеличивает время разработки нового устройства и снижает качество итогового устройства.

В рамках данной работы предлагается метод решения этой проблемы, заключающийся в применении больших языковых моделей [1] для подбора релевантных документов и генерации ответов, что позволяет генерировать легко воспринимаемые ответы. Был разработан программный комплекс, реализующий предложенную методику, на основе которого была протестирована ее работоспособность. Сервис был создан на основе отечественной языковой модели GigaChat [2]. Для ранжирования документов был применен подход, в основе которого лежат векторные представления [3], для чего использовалась модель e5 [4].

В целом процесс генерации выглядит следующим образом: в систему выгружаются документы. Они разбиваются на блоки и преобразуются в вектора моделью e5. Текстовый запрос пользователя также преобразуется в вектор моделью e5. Происходит ранжирование блоков на основе косинусной близости векторов запроса и блока. Релевантные блоки подаются на вход LLM вместе с запросом пользователя, прошлыми запросами и ответами, а также некоторым базовым промтом, описывающим задачу для LLM, далее происходит генерация ответа и возвращение его пользователю.

Методика заключалась в экспертной оценке авторами результатов работы созданной системы по трехзначной шкале и выставлении соответствующих им численных оценок: плохо (0), удовлетворительно (0.5), хорошо (1). Приведены средние результаты полученных оценок после генерации ответов на основе различного количества документов (табл. 1).

Таблица 1. Средние значения полученных оценок

	Фактическая корректность	Понятность	Краткость	Полнота
Один документ	0,56	1	0,94	0,76
Три документа	0,36	1	0,89	0,93

Исходный код разработанного сервиса является открытым программным обеспечением (Open Source) и был опубликован посредством сервиса GitHub по адресу: https://github.com/BorisKaryshev/LLM_in_doc_search.

По полученным оценкам (табл. 1) можно сделать вывод, что созданный сервис с задачей обобщения информации по тексту справляется. Все ответы грамматически верны и легко понимаются человеком. Однако система плохо отвечает на запросы общего характера, не содержащие упоминания названия компонента. Также иногда ввиду вероятностных особенностей генеративных моделей «путает» параметры (галлюцинирует). В случаях когда задаются общие вопросы, содержащие название компонента, такие как «в чем разница...» или «опиши...», система склонна генерировать чрезмерно много текста со слабой информационной нагрузкой,

Преимущество разработанного сервиса заключается в возможности получать готовый ответ на вопрос без необходимости проводить ручной поиск. Особенно эффективно он справляется с задачей поиска конкретного параметра у конкретного электронного компонента. Появляется возможность экономить время специалиста, что повышает эффективность производства электронной аппаратуры, ускоряет и удешевляет производственный цикл.

Литература

1. Федоров В. О., Поляков Р. А. Большие языковые модели с поисковой расширенной генерацией: обзор и перспективы // Оригинальные исследования, 2023. — Т. 13. — № 12. — С. 43–47.
2. Русскоязычная нейросеть от Сбера. — URL: https://developers.sber.ru/portal/products/gigachat (дата обращения: 14.04.2024).
3. Wang L. et al. Text Embeddings by Weakly-Supervised Contrastive Pre-training. 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2212.03533 (дата обращения: 14.04.2024).
4. Conneau A. et al. Unsupervised Cross-lingual Representation Learning at Scale. 2020. URL: https://arxiv.org/abs/1911.02116 (дата обращения: 14.04.2024).

УДК 004.3`1

Перспективы развития рынка чипов в Российской Федерации

Батманова А. Н.
ООО «Группа компаний «Иннотех»»
123112, г. Москва, Пресненская наб., 12, пом. 9/60
batmanova.uni@yandex.ru

Выделены наиболее актуальные архитектуры чипов, выдвинуты предположения о том, как будет развиваться производство чипов в РФ.
Ключевые слова: чипы; дефицит чипов; чиплеты; нейроморфные вычисления; искусственный интеллект; микроэлектроника; рынок полупроводников.

Ограниченный круг производителей, хрупкость цепочек поставок, отставание от закона Мура — все указывает, что оборудование может стать основным тормозом развития ИИ [1].

Есть два пути преодоления технических ограничений.

1. Гонка за количеством транзисторов.

В 2024 году в списке прорывных технологий года от MIT оказались чиплеты [2]. Это инновационная технология, которая объединяет чиплеты, создающиеся независимо друг от друга, в один процессор. Одно из главных преимуществ — гибкость создания конфигураций.

2. Создание принципиально новой архитектуры.

Нейроморфные вычисления черпают вдохновение в концепции мозга для создания энергоэффективных вычислительных систем. В августе 2022 г. был представлен нейроморфный чип NeuRRAM [3], созданный для функционирования в аналоговом режиме в целях повышения энергоэффективности. Ячейка памяти NeuRRAM может хранить несколько значений в непрерывном диапазоне, в отличие от двоичных ячеек. Это первый чип для вычислений в памяти, который использует небольшой процент от энергии, потребляемой аналогичными платформами, сохраняя эквивалентную точность. В нем имеются элементы, которые копируют работу нейронов и связей между ними (синапсов), что приближает ИИ к работе на огромном спектре периферийных устройств, отключенных от нтернета и облачных вычислений, что означает, что устройства могут выполнять сложные вычислительные задачи в любом месте в любое время. Так как выполнение задач в таком процессоре асинхронное и не требует тактовой частоты, энергоэффективность таких процессоров повышается в еще большей степени.

Очевидны риски, которые связаны с географическим сосредоточением основного производства всех видов чипов на Западе: хрупкость поставок, возможность подрыва поставок со злым умыслом, геополитика.

Упрощенный порядок ввоза электроники в РФ продолжит действовать до конца 2024 года [4]. Минпромторг выделяет миллиарды субсидий на импортозамещение микроэлектроники и надеется на создание полностью отечественных чипов 65 нм к 2030 г. [5]

На текущий момент в мире нет страны, которая производит все оборудование для микроэлектроники. Транспортировка оборудования — отдельный дорогостоящий процесс. Некоторые эксперты высказывают опасения, что в случае запуска в России завода печати микросхем нужно будет значительно расширять рынок сбыта, потому что завод должен функционировать 24/7 вне зависимости

от потребности. Остановка мощностей сопровождается сложностями по восстановлению работоспособности. Однако, по прогнозам аналитиков «Яков и Партнеры», совокупный спрос на чипы в России в 2030–2035 гг. может превысить отметку 100–150 тыс. пластин ежемесячно. При этом производительность некоторых производственных узлов TSMC еще в 2023 составляла всего лишь 45 тысяч пластин в месяц. Вероятность того, что, даже если в РФ и появится свой завод печати микросхем, полностью спрос он не покроет, достаточно велика.

Учитывая, что уже в 2024 году объем инвестиций в отрасль составил половину от определенного аналитиками «Яков и Партнеры» (400–500 млрд для суверенности отрасли) [6], рано или поздно появятся полностью отечественные чипы. Оптимальным выглядит вариант, когда менее сложные в производстве чипы будут производиться исключительно на российских заводах с российскими компонентами, а созданные по самым передовым технологиям чипы будут покупаться у мировых лидеров отрасли. Создать лучшие чипы силами одной страны, когда конкурентом является весь мир, кажется маловероятным. Помимо этого, можно рассмотреть создание альтернативных чипов для использования производственных мощностей. Например, микрофлюидных чипов — чипов с сетью микроканалов, отлитых внури чипа. Каналы соединяются для перекачки или контроля биохимической среды. Реакции проходят в закрытой системе чипа, где исключено смешивание, а объемы веществ минимальные. Вне медицины эти чипы могут использоваться в качестве охлаждающей системы в микросхемах [7].

Литература

1. Does AI have a hardware problem? // Nat Electron 1, 205 (2018). URL: https://doi.org/10.1038/s41928-018-0068-2.
2. 10 Breakthrough Technologies 2024 — MIT technology Review. URL: https://www.technologyreview.com/2024/01/08/1085094/10-breakthrough-technologies-2024/ (дата обращения: 09.07.2024).
3. Wan W., Kubendran R., Schaefer C. et al. A compute-in-memory chip based on resistive random-access memory // Nature 608, 504–512 (2022). URL: https://doi.org/10.1038/s41586-022-04992-8.
4. О внесении изменения в Постановление Правительства Российской Федерации от 9 мая 2022 г. № 834: Постановление Правительства от 29 декабря 2023 г. № 2388 // Официальный сайт Правительства РФ. — URL: http://government.ru/docs/50585 (дата обращения: 09.07.2024).
5. Об утверждении Правил предоставления субсидии из федерального бюджета некоммерческой организации «Фонд развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий» в целях поддержки и развития малых и средних дизайн-центров электроники: Постановление Правительства от 13 октября 2022 г. № 1827 // Официальный сайт Правительства РФ. — URL: http://government.ru/docs/46872 (дата обращения: 09.07.2024).
6. Микроэлектроника России. От дефицита к технологической независимости — ООО «Яков и партнеры»: официальный сайт. — URL: https://www.yakov.partners/upload/iblock/f25/lk5ly2orhij0b1f89ivy1rbe80ldsd1m/microelectronics_in_russia.pdf (дата обращения: 09.07.2024).
7. van Erp R., Soleimanzadeh R., Nela L. et al. Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling // Nature 585, 211–216 (2020). URL: https://doi.org/10.1038/s41586-020-2666-1.

УДК 65.011.56

Математическое моделирование для оценки инвестиционной эффективности при разработке сложной бортовой аппаратуры

Кузнецова Е. С.[1,2], Пепеляева А. И.[1,2], Иванченко С. А.[1,2], Терешкович В. Н.[1], Бобриков Д. А.[1]

[1]АО «НИИ «Субмикрон»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2

e.s.kuznetsova@inbox.ru

[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе оценена инвестиционная эффективность проекта до разработки. Проведен анализ и балансировка данных. Выбран метод оценки трудоемкости. Разработана модель с применением машинного обучения. Результаты позволяют по обозначению предсказывать объем, оценивая целесообразность и сокращая затраты.

Ключевые слова: математическое моделирование; машинное обучение; нейронные сети.

При разработке сложных изделий бортовой аппаратуры трудоемкость является ключевым фактором стоимости. Учитывая индивидуальный подход к разработке единичных изделий, возникает необходимость в прогнозировании трудозатрат до начала работ.

Для решения этой задачи была выдвинута гипотеза о возможности математического моделирования проекта с использованием алгоритмов машинного обучения [1]. В качестве исходных данных была использована база данных, содержащая информацию о всех ранее разработанных проектах в организации.

В организации в качестве информационной системы используется 1С:PLM. Для решения поставленной задачи потребовалось ввести параметр количества листов документа, приведенных к формату А4, чтобы иметь представление об объеме проекта по категории. Категории изделий в 1С:PLM представляют собой электронные структуры, содержащие всю информацию о сборочной единице и всех входящих в нее документах, сборочных единицах, деталях, материалах, прочих изделиях и комплектах. Данные из информационной системы в файл .xls были экспортированы с использованием дополнительной программы, специально написанной для решения поставленной задачи. В таблице представлены данные по столбцам: классификация, количество листов, приведенных к формату А4, и количество входящих сборочных единиц. Таким образом, были сформированы данные для датасета.

Для обучения модели необходимо использовать датасет в формате .csv, также все данные в нем по каждой строке должны быть записаны в одной колонке. Поэтому необходимо было преобразовать .xls в .csv и провести форматирование таблицы. Это удалось осуществить с использованием формул, поддерживаемых программой Microsoft Excel. В результате был создан датасет.

Репрезентативность в данном случае обеспечивается большим опытом разработки. Предполагается, что будут оцениваться только проекты, похожие на которые были ранее произведены. Таким образом, считаем, что выборка является

репрезентативной, так как в нее входят все электронные структуры всех изделий, разработанных за всю историю организации.

База данных была предварительно проанализирована на возможность ее использования для текущего проекта, и были предприняты действия по ее балансировке для потенциального увеличения точности работы модели. А именно: для оценки трудоемкости проекта необходимо производить его декомпозицию в соответствии со структурной схемой, это позволило получить более точные результаты моделирования.

В процессе анализа было выявлено, что в качестве показателя оценки может быть использовано обозначение изделия в соответствии с общероссийским классификатором [2].

В результате задача была приведена к методу линейной регрессии [3] и на его основе была разработана и обучена модель на ранее подготовленных данных. Таким образом, были достигнуты первые результаты, которые были проверены на ранее разработанных проектах, и точность модели была признана удовлетворительной для решения поставленной цели. Точность модели, проверяемая с помощью средней суммы абсолютной разницы между фактическим значением и прогнозируемым значением, составила 81 %.

Проект выполнен при поддержке программы развития МИЭТ до 2030 года.

Литература

1. Элбон Крис. Машинное обучение с использованием Python. Сборник рецептов: Пер. с англ. — СПб.: БХВ-Петербург, 2019. — 384 с. ISBN 978-5-9775-4056-8.
2. ОК 012-93. Общероссийский классификатор изделий и конструкторских документов (классификатор ЕСКД).
3. Баранов А. О., Музыко Е. И., Павлов В. Н. Оценка эффективности инновационных проектов с использованием опционного и нечетко-множественного подходов. — Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2018. — 336 с.

УДК 004

Оптимизация процессоров для эффективной работы нейронных сетей

Сметанин Е. А.[1], Сметанин И. А.[1,2], Быканова У. Ф.[1], Асоян А. Р.[1,3]
[1] Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
asoyan-ar@rudn.ru
[2] МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
smetanin.i@bmstu.ru
[3] Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
125319, г. Москва, Ленинградский просп., 64
asoyan.ar@mail.ru

В реализуемой системе мониторинга состояния водителя мы использовали конволюционные нейронные сети (CNN), способные в реальном времени обрабатывать видеосигнал.

Ключевые слова: система мониторинга состояния водителя; CNN; видеосигнал.

Для эффективной работы нейронных сетей критически важно разработать специализированные процессоры. Нейронные сети, особенно CNN, требуют значительных вычислительных ресурсов для выполнения операций свертки и матричных умножений [1]. Оптимизация использования памяти и управление кеш-памятью играют ключевую роль в минимизации задержек при передаче данных между памятью и вычислительными блоками [2]. В условиях мобильных устройств и систем с ограниченной энергией особенно важна энергоэффективность, для чего применяются технологии, такие как DVFS и эффективное управление питанием [3].

Параллельные вычислительные блоки, включая массивы матричных умножителей, значительно ускоряют выполнение операций в нейронных сетях [4]. Эффективное использование локальной памяти и многоуровневого кеша способствует повышению пропускной способности системы и минимизации задержек [5]. Процессоры, оптимизированные для выполнения сверток и функций активации, способствуют значительному улучшению производительности нейронных сетей [6].

Для эффективного использования специализированных процессоров необходимы оптимизированные библиотеки, поддерживающие популярные фреймворки, такие как TensorFlow и PyTorch [1, 2]. Google TPU и NVIDIA GPU с Tensor Cores представляют собой специализированные архитектуры, оптимизированные для операций над тензорами в нейронных сетях [3, 4]. ASIC и FPGA обеспечивают высокую производительность и гибкость настройки для работы с CNN [5, 6]. Их разработка способствует значительному улучшению производительности и энергоэффективности нейронных сетей в различных приложениях.

Литература

1. Krizhevsky A., Sutskeve I. and Hinton G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks // Communications of the ACM 60.6 (2017): 84–90.

2. Sze V. et al. Efficient processing of deep neural networks: A tutorial and survey // Proceedings of the IEEE 105.12 (2017): 2295–2329.
3. Google. Google TPU: An in-depth guide. URL: https://cloud.google.com/tpu/docs/in-depth.
4. NVIDIA. NVIDIA Tensor Cores. URL: https://www.nvidia.com/en-us/data-center/tensor-cores.
5. Han S. et al. Learning both weights and connections for efficient neural network // Advances in Neural Information Processing Systems.
6. Abadi M. et al. {TensorFlow}: a system for {Large-Scale} machine learning // 12th USENIX symposium on operating systems design and implementation (OSDI 16). 2016.

УДК 004.032.26

Нейросетевой подход к прогнозированию разводимости при проектировании СБИС с учетом начальных параметров топологи

Сайбодалов М. Х.[1,2], Дашиев М. В.[1,3], к. ф.-м. н., Карандашев Я. М.[1,2], Желудков Н. В.[1], Кочева Е. С.[1]

[1] ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
maratsaibodalov@gmail.com
[2] Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
[3] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Разработано нейросетевое решение задачи оценки карты разводимости на ранних этапах топологического проектирования цифровых блоков СБИС. Раннее предсказание разводимости позволит выбрать характеристики проектируемого блока, тем самым сократив число запусков САПР и общее время проектирования схемы.

Ключевые слова: СБИС; карта разводимости; машинное обучение; нейронные сети.

Одним из этапов топологического проектирования цифровых блоков СБИС является оценка разводимости межсоединений элементов на кристалле, которая и определяется как отношение числа необходимых межсоединений к числу доступных для разводки треков металлизации в заданной области. Если это соотношение не превышает 100 %, то нарушение разводимости в рассматриваемой области отсутствует. Большинство работ по предсказанию метрики разводимости связаны с графовыми или конволюционными нейронными сетями [1–2].

В данной работе мы предлагаем применять конволюционные сети, используя оценку, полученную с помощью алгоритма RUDY [3] в виде изображения. Наше главное нововведение заключается в использовании начальных параметров размещения, которые никогда ранее не применялись в других работах. Эти параметры выбираются до этапов размещения и трассировки и оказывают сильное влияние на окончательную карту разводимости. В этой работе мы рассматриваем четыре параметра: начальная плотность заполнения (core utilization), вид сетки земли — питания (pg type), количество металлов, а также параметр, запрещающий определенный процент треков для разводки (layer adjustment). На рис. 1 показано, как изменение начальной плотности заполнения влияет на конечную карту разводимости.

В качестве набора данных мы используем открытый датасет блоков openABC-D [4], представленных в виде RTL. Все эти дизайны были запущены с различными параметрами, о которых мы упоминали ранее. Затем для каждого из этих образцов мы рассчитываем априорные значения разводимости с помощью алгоритма RUDY. Для каждой сети в дизайне мы рассчитываем площадь

проводника/сети так, как это описано в оригинальной статье. Также в этой работе мы используем плотность ячеек, которая просто представляет собой количество ячеек в определенной области. Затем эти значения используются в качестве входных данных для наших моделей. Мы разделили этот набор данных на обучающую и валидационную выборки так, чтобы они не пересекались.

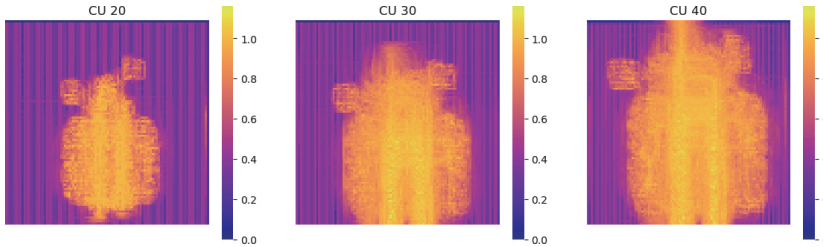


Рис. 1. Влияние параметра core utilization на итоговую карту разводимости

В табл. 1 представлены результаты работы наших моделей. В качестве метрики используется корреляция Пирсона, как и в других статьях по данной тематике. Можно сказать, что предложенные модели справляются с предсказанием разводимости, модель pix2pix делает это лучше остальных. На рис. 2 представлен пример результата работы модели. Основным недостатком, влияющим на результат, является малое количество данных для обучения. В будущем мы планируем увеличить количество дизайнов в несколько раз, что должно поспособствовать лучшим результатам работы моделей.

Таблица 1. Корреляция Пирсона между предсказанными и правильными картами разводимости для трех дизайнов и трех нейросетевых архитектур

Дизайн	UNet	Attention UNet	Pix2pix
eth_top	0,641	0,703	0,784
mc_top	0,805	0,807	0,847
fpu	0,747	0,763	0,777

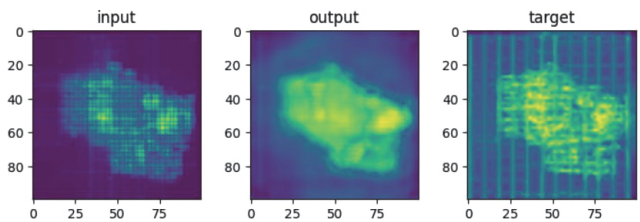


Рис. 2. Пример предсказания модели pix2pix

Литература

1. Kirby R., Godil S., Roy R., Catanzaro B. Congestionnet: Routing congestion prediction using deep graph neural networks // 2019 IFIP/IEEE 27th International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC), 2019. P. 217–222.
2. Yang S., Yang Z., Li D., Zhang Y., Zhang Z., Song G. and Hao J. Versatile multi-stage graph neural network for circuit representation // Advances in Neural Information Processing Systems, 2022. Vol. 35.
3. Spindler P. and Johannes F. M. Fast and accurate routing demand estimation for efficient routability-driven placement // 2007 Design, Automatin & Test in Europe Conference & Exhibition, Nice, France, 2007. P. 1–6. DOI: 10.1109/DATE.2007.364463.
4. Chowdhury A. B., Tan B., Karri R., Garg S. OpenABC-D: a large-scale dataset for machine learning guided integrated circuit synthesis, 2021. arXiv 2110.11292.

УДК 004

Интеграция алгоритмов искусственного интеллекта для распознавания изображений на одноплатных компьютерах: методы и практическое применение

Ахметшин Д. А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68
AkhmetshinDA@corp.knrtu.ru

В последние годы в интернет-индустрии активно развиваются умные решения, охватывающие широкий спектр устройств, таких как телефоны, автомобили, чайники, часы и умные дома. Современные технологии позволяют автомобилям самостоятельно доставлять пассажиров до пункта назначения и парковаться. Компьютеризация и обработка больших данных с использованием сенсоров и камер помогают анализировать текущую ситуацию и управлять действиями автомобиля. Обучение с подкреплением позволяет автопилоту улучшаться, минимизируя ошибки и повышая безопасность. В статье рассматриваются методы распознавания изображений и алгоритмы машинного обучения, применимые для одноплатных компьютеров, таких как Raspberry Pi, для создания эффективных и надежных систем распознавания.

На сегодняшний день активно развиваются умные решения в интернет-индустрии: телефоны, автомобили, чайники, часы и умные дома. Благодаря современным технологиям скоро не нужно будет следить за дорогой: машина сама доставит до нужного пункта назначения и даже припаркуется в свободном месте. Принимающая сторона сама автоматически через Интернет сообщит геолокацию свободной парковки, и автопилот на автомобиле автоматически доедет до нужного места. Это обусловлено тем, что посредством компьютеризации и обработки больших данных посредством сенсоров автоматически анализируется текущая ситуация — как при помощи камер, так и различными сенсорами. Блок управления на компьютере принимает заранее обученный алгоритм действия в автомобиле. Например, остановить машину, двигаться по заданной траектории и т. д. Текущие алгоритмы постоянно улучшаются путем машинного обучения. Для автопилотов, как правило, используется обучение с подкреплением. В этом случае разрабатывают автопилот, который учится распознавать объекты и принимать решения на дороге. Конечно, иногда он ошибается, например сталкивается с ограждением, и в этом случае система мгновенно отправляет обратную связь и накапливает ряд ошибок. Модель данных снова обучается на основе текущих ошибок, и в будущем автопилот при схожей ситуации принимает правильное решение — объезжает препятствие. Таким образом, после многочисленных поездок автопилот начинает управлять автомобилем с высоким уровнем безопасности.

В основе обучения с подкреплением лежит процесс марковского принятия решений [1], который описывается следующими элементами:

1) состояния (S) — пространство всех возможных состояний;
2) действия (A) — пространство всех возможных действий;

3) функция награды ($R(s,a)$) — ожидаемая награда за выполнение действия a в состоянии s;
4) переходная функция ($P(s'|s,a)$) — вероятность перехода в новое состояние s' при выполнении действия a в состоянии s.

Обучение с подкреплением пытается найти оптимальную политику π*, которая максимизирует ожидаемую суммарную награду:

$$\pi^*(s) = \arg\max_a \sum_{s'} P(s' s,a)\left[R(s,a) + \gamma V(s')\right],$$

где γ — коэффициент дисконтирования, определяющий, насколько сильно агент учитывает будущие награды.

Алгоритм обучения с подкреплением

На практике для обучения автопилота используются различные алгоритмы, такие как Q-обучение, глубокое Q-обучение (DQN) и алгоритмы на основе политики (например A3C, PPO).

Пример Q-обучения:

1. Инициализируем Q-функцию $Q(s,a)$ произвольными значениями.
2. Повторение для каждого эпизода.

   Начинаем с начального состояния s.

   Повторяем, пока состояние не будет терминальным:
   - выбираем действие a с использованием ∈ — жадной стратегии;
   - выполняем действие a, наблюдаем награду r и новое состояние s';
   - обновляем Q-функцию: $Q(s,a) \leftarrow Q(s,a) + \alpha[r + \gamma \max_{a'} Q(s',a') - Q(s,a)]$;
   - переходим в новое состояние s'.

В результате многократного повторения таких эпизодов Q-функция будет приближаться к оптимальной и автопилот начнет принимать более правильные и безопасные решения на дороге.

Для решения предлагается использовать одноплатные компьютеры, такие как Raspberry Pi и Arduino, для обработки данных. Эти устройства позволяют подключать множество сенсоров и камер для получения необходимых данных. Распознавание изображений включает в себя множество алгоритмов и методов машинного обучения и компьютерного зрения, которые позволяют извлекать и интерпретировать информацию из визуальных данных.

Основные методы распознавания изображений:

1. Классические методы компьютерного зрения:
   - метод гистограмм ориентированных градиентов (HOG);
   - метод локальных бинарных шаблонов (LBP);
   - метод обнаружения краев Канни.
2. Методы машинного обучения:
   - алгоритмы классификации (например SVM, KNN);
   - метод опорных векторов (SVM).
3. Глубокое обучение:
   - сверточные нейронные сети (CNN);
   - архитектуры, такие как VGG, ResNet, Inception, EfficientNet.

Алгоритм работы распознавания изображений на устройстве Raspberry Pi:

1. Настройка камеры и захват изображений.
2. Предобработка изображений.

3. Загрузка и выполнение модели TensorFlow Lite [2] для распознавания объектов.
4. Отображение результатов.

Пример кода на Python

```
import cv2
import numpy as np
import tensorflow as tf
from tensorflow.lite.python.interpreter import Interpreter
from picamera.array import PiRGBArray
from picamera import PiCamera
import time
# Загрузка модели TensorFlow Lite
model_path = 'model_v1_1.0.tflite'
interpreter = Interpreter(model_path)
interpreter.allocate_tensors()
# Получение информации о входных и выходных тензорах
input_details = interpreter.get_input_details()
output_details = interpreter.get_output_details()
# Параметры камеры
width, height = input_details[0]['shape'][1], input_details[0]['shape'][2]
# Настройка камеры
camera = PiCamera()
camera.resolution = (width, height)
camera.framerate = 30
rawCapture = PiRGBArray(camera, size = (width, height))
# Делаем паузу для настройки камеры
time.sleep(2)
# Классы объектов, которые распознает модель
labels = ["background", "aeroplane", "bicycle", "bird", "boat", "bottle", "bus",
"car", "cat", "chair", "cow", "diningtable", "dog", "horse", "motorbike",
"person", "pottedplant", "sheep", "sofa", "train", "tvmonitor"]
# Захват и обработка изображений
   for frame in camera.capture_continuous(rawCapture, format = »bgr», use_video_
   port = True):
   image = frame.array
   # Предобработка изображения
   input_data = cv2.resize(image, (width, height))
   input_data = np.expand_dims(input_data, axis = 0)
   input_data = np.float32(input_data)
   # Запуск модели
   interpreter.set_tensor(input_details[0]['index'], input_data)
   interpreter.invoke()
   # Получение результата
   output_data = interpreter.get_tensor(output_details[0]['index'])
   results = np.squeeze(output_data)
   # Отображение результатов
   top_result = np.argmax(results)
```

```
    label = labels[top_result]
    confidence = results[top_result]
    # Вывод результата на изображение
    cv2.putText(image, f'{label} ({confidence:.2f})', (10, 30), cv2.FONT_HERSHEY_
    SIMPLEX, 1, (255, 0, 0), 2, cv2.LINE_AA)
    cv2.imshow(«Object Detection», image)
    # Очистка потока
    rawCapture.truncate(0)
    # Завершение по нажатию клавиши 'q'
    if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
        break
# Освобождение ресурсов
cv2.destroyAllWindows()
camera.close()
```

Этот код демонстрирует базовый алгоритм распознавания объектов с использованием камеры Raspberry Pi и модели TensorFlow Lite.

Примеры использования:

- использование Raspberry Pi Camera Module для захвата изображений;
- развертывание TensorFlow Lite для выполнения задач распознавания изображений на устройстве;
- использование библиотеки OpenCV для предварительной обработки изображений.

Заключение

Использование одноплатных компьютеров для распознавания изображений и сбора данных предлагает доступные и эффективные решения для различных приложений. Оптимизация алгоритмов и использование специализированного аппаратного обеспечения позволяют значительно улучшить производительность и точность распознавания, делая такие системы более надежными и масштабируемыми, в результате их можно портативно подключать на различные устройства, такие как автомобили.

Литература

1. Саттон Р. С., Барто Э. Дж. Обучение с подкреплением: Введение = Reinforcement Learning. — 2-е изд. —М.: ДМК Пресс, 2020. — С. 552.
2. Вандер Плас Д. Python для сложных задач: наука о данных. 2-е межд. издание. — СПб.: Питер Пресс, 2024. — С. 592.

УДК 004.032.26

Исследование эффективности методов обучения нейронных сетей в решении задачи классификации на основе малых данных

Маврин И. А., д. ф.-м. н. Андреева Н. В., д. т. н. Рындин Е. А.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
iamavrin@etu.ru

Проведено исследование эффективности обучения импульсных нейронных сетей с использованием правил обучения STBP, deSNN, модифицированного ReSuMe. Приводятся результаты оценки сравнительной эффективности работы алгоритмов обучения при решении задачи классификации записей ЭЭГ базы данных BCI Competition IV.
Ключевые слова: импульсная нейронная сеть; обучение с учителем; ЭЭГ; нейроморфная электроника.

При решении задач анализа биологических сигналов, таких как записи ЭЭГ, данные, доступные для обучения, часто ограничены записями десятков пациентов. Такой объем обучающей выборки оказывается недостаточным при использовании традиционных алгоритмов машинного обучения. Считается, что импульсные нейронные сети (ИмНС) показывают более высокую эффективность обучения на малых данных.

Для распознавания биологических сигналов при помощи ИмНС наиболее часто используются правила обучения с учителем на основе постулата Хебба или метода градиентного спуска. Постулат Хебба — это нейробиологический принцип, описывающий правила укрепления и ослабления синаптических связей в зависимости от активности пресинаптического и постсинаптического нейронов. Метод градиентного спуска заключается в аналитическом вычислении градиента функции ошибки по параметрам нейросети. Применение этого метода для обучения ИмНС является сложной задачей из-за невозможности аналитического вычисления градиента и требует использования приближенных методов.

Для обучения ИмНС классификации ЭЭГ чаще прочих применяются правила STBP (spatiotemporal backpropagation, обратное распространение в пространстве и времени) [1] и deSNN (dynamic evolving SNN, динамическая эволюционирующая импульсная нейронная сеть) [2].

В рамках исследования было проведено сравнение правил обучения STBP, deSNN и модифицированного правила ReSuMe (remote supervised method, метод обучения с удаленным наблюдением) [3].

1) Правило STBP основано на методе градиентного спуска. Оно позволяет производить обучение многослойных ИНС с произвольной топологией связей. При этом область его применения ограничена обучением ИмНС, использующим частотное или порядковое кодирование сигнала. При обучении ИмНС с применением STBP меняются только величины синаптических весов и порог срабатывания нейрона.

2) Правило deSNN позволяет постепенно наращивать количество нейронов ИмНС, шаг за шагом приближая функционирование ИмНС к требуемому. Оно применяется для обучения многослойных ИмНС прямого распространения. Важной особенностью является то, что обучение каждого нового добавляемого нейрона происходит без изменения весов других нейронов.

3) ReSuMe — правило обучения многослойных ИмНС, основанное на постулате Хебба. Оно позволяет обучать многослойные ИмНС прямого распространения как единое целое, не требуя использования приближенных методов расчета градиента, и занимает промежуточное положение между предыдущими двумя алгоритмами. Оно поддерживает использование временного кодирования сигнала. В ходе обучения с применением ReSuMe производится одновременная настройка весов и задержек прохождения сигнала по синапсам.

Перечисленный набор правил обучения позволяет сравнить результаты, достижимые при обучении ИмНС, с применением правил на основе метода градиентного спуска и на основе постулата Хебба. Обучение производилось на основе записей ЭЭГ из состава базы данных BCI Competition IV [4]. Производилось сравнение достигнутых результатов по следующим критериям:

1) количество нейронов, необходимое для функционирования сети;

2) достигнутая точность классификации;

3) воспроизводимость результатов обучения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант FSEE-2020-0013.

Литература

1. Wu Y., Deng L., Li G. et al. Spatio-Temporal Backpropagation for Training High-Performance Spiking Neural Networks // Frontiers in Neuroscience, 2018. Vol. 12.
2. Kasabov N., Dhoble K., Nuntalid N., Indiveri G. Dynamic evolving spiking neural networks for on-line spatio- and spectro-temporal pattern recognition // Neural Networks, 2013. Vol. 41. P. 188–201.
3. Sporea I., Grüning A. Supervised Learning in Multilayer Spiking Neural Networks // Neural Computation, 2013. Vol. 25. № 2. P. 473–509.
4. Brunner C., Leeb R., Muller-Putz G. R., Schlogl A. BCI Competition 2008 — Graz data set A, 2008.

УДК 004.932.4

Применение методов глубокого обучения в задаче коррекции эффектов оптической близости

Московцев А. Ф.[1,2], Харченко Е. Л.[1,2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В данной работе были протестированы три модели глубоких нейронных сетей на наборе топологических элементов для слоя металлов с характерными размерами 32 нм в целях разработки эффективного решения проблемы коррекции элементов топологии при проектировании фотошаблонов.
Ключевые слова: OPC; deep learning; image-to-image.

Вычислительная литография является одним из важнейших направлений исследований для дальнейшего масштабирования технологии производства путем улучшения точности переноса топологического дизайна с фотошаблона на пластину [1]. По мере уменьшения проектных норм достижение точного переноса элементов топологии становится все более сложной задачей из-за оптических эффектов близости [2]. Данные эффекты вызывают искажения элементов, получаемых в кремниевой пластине, что приводит к снижению производительности технологического процесса и уменьшению выхода годных. Коррекция эффектов оптической близости (Optical Proximity Correction — OPC) — важнейшая техника повышения разрешающей способности фотолитографии, используемая для предотвращения нежелательных оптических эффектов путем внесения преднамеренных изменений в геометрию фотошаблона для повышения точности формирования изображения в фоторезисте.

К числу основных решений в области OPC относятся OPC на основе правил (rule-based OPC), OPC на основе моделирования (model-based OPC), OPC на основе метода инверсной литографии (Inverse lithography technique), а также методы на основе машинного и глубокого обучения [3, 4].

Однако описанные методы имеют ряд недостатков. Так, для обработки кристалла методами model-based OPC или ILT, использующими традиционные методы моделирования, заложенные в САПР, может потребоваться несколько дней работы CPU/GPU. Методы на основе машинного обучения достигают высокой точности в предсказании величины сдвига для фрагментов топологии и обладают большим быстродействием, однако сам процесс сбора данных и постобработка предсказаний моделей не являются оптимальными для внедрения в производственный процесс. Модели на основе глубокого обучения (deep learning — DL) позволяют сократить время выполнения генерации маски. По сравнению с традиционными методами, требующими множества итераций для генерации маски, методы на основе DL позволяют генерировать маску за одну итерацию. Кроме того, использование различных функций потерь может значительно улучшить результаты коррекции. Последние работы в области DL [5, 6] предлагают перспективную альтернативу, применяя методы переноса изображения (image-to-image translation) для предсказания

топологических коррекций, где в качестве обучающих данных используются пары изображений — исходный дизайн элемента топологии и соответствующая ему коррекция (откорректированная маска).

Для обучения моделей был использован набор топологических элементов для слоя металлов с характерными размерами **32 нм**, найденный в открытом доступе и дополненный собственной откорректированной топологией. Файлы топологии были переведены в бинарные изображения разрешением **1024×1024 пикселя**, где каждый пиксель соответствует области **1 нм^2** топологического элемента.

В ходе работы были протестированы три модели глубокого обучения для решения задачи DL-OPC: **U-Net**[7], **pix2pixHD**[8], **DAMO** (Deep Agile Mask Optimization) [9].

Производительность моделей оценивалась с точки зрения скорости генерации изображений и качества смоделированного изображения для полученной откорректированной маски. Для оценки точности моделей использовался следующий набор метрик: средняя величина ошибки размещения края (edge placement error — EPE) между исходным дизайном и смоделированным изображением на пластине; вариация процессного окна (process variation band — PVB), оценивающая устойчивость маски к изменяющимся условиям процесса; L2-норма разности между смоделированным изображением на пластине и исходным дизайном топологии.

Полученные результаты демонстрируют потенциал моделей глубокого обучения для эффективной и точной коррекции элементов топологии в фотолитографии.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.
2. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // NanoRus, 2020. —Т. 13. — № 5s. — С. 13–19.
3. Tryasoguzov P. E. et al. Using Machine Learning Methods to Predict the Magnitude and the Direction of Mask Fragments Displacement in Optical Proximity Correction (OPC) // Opt. Mem. Neural Networks, 2021. Vol. 30. № 4. P. 291–297.
4. Yang H. et al. GAN-OPC: Mask optimization with lithography-guided generative adversarial nets // Proceedings of the 55th Annual Design Automation Conference, 2018. P. 1–6.
5. Karandashev I. M. et al. Investigating the Efficiency of Using U-Net, Erf-Net and DeepLabV3 Architectures in Inverse Lithography-based 90-nm Photomask Generation // Opt. Mem. Neural Networks, 2023. Vol. 32. № 4. P. 219–225.
6. Zheng S. et al. LithoBench: Benchmarking AI Computational Lithography for Semiconductor Manufacturing // Advances in Neural Information Processing Systems / ed. Oh A. et al. Curran Associates, Inc., 2023. Vol. 36. P. 30243–30254.
7. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. arXiv, 2015.
8. Wang T.-C. et al. High-Resolution Image Synthesis and Semantic Manipulation with Conditional GANs. arXiv, 2017.
9. Chen G. et al. DAMO: Deep Agile Mask Optimization for Full Chip Scale. arXiv, 2020.

УДК 004.896

Разработка подхода по выбору набора данных для нейросетей, моделирующих процесс экспонирования в фотолитографии, на основе нейроператоров Фурье

Кошлаков А. В.[1,2], Метельников А. А.[1]
[1] ПАО «Сбербанк России»
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Koshlakov.av@phystech.edu, AAMetelnikov@sberbank.ru

В данной работе предлагается подход по созданию набора данных, который содержит минимальное количество элементов в обучающей выборке, а с другой стороны, обладает информацией об искажениях в литографии, необходимой для обеспечения наибольшей обобщающей способности обученных на нем нейронных сетей с ограничениями.

Ключевые слова: нейронная сеть; вычислительная литография; нейрооператор Фурье; регуляризация; обобщающая способность нейронной сети.

Сегодня для моделирования процесса экспонирования в фотолитографии рассматриваются нейронные сети [1, 2], а в особенности применение физически информированных нейронных сетей и нейронных сетей с ограничениями [1]. В основном исследования нацелены на усовершенствование их архитектуры [1], а для составления обучающего набора данных рассматриваются известные в машинном обучении подходы [2].

Обучение нейронных сетей и проверка качества симуляции в статьях [1, 2] были проведены на синтетических данных. При использовании нейронных сетей для симуляции литографии потребуется получить обучающую выборку, включающую изображения реальной печати. Из-за трудоемкости процесса ручной съемки растровыми электронными микроскопами и постоянных изменений в технологическом процессе затруднительно будет каждый раз получать большую обучающую выборку (5000–10000 изображений структур), которая использовалась авторами статей [1, 2]. Поэтому актуальной является задача разработки набора данных, обеспечивающего наилучшую обобщающую способность при минимальном количестве данных.

Целью данной работы является разработка подхода по выбору набора данных, который содержит минимальное количество элементов в обучающей выборке, а с другой стороны, обладает информацией об искажениях в литографии, необходимой для обеспечения наилучшей обобщающей способности обученных на нем нейронных сетей с ограничениями.

Авторы считают, что новизна данной работы заключается в предложенном подходе сокращения набора данных, который основан на выборе обучающей выборки на основе анализа пространственных частот, имеющихся в распечатываемых на пластине структурах.

Все эксперименты в работе проведены на синтетических данных, полученных при помощи симулятора процесса экспонирования фотолитографии из [3]. В качестве обучающих выборок рассмотрено два набора синтетических данных:

- набор данных, который использовали авторы в работе [3] (открытый набор данных);
- сгенерированный при помощи предложенного подхода набор данных.

Для проверки качества обучения использовалась выборка из открытого набора данных.

Проведен ряд экспериментов по обучению нейронной сети с ограничениями по физике DOINN [1], которые показали, что нейронная сеть, обученная на наборе данных, полученных при помощи предложенного подхода, имеет сравнимую с обученной на открытом наборе данных обобщающую способность при тестировании на выборке из открытого набора данных.

Литература

1. Yang H. et al. Generic lithography modeling with dual-band optics-inspired neural networks // Proceedings of the 59th ACM/IEEE Design Automation Conference, 2022. P. 973–978. DOI: 10.1145/3489517.3530580.
2. Shao H. et al. Data-Driven Approaches for Process Simulation and Optical Proximity Correction // 2023 28th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC), 2023. P. 721–726. DOI: 10.1145/3566097.3568362.
3. Jiang B. et al. Neural-ILT: migrating ILT to neural networks for mask printability and complexity co-optimization // 2020 IEEE/ACM International Conference On Computer Aided Design (ICCAD), 2020. P. 1–9. DOI: 10.1145/3400302.3415704.

УДК 004.431

Инструмент для автоматизации входного контроля топологий при проектировании фотошаблонов

Колупаев М. Е., Медведев К. А., Рябинин А. Д.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
mkolupaev@niime.ru

В работе предложена реализация инструмента для автоматизации входного контроля топологий при приеме информации для проектирования фотошаблонов (ФШ). Описан алгоритм проверки топологии на соответствие требованиям маршрута проектирования ФШ. Разработано приложение для хранения информации о составе актуальных комплектов средств проектирования (КСП).
Ключевые слова: комплект средств проектирования (КСП); входной контроль; фотошаблоны (ФШ).

Одним из важнейших факторов в производстве микросхем является качество производимой продукции. Изготавливаемые микроприборы должны соответствовать технологическому маршруту [1] и предусмотренным в нем правилам. Ошибки, допущенные при разработке ИС, могут приводить к существенному снижению показателя выхода годных изделий, поэтому необходимо обнаруживать их на ранних стадиях [2]. Для обеспечения качества продукции на должном уровне необходимо, чтобы на всех стадиях проектирования и производства ИС проходил этап контроля [3].

В работе рассматривается программный инструмент для автоматизации выполнения входного контроля при приеме информации для проектирования фотошаблонов. Он состоит из базы данных с технологической информацией, веб-интерфейса для взаимодействия с пользователем, сервиса для запуска необходимых проверок и вспомогательного ПО для хранения информации о составе актуальных КСП.

Проверка топологии выполняется в два этапа:

- первый этап — проверка топологии на соответствие требованиям маршрута проектирования ФШ, которая включает определение технологического маршрута, проверку центрирования, состава топологических слоев и т. д.;
- второй этап — проверка на соответствие правилам проектирования (DRC — design rule check).

Внедрение разработанных программных инструментов позволило обеспечить:

- существенное снижение вероятности возникновения ошибок из-за человеческого фактора на этапе проектирования ФШ;
- значительное сокращение временных затрат на прием топологической информации;
- возможность накопления статистической информации для последующего анализа влияния конкретных ошибок в топологии на показатель выхода годных.

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. Grochowski A., Bhattacharya D., Viswanathan T. R. and Laker K. Integrated circuit testing for quality assurance in manufacturing: history, current statu. and future trends // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, Aug. 1997. Vol. 44. № 8. P. 610–633.
3. Королева А. Н. Разработка научно-методических основ управления качеством базовых технологий, используемых при проектировании и производстве сверхбольших интегральных схем: дис. на соискание ученой степени канд. наук. — 2021.

УДК 004.422.8

Программный модуль автоматизации процесса подготовки управляющей информации для производства фотошаблонов

Шохрин Р. С.[1,2], Костюк М. Д.[1], Капкин И. Д.[1]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
rshokhrin@niime.ru, mkostyuk@niime.ru, ikapkin@niime.ru

В рамках данной работы была поставлена задача модернизации процесса подготовки и верификации управляющей информации для производства фотошаблонов. На основании рассмотренного маршрута был спроектирован модуль веб-приложения, позволяющий автоматизировать маршруты подготовки управляющей информации.
Ключевые слова: проектирование фотошаблонов; автоматизация; управляющая информация; разработка веб-приложений.

Введение

Ввиду различий в технологиях и технических спецификациях маршруты и отдельные шаги в подготовке управляющей информации могут варьироваться в зависимости от требований заказчика и технологических норм. Для ускорения обработки и внедрения таких маршрутов была поставлена задача по разработке спецификации описания маршрутов подготовки управляющей информации (УИ).

Модернизация описания маршрута подготовки УИ

Для решения задачи модернизации описания маршрута было решено разбить полное описание маршрута на две составляющие части: описание хода и порядка выполнения всех операций маршрута и описание каждой отдельной операции. Такой подход поможет внедрять новые маршруты и отдельные этапы значительно быстрее.

В качестве основы для спецификаций был выбран язык описания YAML (Yet Another Markup Language). Он удобен для заполнения человеком и программного чтения.

Для описания отдельных операций была разработана спецификация, обеспечивающая гибкость в описании правил получения данных для выполнения отдельного программного сценария из составленного пользователем файла-задания и полученных настроек конкретной исполняемой операции. Файл-описание операции должен содержать правила по получению и структуризации данных для последующего выполнения.

Разработка программного веб-приложения

Программный веб-модуль состоит из четырех независимых сервисов: сервиса интерфейса, сервиса организации маршрута, базы данных, сервиса запуска процедур.

В рамках программного комплекса база данных хранит:

- данные о местоположении конфигурационных файлов маршрута;
- информацию, связанную с состоянием выполнения программных сценариев маршрутов;

- ход выполнения отдельных процедур (лог).

В качестве инструмента запуска и контроля выполнения программных сценариев используется сервис на основе программ-демонов. Демон (daemon) — это программа, которая запускается в фоновом режиме (без терминала или пользовательского интерфейса), ожидая событий и предлагая службы для их выполнения.

Сервис интерфейса предоставляет возможности по конфигурации всего маршрута подготовки УИ и его отдельных операций. Основной задачей сервиса является отображение информации, связанной с маршрутом и ходом его выполнения в режиме реального времени. Сервис организации маршрута является связующим звеном между сервисом пользовательского интерфейса и сервисом выполнения процедур маршрута подготовки УИ. Основные задачи модуля — обработка пользовательских данных маршрута подготовки УИ (файла-задания), формирование и структуризация данных маршрута подготовки УИ и его отдельных этапов, генерация сигналов и конфигурационных файлов для запуска выполнения подготовки УИ.

Заключение

Спроектированная архитектура программного комплекса имеет ряд преимуществ в масштабируемости и надежности. В программный комплекс легко внедрять новый функционал, а сама система отказоустойчива. Также программный комплекс обеспечивает быстрое внедрение или изменение маршрутов подготовки управляющей информации благодаря использованию файлов — описаний маршрутов.

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. Беспалов В. А. и др. Введение в дизайн фотошаблонов для изготовления микро- и наносистем / Под ред. В. А. Беспалова. — Mentor Graphics. БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. — 207 с.
3. Беспалов В. А. и др. Введение в дизайн фотошаблонов для изготовления микро- и наносистем / Под ред. В. А. Беспалова. — Cadence MaskCompose. БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 199 с.
4. Иванов В. В., Тельминов О. А. Подготовка управляющей информации для изготовления фотошаблонов. Перспективные методы и автоматизация // Сайт АО «НИИМЭ», 2019. — URL: https://www.niime.ru/upload/pres/70219/03.pdf (дата обращения: 20.04.2024).

УДК 51-74

Коррекция элементов фотонных ИС в целях учета ограничений фотолитографии

Степанова М. Г.[1,2], Харченко Е. Л.[1]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
masterpanova@niime.ru, ekharchenko@niime.ru

В работе исследована зависимость точности переноса рисунка в фоторезистивную маску от способа коррекции элементов на фотошаблоне. Реализован рецепт коррекции топологического рисунка, адаптированный для обработки фотонных интегральных схем, содержащих изогнутые элементы.
Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; фотолитография; фотошаблон; коррекция эффектов оптической близости.

Введение

Фотолитография играет важнейшую роль в производстве интегральных схем (ИС). При уменьшении проектных норм возникают трудности, связанные с переносом геометрии топологического рисунка на кремний [1]. С одной стороны, когда критические размеры топологических элементов достигают величин, сопоставимых с длиной волны экспонирующего излучения, возникают эффекты оптической близости, которые искажают переносимое изображение. Для минимизации влияния этих эффектов необходимо проводить соответствующую коррекцию рисунка (OPC — optical proximity correction). С другой стороны, при проектировании фотошаблона необходимо выдерживать сетку, минимальные размеры и расстояния между элементами согласно его группе качества. Для учета этих особенностей топологический рисунок подвергается изменению различными алгоритмами [2, 3].

Коррекция топологии интегральной схемы

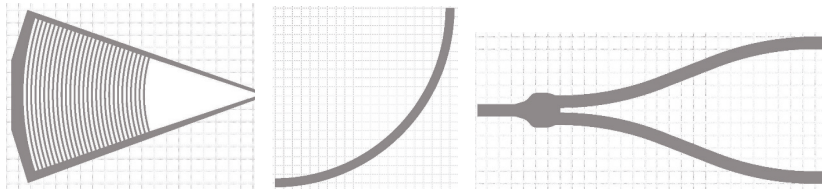
По сравнению с электронными ИС фотонные интегральные схемы (ФИС) имеют ряд отличительных черт. С точки зрения фотолитографии основная особенность ФИС заключается в том, что они содержат топологические элементы изогнутой формы. Алгоритмы коррекции топологических слоев не всегда адаптированы к таким фрагментам [4].

В работе были исследованы фрагменты ФИС, рассчитанной на технологию 180 нм. Рассмотренные изогнутые элементы изображены на рис. 1.

Произведена доработка OPC-рецепта для корректной обработки неортогональных граней. Коррекция проводится следующим образом:

1) в топологии используются только вертикальные или горизонтальные линии;
2) контуры изогнутых элементов приближаются набором ломаных, отрезки которых не противоречат минимальному размеру сетки для фотошаблона данной группы качества;

3) при необходимости производится коррекция эффектов оптической близости во избежание слияний соседних элементов.



а *б* *в*

Рис. 1. Фрагменты топологии ФИС: *а*) решетка ввода/вывода; *б*) волноводный поворот на 90°; *в*) 1×2-делитель на основе многомодового интерферометра

Таким образом, полученный алгоритм включает в себя ортогонализацию изогнутых граней и их коррекцию на основании литографической модели. Верификация алгоритма производится на основании сравнения исходного рисунка и смоделированного в резисте после коррекции. Моделирование рисунка в фоторезисте проводится при различных условиях процесса для отслеживания стабильности проработки.

Влияние способа разбиения на точность полученного изображения

Разработанный рецепт позволяет корректировать топологию в зависимости от требований, накладываемых фотошаблоном, и от входных литографических моделей. Было проведено исследование отклонения полученного в резисте рисунка от исходного в зависимости от заданного шага разбиения при приближении кривых ломаными. На основании полученных данных можно сделать вывод об оптимальном способе ортогонализации изогнутых контуров ФИС.

Заключение

Реализованный в данной работе рецепт может быть использован для подготовки топологий ФИС к печати. В рамках дальнейшей работы необходимо провести исследование других способов ортогонализации линий с изгибами. Кроме того, полученный рецепт коррекции следует проверить на большем количестве типичных для фотонных интегральных схем элементов.

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. Orlando B. et al. OPC for curved designs in application to photonics on silicon // Optical Microlithography XXIX. SPIE, 2016. Vol. 9780. P. 260–265.
3. Huang Z. et al. Preliminary round of OPC development in 180 nm node silicon photonics MPW platform // 2020 International Workshop on Advanced Patterning Solutions (IWAPS). IEEE, 2020. P. 1–3.
4. Giewont K. et al. 300-mm monolithic silicon photonics foundry technology // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019. Vol. 25. № 5. P. 1–11.

УДК 621.3.049

Перспективы развития производства фотошаблонов для технологий уровня до 65 нм в России

Свистунова В. В., Шарипов Р. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе произведен анализ производства фотошаблонов в России. Показаны особенности изготовления фотошаблонов для норм 180 нм и ниже с точки зрения технологии и тенденции развития смежных областей для организации полного цикла изготовления фотошаблонов с минимальным привлечением материалов иностранного производства.
Ключевые слова: фотошаблон; производство фотошаблонов.

Фотошаблон (ФШ) является одним из ключевых инструментов, используемых для формирования изображения ИС на полупроводниковых пластинах. Научно-технологическое развитие российской электронной промышленности обуславливает растущий спрос на комплекты ФШ, состоящие из ФШ различной степени сложности. Изготовление ИС с проектными нормами 180 нм уже требует использования сложных бинарных ФШ с элементами ОРС, а изготовление ИС с проектными нормами 130 нм и ниже невозможно без использования полутоновых фазосдвигающих ФШ.

В настоящее время в Российской Федерации предприятия, освоившие технологический процесс изготовления фотошаблонов для производства ИС с проектными нормами 90–65 нм, включая полутоновые фазосдвигающие ФШ, отсутствуют, поэтому российские производители электронной продукции вынуждены заказывать дорогостоящие фотошаблоны такого уровня сложности за рубежом.

На сегодняшний день в России передовыми технологиями изготовления ФШ владеет АО «ЗИТЦ», разработавшее технологический процесс изготовления сложных бинарных фотошаблонов, включая проектирование дизайна, с элементами компенсации оптической близости OPC (Optical Proximity Correction) для производства ИС с проектными нормами 130 нм с применением техники повышения разрешения RET (Reticle Enhancement Technique).

Изготовление полутоновых фазосдвигающих ФШ связано с необходимостью обработки дополнительного технологического слоя MoSi (силицида молибдена) и с жестким контролем его оптических свойств, что, в свою очередь, требует использования новых технологических и контрольно-измерительных процессов, таких как:

- плазмохимическое травление полутоновых маскирующих слоев на основе MoSi (силицида молибдена);
- поиск и устранение прозрачных и непрозрачных дефектов в слое MoSi (силицида молибдена);
- контроль сдвига фаз.

Для обеспечения технологической независимости Российской Федерации в части обеспечения предприятий российской электронной промышленности необходимой номенклатурой и объемом ФШ требуемого уровня требуется не только

разработка технологических процессов изготовления ФШ для производства ИС с проектными нормами до 65 нм (с учетом тенденций развития предприятий — изготовителей ИС), но и локализация производства фотошаблонных заготовок (ФШЗ) для бинарных и полутоновых фазосдвигающих ФШ разных технологических уровней, производства кварца необходимого качества для изготовления на них ФШЗ, производства пелликлов и рамок для их монтажа на поверхность ФШ для различных длин волн (193, 248 нм и расширенного диапазона пропускания 360–440 нм).

УДК 621.793.182

Сравнение оптических свойств слоев силицида молибдена и силицида тантала, применяемых для формирования фазосдвигающих покрытий фотошаблонов

Шарипов Р.А.[1], Лебедев Е.А. [1], к.т.н., Громов Д.Г.[1], д.т.н., Громов В.Д.[1], Рязанов Р.М.[2]

[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
Sharipov769@mail.ru
[2] НПК «Технологический центр»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

Экспериментально исследованы особенности реактивного магнетронного осаждения фазосдвигающих слоев на основе силицидов молибдена и тантала для фотошаблонных заготовок. Определено влияние парциального давления азота на скорость осаждения, состав и оптические свойства формируемых покрытий.

Ключевые слова: магнетронное распыление; фазосдвигающие слои; силицид молибдена; силицид тантала.

При уменьшении топологических размеров элементов использование бинарных масок становится затруднительным из-за дифракционных явлений. Более того, при снижении норм топологических размеров элементов менее 130 нм использование бинарных масок становится невозможным, так как дифракционные эффекты ухудшают контрастность получаемого рисунка. Одним из решений данной проблемы является использование фазосдвигающих слоев, которые могут быть сформированы методом магнетронного распыления мишеней в среде химически активного газа. В настоящей работе рассмотрены особенности формирования и исследованы свойства фазосдвигающих слоев на основе силицидов молибдена и тантала.

В рамках данной работы фазосдвигающие слои на основе силицидов молибдена и тантала формировались с помощью реактивного магнетронного распыления. В качестве подложек использовались кварцевые стекла, которые устанавливались на карусели с планетарным вращением. Распыление мишеней кремния и молибдена, а также кремния и тантала производилось одновременно в среде азота и аргона. Управление составом формируемых слоев осуществлялось в результате изменения парциального давления азота и мощности распыления мишеней. Толщина и состав слоев контролировались с помощью атомно-силовой микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Исследование оптических свойств производилось с помощью эллипсометрии.

В результате проведенной экспериментальной работы было определено влияние парциального давления азота на скорость реактивного магнетронного осаждения, состав и оптические свойства фазосдвигающих слоев на основе силицидов молибдена и тантала. Было обнаружено, что при реактивном магнетронном распылении в среде химически активного газа образование химического соединения на поверхности мишени изменяет скорость ее распыления. В результате происходит существенное изменение состава формируемой пленки в узком диапазоне

парциальных давлений азота. Произведена оптимизация режимов осаждения слоев на основе силицидов молибдена и тантала для получения фазового сдвига 180°.

Работа выполнена в рамках НИР «Исследование технологии создания фотошаблонных заготовок и фотошаблонов, поиск технологических решений и создание на их основе макета фотошаблонной заготовки».

УДК 621.382.2/.3:681.518.5

Разработка системы оптической инспекции фотолитографического процесса

Паршин С. Н., Золкин Г. П., Васильченко Д. В., д. т. н. Ромащенко М. А.
Воронежский государственный технический университет
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
kipr@vorstu.com

Цель программного обеспечения — повысить эффективность фотолитографических процессов при производстве микроэлектронных устройств. Это достигается снижением брака благодаря алгоритмам машинного зрения, что улучшает качество продукции и повышает производительность.
Ключевые слова: фотолитография; микроэлектроника; машинное зрение; машинное обучение; OpenCV; контроль качества.

Точность и разрешающая способность фотолитографического процесса являются ключевыми факторами, определяющими качество выпускаемых микроэлектронных изделий. Данный процесс отвечает за создание требуемых топологий на поверхности материалов, которые формируют структуры микроэлектронных компонентов. Любое отклонение основных параметров может привести к дефектам, поэтому требуется постоянный контроль производственного процесса.

При производстве микроэлектронных изделий возникают ошибки, связанные с формированием структуры, которые обусловлены как человеческим фактором, так и техническими ограничениями. Данные ошибки возникают вследствие несвоевременной реакции или недостаточной квалификации персонала. Кроме того, оборудование контроля качества не всегда может гарантировать необходимую точность и оперативность выявления отклонений технологических параметров. Недостаточный уровень автоматизации оборудования ведет к увеличению доли человеческого вмешательства, что негативно влияет на качество изделий и снижает производительность [1].

Одним из способов решения данной проблемы является применение автоматизированных систем контроля и управления, базирующихся на алгоритмах машинного зрения и машинного обучения. Основой разрабатываемой системы является алгоритм машинного зрения на базе библиотеки OpenCV, TensorFlow/Keras. Этот алгоритм позволяет анализировать изображения с высокой точностью, выявляя дефекты, которые трудно обнаружить при визуальном осмотре. OpenCV предоставляет широкий набор инструментов для обработки изображений, включая фильтрацию, сегментацию и распознавание объектов, что делает его идеальным выбором для задач контроля качества в фотолитографии [2]. Также в разрабатываемой системе используются вспомогательные библиотеки, такие как PyQt для работы с интерфейсом, Matplotlib для математических расчетов и визуализации, SQLite и PostgreSQL для работы с базами данных. Используемые в проекте алгоритмы машинного обучения проходят обучение на больших объемах данных, включающих как эталонные, так и дефектные образцы. Это позволяет системе эффективно различать корректные и некорректные топологические структуры, минимизируя вероятность ложных срабатываний.

Пользовательский интерфейс виртуального помощника позволяет обеспечить доступ к основным данным технологических процессов, включая текущие параметры, состояние оборудования, историю изменений, графики и аналитические изображения (рис. 1). Если обнаруживается дефект, система может автоматически корректировать параметры процесса в реальном времени для устранения ошибок или отправлять уведомление оператору для ручного вмешательства. Это позволяет предотвратить дальнейшее распространение брака и повысить общую эффективность производства.

Система включает базы данных для хранения шаблонов, эталонных, дефектных и отсканированных данных, а также результатов отчетов. Шаблоны содержат эталонные и дефектные изображения для калибровки и обучения. Эталонные данные помогают выявлять отклонения. Дефектные данные включают изображения с дефектами для анализа. Отсканированные данные содержат изображения и параметры процесса в реальном времени для контроля. Отчеты включают информацию о выявленных дефектах и принятых мерах, что улучшает производственные процессы.

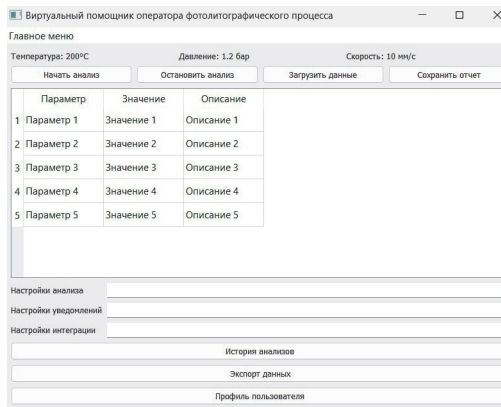


Рис. 1. Виртуальный помощник оператора фотолитографического процесса

Авторы считают, что в данной работе новым является алгоритм, использующий сформированные с помощью технологического оборудования изображения полупроводниковых пластин и нейронные сети для их анализа. Введение подобных инноваций в производственные процессы способствует снижению уровня брака и повышению производственной эффективности, обеспечивая высокое качество конечной продукции в микроэлектронной промышленности.

Литература

1. Ромащенко М. А., Васильченко Д. В., Пухов Д. А., Белецкая С. Ю. Проведение дефектовки печатных модулей с использованием нейронных сетей // Радиотехника, 2022. — Т. 86. — № 7. — С. 44–49. DOI: 10.18127/j00338486-202207-08. EDN QFGRGL.
2. Официальный сайт библиотеки машинного зрения OpenCV. — URL: https://opencv.org (дата обращения: 08.07.2024).

УДК 51-74

Алгоритм подбора оптимального литографического стека в целях минимизации эффекта стоячих волн

Уткина А. А., Харченко Е. Л.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
autkina@niime.ru, ekharchenko@niime.ru

В работе рассматривается проблема эффекта стоячих волн, возникающая в процессе экспонирования фоторезиста. Для предотвращения этого эффекта проведена серия виртуальных экспериментов с использованием набора фоторезистов и антиотражающих покрытий, рассчитанных на длину волны излучения 365, 248 и 193 нм.

Ключевые слова: вычислительная фотолитография; литографический стек; эффект стоячих волн; фоторезист; BARC; экспонирующее излучение; интерференция.

При разработке технологий, маршрутов и внедрении новых материалов возникает необходимость в настройке параметров технологического процесса [1]. Один из параметров, который требует настройки, — литографический стек. Он представляет собой набор слоев на подложке, который содержит фоторезист, антиотражающие покрытия и слои, выполняющие функцию жестких масок [2].

Интерференционные эффекты вносят существенный вклад в итоговое распространение интенсивности внутри литографического стека. Для формирования скрытого изображения в проэкспонированном фоторезисте важно учитывать не только падающий свет, но и отраженный от поверхности фоторезиста и подложки. Интерференция отраженных лучей приводит к эффекту стоячих волн, который носит деструктивный характер при формировании рельефа фоторезистивной маски (ФРМ) [3]. Эффект заключается в появлении чередующихся минимумов и максимумов интенсивности света в глубине фоторезиста. Области, соответствующие максимумам интенсивности, проявляются существенно быстрее, чем области, соответствующие минимумам интенсивности, что приводит к волнообразным краям элементов ФРМ. Добавление нижнего антиотражающего покрытия (Bottom Antireflection Coatings — BARC) помогает сгладить края ФРМ. Однако наличие нового слоя или изменение материала может изменить скрытое изображение в фоторезисте, поэтому важно подобрать толщины рассматриваемых материалов так, чтобы минимизировать эффект стоячих волн и обеспечить формирование элемента ФРМ требуемого размера.

В работе проводится исследование особенностей формирования распределения интенсивности экспонирующего излучения в ФРМ. Рассматривается влияние состава литографического стека на формирование эффекта стоячих волн с использованием экспонирующего изучения 365, 248 и 193 нм, рассматривается учет влияния пленки оксида кремния на подложке [4, 5]. С помощью компактного моделирования рассчитывается скрытое изображение в фоторезисте. Полученное распределение анализируется авторским алгоритмом, который проводит преобразование полученных данных, отсеивает неподходящие варианты и выбирает

наилучший среди рассматриваемых параметров. В результате определяется состав литографического стека, сводящий к минимуму эффект стоячих волн.

На основе полученных результатов разработан алгоритм подбора фоторезиста и BARC, который определяет оптимальный литографический стек. Разработан инструмент, который осуществляет подбор параметров в автоматизированном режиме, что ускоряет процесс замены материалов для процесса фотолитографии. В рамках дальнейшей работы планируется рассмотрение комбинаций нескольких BARC в литографическом стеке.

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. Su X. et al. Thickness optimization for lithography process on silicon substrate // Advances in Patterning Materials and Processes XXXII. SPIE, 2015. Vol. 9425. P. 503–516.
3. Uzodinma Okoroanyanwu. Chemistry and lithography / Uzodinma Okoroanyanwu. John Wiley & Sons, 2010.
4. Padmanaban M. et al. Bottom antireflective coatings for ArF, Kr. and i-line applications: a comparison of theory, desig. and lithographic aspects // Advances in Resist Technology and Processing XVI. SPIE, 1999. Vol. 3678. P. 550–561.
5. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Матюшкин И. В. Математическое моделирование кинетики высокотемпературного окисления кремния и структуры пограничного слоя в системе Si-SiO_2 // Физика и техника полупроводников, 2003. — Т. 37. — № 1. — С. 44–49.

УДК 531.7.08

Анализ и сравнение оптимизационных алгоритмов для задачи определения правил расстановки непечатаемых вспомогательных структур с учетом их влияния на шероховатость

Шамин Е. С.[1,2], Шарапов А. А.[1,2], Скуратов И. Д.[1,2], Горнев Е. С.[1,2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Описаны особенности формирования шероховатости боковых стенок структур, сформированных на базе фотолитографии. Показано, что непечатаемые вспомогательные структуры влияют на шероховатость. Для задачи определения правил их расстановки с учетом шероховатости проведено сравнение оптимизационных алгоритмов.

Ключевые слова: шероховатость; оптимизация; SRAF.

С развитием технологий производства интегральных микросхем характерные критические размеры топологических элементов значительно уменьшаются [1]. Наряду с этим типичные отклонения в их размерах, вызванные эффектом шероховатости боковых стенок, остаются практически неизменными, что приводит к деградации характеристик приборов для малых проектных норм [2, 3]. С учетом такой области исследований, как интегральная фотоника, для которой проблема шероховатости боковых стенок также имеет особую важность [4], можно с уверенностью сказать, что проблема шероховатости боковых стенок актуальна для любых топологических норм.

На формирование шероховатости боковых стенок для топологических структур, сформированных посредством фотолитографии, влияет множество факторов, таких как эффекты дефокусировки, параметры используемого фоторезиста, эффекты фотонного шума и т.д. В центре внимания данной работы лежит экспериментально подтвержденная связь [5] между шероховатостью и эффектом оптической близости. Как известно, одной из методик постобработки топологической информации для фотолитографии, находящейся в тесной связи с эффектом оптической близости, является расстановка по топологии непечатаемых вспомогательных структур (SRAF).

Как показано в работе, неправильная расстановка SRAF по топологии может не только привести к ухудшению процессного окна фотолитографии [6] и значительному понижению выхода годных [7], но и значительно увеличить амплитуду шероховатости боковых стенок. Вопрос определения правил расстановки SRAF обычно решается с применением оптимизационных алгоритмов с целевыми функциями на основе моделирования, отображающими качество проведения процесса фотолитографии. В работе проводится сравнительный анализ (бенчмаркинг) различных комбинаций алгоритмов оптимизации и целевых функций для этой задачи с учетом влияния SRAF на шероховатость боковых стенок. На основе этого анализа

проводится выбор наилучшей комбинации алгоритма и целевой функции для задачи определения правил расстановки SRAF.

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. Lee J. Y. et al. Effect of line-edge roughness (LER) and line-width roughness (LWR) on sub–100 nm device performance // Advances in Resist Technology and Processing XXI. SPIE, 2004. Vol. 5376. P. 426–433.
3. Шарапов А. А., Баранов Г. В. Анализ факторов воздействия на шероховатость топологических структур Si микроэлектроники // Наноиндустрия. — 2019. — № 89. — С. 232.
4. Shang H. et al. Investigation for sidewall roughness caused optical scattering loss of silicon-on-insulator waveguides with confocal laser scanning microscopy // Coatings, 2020. Vol. 10. № 3. P. 236.
5. Ban Y., Yang J. S. Layout aware line-edge roughness modeling and poly optimization for leakage minimization // Proceedings of the 48th Design Automation Conference, 2011. P. 447–452.
6. Mack C. Fundamental principles of optical lithography: the science of microfabrication. John Wiley & Sons, 2008.
7. Liebmann L. W. et al. Optimizing style options for subresolution assist features // Optical Microlithography XIV. SPIE, 2001. Vol. 4346. P. 141–152.

УДК 621.3.049.779

Разработка технологического процесса электронно-лучевой литографии для изготовления реакционных ячеек оптического одномолекулярного секвенатора ДНК

Барбашева А. А.[1], Соловьева А. А.[1,2], Кугук А. К.[1], Коршаков Н. Д.[1,2], Муравьева Л. Н.[1], Алибеков Р. Ш.[1], Шувалова А.С.[1], Рыжков В. В.[1], Родионов И. А.[1,2]

[1] НОЦ ФМН, МГТУ им. Н. Э. Баумана
105082, г. Москва, Рубцовская наб., 2/18
[2] ВНИИА им. Н. Л. Духова
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22

Разработан технологический процесс формирования органической маски электронного резиста на основе ПММА для последующего реактивного ионного травления алюминия. Маска позволяет получить массивы структур с характерным диаметром ~100 нм и стандартным отклонением <1%. Приведены характеристики разработанного технологического процесса.

Ключевые слова: электронно-лучевая литография (ЭЛЛ); электронный резист (ЭР); нанесение ЭР; экспонирование ЭР; проявление ЭР; полиметилметакрилат (ПММА); органическая маска для реактивного ионного травления (РИТ); волновод нулевой моды (ВНМ); реакционная ячейка; оптическое одномолекулярное секвенирование.

Оптическое одномолекулярное секвенирование (ООС) является методом секвенирования нуклеиновых кислот (НК) третьего поколения, позволяющим решать задачи высокопроизводительного секвенирования длинных фрагментов НК, в том числе полногеномного секвенирования. Решение подобных задач играет определяющую роль в выявлении и изучении заболеваний различной этиологии. Основным структурно-функциональным элементом реакционной ячейки для ООС является ВНМ. Изготовление данного элемента включает в себя технологический процесс ЭЛЛ, что обусловливает актуальность разработки данного процесса.

В рамках разработки технологического процесса ЭЛЛ были проведены теоретический анализ, моделирование и оптимизация параметров технологических операций нанесения, термообработки, экспонирования и проявления ЭР на основе ПММА. Серия экспериментальных исследований включала в себя:

1) определение скорости вращения подложки на центрифуге в режиме утонения для получения необходимой толщины пленки ЭР;

2) определение дозы экспонирования и времени проявления ЭР для получения требуемого диаметра и профиля структур;

3) определение рабочего поля установки ЭЛЛ, обеспечивающего минимальный разброс размеров структур.

В результате проведенных исследований разработан процесс формирования органической маски, позволяющей методом РИТ получить массивы структур с характерным диаметром ~100 нм и стандартным отклонением <1%.

Исследование проводилось в нанотехнологическом центре МГТУ им. Баумана (НОЦ Функциональные Микро/Наносистемы, ID 74300).

Литература

1. Olzierski A., Raptis I. Development and molecular-weight issues on the lithographic performance of poly (methyl methacrylate) // Microelectronic engineering, 2004. Vol. 73. P. 244–251.
2. Mohammad M. A. et al. Interdependence of optimum exposure dose regimes and the kinetics of resist dissolution for electron beam nanolithography of polymethylmethacrylate // Journal of Vacuum Science & Technology B, 2010. Vol. 28. № 1. P. L1–L4.
3. Tiwari P. et al. Structural modification of poly (methyl methacrylate) due to electron irradiation // Measurement, 2014. Vol. 51. P. 1–8.

УДК 776.19

Моделирование неровности края линии в резисте с помощью модели со смешанными параметрами

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

В рамках импортозамещения в сфере литографических материалов возрастает актуальность моделирования процесса литографии. В данной работе представлено дополнение модели LPM (Lumped Parameter Model) стохастическим модулем для оценки неровности края линии в резисте с помощью моделирования.

Ключевые слова: моделирование фотолитографии; химически усиленные резисты; неровность края линии.

Продолжающиеся работы в сфере импортозамещения литографических материалов для технологических норм 180–90 нм требуют все более глубокого понимания физико-химических процессов, проходящих в пленке фоторезиста в процессе фотолитографии. Понимание взаимосвязи отдельных параметров резиста можно получить с помощью проведения моделирования всего процесса фотолитографии.

В прошлой работе авторов [1] для этой цели применялась модель со смешанными параметрами (Lumped Parameter Model, LPM) [2, 3]. Данная модель позволяет довольно точно предсказать профиль резиста при относительно небольшом количестве требуемых входных параметров. И в отличие от компактных моделей [4, 5] в этой модели сохраняется физический смысл параметров фоторезиста.

В данной работе в эту модель вводится дополнительный стохастический модуль для расчета неровности края линии в резисте. Это реализуется через добавление случайных вариаций в выбранный входной параметр модели. На основании анализа экспериментальных данных для моделируемого резиста в качестве такого параметра был выбран контраст проявления. Таким образом, в используемую модель [1, 2] вводится дополнение:

$$R(x) = R_0\left(\frac{E}{E_0}\right)^{\gamma+\Delta\gamma} \cdot S(x)^{\gamma+\Delta\gamma} + R_{\min},$$

где $R(x)$ — скорость проявления фоторезиста, $R_0(x)$ — эмпирическая константа проявления, $R_{\min}$ — скорость проявления неэкспонированного резиста, E — доза экспонирования, E_0 — доза полного проявления, $S(x)$ — параметр, характеризующий степень деблокирования фоторезиста, γ — контраст фоторезиста, $\Delta\gamma$ — вариация контраста.

Сравнение с экспериментом проводилось для KrF-резиста с химическим усилением. Использовалась топология плотных линий с шагом структуры ~600 нм.

Работа выполнена в рамках гранта № 24-91-18002 Российского научного фонда.

Литература

1. Sharapov A. A. et al. Hybrid model of photolithography physicochemical processes for estimation of optical losses in waveguides // 11th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures; Book of Abstracts; May 2024.
2. Byers J., Smith M., Mack C. Lumped Parameter Model for Chemically Amplified Resists // Proc. SPIE, 5377, Optical Microlithography XVII, 2004.
3. Byers J., Smith M., Mack C. A. 3D Lumped Parameter Model for Lithographic Simulations // Optical Microlithography XV, Proc. SPIE, 2002. Vol. 4691. P. 125–137.
4. Харченко Е. Л., Соколова Е. В., Горнев Е. С. Развитие и применение компактных моделей фоторезистивной маски // Российский форум «Микроэлектроника-2022». — 2022. — С. 634–635. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53742363.
5. Балан Н. Н. и др. Использование нейросетевых алгоритмов в задачах вычислительной литографии // Наноиндустрия, 2020. — № 96-2. — С. 543–548. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.543.548. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43004616.

УДК 621.3.049

Определение коэффициента диффузии фотокислоты в химически усиленных фоторезистах

Конушкин И. А., Аккуратов А. В., Гапанович М. В.
ФИЦ ПХФ и МХ РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1
konushkinivan71@gmail.com

Создание высококачественных фоторезистов требует тщательного исследования кинетических параметров фотолитографического процесса. В данной работе определена константа диффузии фотокислоты в пленках коммерческого фоторезиста по данным ионной проводимости образцов, измеренной в зависимости от дозы лазерного облучения (248 нм).
Ключевые слова: коэффициент диффузии; пленка фоторезиста; фотогенератор кислоты; метод ионной проводимости; эксимерный лазер.

Развитие полупроводниковой индустрии связано со стремлением повысить скорость выполняемых операций и увеличить их количество, что сопряжено с миниатюризацией электронных устройств. Это стало возможным благодаря прогрессу в фотолитографии. Для повышения разрешающей способности данного процесса необходимо разрабатывать качественные фоторезисты с химическим усилением. Для этого необходимы данные о количественных характеристиках реакций, протекающих в фоторезистах в ходе рабочего процесса. Одним из таких параметров является коэффициент диффузии фотокислоты [1].

Для измерения диффузии кислоты в позитивных фоторезистах с химическим усилием подходит метод ионной проводимости. В его основе лежит определение концентрации кислоты с последующим измерением ионной проводимости пленки резиста. Коэффициент диффузии можно рассчитать по формуле

$$D = \frac{\sigma \cdot k_{\text{Б}} \cdot T}{C_{\text{кисл}} \cdot q^2}. \quad (1)$$

В качестве подложек для образцов использовались кремниевые пластины, покрытые нитридом титана. Для формирования тонких пленок толщиной от 0,5 до 10 мкм достаточно просушить фоторезист в течение полутора минут при 110 °C. Однако для толстых пленок такие условия не подходят даже при длительном времени сушки. Опытным путем было установлено, что пленки толщиной до 100 мкм удачно формируются в условиях вакуумной сушки при температуре 50 °C. Полученные пленки образуются без дефектов.

Для обеспечения необходимой интенсивности света и однородности лазерного пучка был подобран оптимальный состав газовой смеси: фтор — 0,24 % по объему, криптон — 1,2 % и гелий — 98,56 % [2, 3]. Рабочее напряжение составило 25 кВ. При частоте генерации импульса в 10 Гц образцы засвечивались однородно. Максимальная энергия одного импульса составила 1 мДж. Предполагаемая доза облучения, необходимая для нейтрализации примесей, контролирующих диффузию фотокислоты, должна быть более 9,5 мДж/см^2. Таким образом, для этого необходимо всего восемь импульсов.

Концентрацию образующейся кислоты в пленке фоторезиста определяли фотометрически с использованием красителя тетрабромфенолового синего [4] и п-толуолсульфокислоты как стандарта (рис. 1). Пересчет на концентрацию кислоты в пленке фоторезиста проводился по формуле

$$C_{\text{в пленке}} = C_{\text{в кювете}} \cdot V_{\text{р-ра}} \cdot k_{\text{пересчета}} \cdot \frac{N_A}{V_{\text{пленки}}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{р-ра}}$ — объем раствора в кювете, л; $k_{\text{пересчета}}$ — коэффициент пересчета, определенный как отношение объема раствора фотокислоты к объему аликвоты и равный 10, 13,33 или 16,67; $V_{\text{пленки}}$ — объем пленки фоторезиста, $м^3$.

Электропроводность пленок измерялась на широкополосном диэлектрическом спектрометре Novocontrol в диапазоне частот от 10^5 до 10^{-2} Гц. На низких частотах (0,3 Гц) ионная проводимость становится более заметной, поскольку ионы имеют достаточно времени для перемещения в приложенном электрическом поле [5]. По полученным данным рассчитывался коэффициент диффузии.

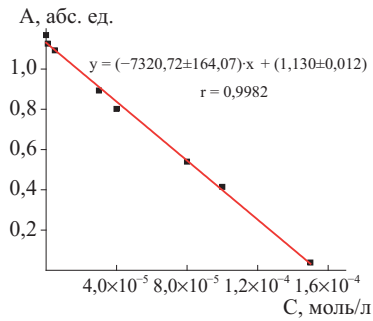


Рис. 1. Градуировочный график зависимости оптической плотности растворов от концентрации титранта

Для результатов серии 1 наблюдался существенный разброс данных, что связано со сложностью в точном определении толщины таких пленок и с недостаточной воспроизводимостью метода их формирования (рис. 2). Дополнительную погрешность при измерении ионной проводимости тонких пленок вносят электрические пробои. Результаты, значения которых отличались в несколько раз от среднего для серии 1, а также неэкспонированные образцы серии 2 выбраковывались.

Анализируя графики, можно заметить, что наиболее достоверные результаты получены для серии 2. Явной зависимости коэффициента диффузии от времени экспонирования не наблюдается. Средние значения коэффициента диффузии для первого метода — $D_{\text{дифф.}} = (6{,}17 \pm 10{,}27) \cdot 10^{-8}$ мкм^2/с ($S_r = 2{,}0$) и для второго метода — $D_{\text{дифф.}} = (4{,}2 \pm 0{,}6) \cdot 10^{-8}$ мкм^2/с ($S_r = 0{,}16$). Серии измерений не равноточные, наиболее достоверным является результат серии 2.

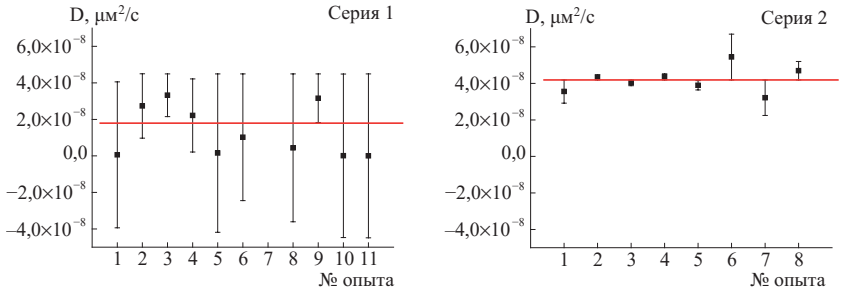


Рис. 2. Сравнение воспроизводимости результатов

Работа выполнялась в рамках тем. карты ФИЦ ПХФ И МХ РАН № 124020800013-7 «Научные основы разработки инновационных полимерных материалов для биомедицины и микроэлектроники».

Литература

1. Chris M. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, Ltd., 2007. P. 528. ISBN: 978-0-470-01893-4.
2. Patent № 5377217 United States, US0 8/042374, H01S 3/22. GAS MXTURES FOR EXCEMER LASERS: appl. 02.04.1993: publ. 27.12.1994 / Gabzdyl J. T.; applicant BOC Group Ltd. 5 p.
3. Patent № 102517540 China C23C 8/08 (2006.01). Method of passivation of a gas configuration excimer laser device: appl. 20.12.2011: publ. 20.11.2013/ Pin Ch., Kelian Zh., Zhihong Zh.; applicant GUANGDONG SOUTHCHINA SPECIAL GAS INSTITUTE Co Ltd. 6 p.
4. Cheng-Tsung Lee, Wang Y., Roberts J., Henderson C. L. Cheng-Tsung Lee A Simple Method for Measurement of Photoacid Generator Photoreaction Kinetics in Formulated, Chemically Amplified Photoresist Films // Electrochemical and Solid-State Letters, 2007. Vol. 10. № 9. P. 273–277.
5. Новиков Г. Ф. Явления переноса, электропроводность в диэлектриках: Учеб. пособие к курсу лекций. — Воронеж-Черноголовка: изд-во ВГУ, 2000. — 203 с.

УДК 547.279.2

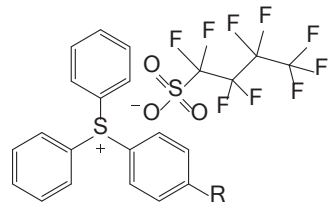
Разработка фотогенераторов кислоты на основе триарилсульфониевых солей и исследование их свойств

Сидельцев М. Е., Лолаева А. В., Кузнецов И. Е., Аккуратов А. В.
ФИЦ ПХФ и МХ РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1
Sideltsev.max@yandex.ru

Фотогенератор кислоты (ФГК) является одним из важнейших компонентов фоторезиста, определяющим эффективность процесса фотолитографии. Данная статья посвящена разработке трех фотогенераторов кислоты и изучению их физико-химических свойств (поглощение, квантовый выход).
Ключевые слова: фотогенератор кислоты; квантовый выход; коэффициент молярной экстинкции; фоторезист.

Развитие микроэлектронной промышленности напрямую связано с уменьшением геометрических размеров производимых устройств, которые, в свою очередь, определяются параметрами фотолитографического процесса [1]. Ключевую роль на этапе фотолитографии играет используемый фоторезист — светочувствительный материал, наносящийся на полупроводниковый материал в целях получения необходимого топологического рисунка для дальнейшего травления. Для создания качественного фоторезиста требуется разработка нескольких компонентов, наибольший интерес из которых представляет фотогенератор кислоты (ФГК).

Фотогенератор кислоты представляет собой органическую соль, которая при облучении светом заданной длины волны разрушается с образованием кислоты, что приводит к изменению природы полимерной матрицы фоторезиста, делая его чувствительным к различного рода проявителям [2]. К ФГК предъявляется ряд требований по физико-химическим характеристикам, определяющим рабочую длину волны фоторезиста, необходимое время облучения, а также качество полученных изображений. С помощью химического дизайна можно управлять различными характеристиками ФГК. В данной работе рассмотрены три триарилсульфониевые соли перфторбутаносульфоновой кислоты, каждая из которых отличается боковым заместителем в фенильном кольце (рис. 1).



ТФ: R = H;
ТФ-Б: R = т-бутил;
ТФ-М: R = OCH_3;

Рис. 1. Структурная формула соединений ТФ, ТФ-Б, ТФ-М

Введение третбутильного заместителя или метокси-группы позволит увеличить растворимость и изменить степень поглощения ФГК, однако это может непредсказуемо повлиять на значение квантового выхода, определяющего эффективность

процесса фотолитографии. Таким образом, важной задачей в процессе разработки ФГК является не только синтез и молекулярный дизайн, но и исследование важных физических характеристик, таких как коэффициент молярной экстинкции и квантовый выход (табл. 1).

Таблица 1. Спектральные характеристики и квантовые выходы ФГК ТФ, ТФ-Б, ТФ-М

Соединение	$\lambda_{макс}$, нм	λ, нм		Ф, %
		248	максимум	
		ε, $см^{-1}$ $М^{-1}$		
ТФ	226	16300	21700	68,1
ТФ-Б	244	39000	41000	51,5
ТФ-М	258	17000	27000	32,1

В данном случае наибольший интерес представляют значения коэффициента молярной экстинкции на длине волны 248 нм, которая соответствует излучению эксимерного лазера KrF, используемого в фотолитографических процессах. Введение заместителя смещает максимум поглощения, приближая его к целевому значению. Однако при положительном влиянии на поглощение введение заместителей снижает квантовый выход, при этом небольшое снижение квантового выхода в случае соединения ТФ-Б компенсируется увеличением степени поглощения более чем в два раза.

Таким образом, соединение ТФ-Б является наиболее перспективным ФГК для технологий с длиной волны 248 нм, что также подчеркивает применимость подхода введения боковых заместителей в качестве инструмента для управления физическими характеристиками ФГК.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № 122111700041-8 (FFSG-2022-0004).

Литература

1. Okoroanyanwu U. Chemistry and lithography. SPIE, 2010.
2. Кузнецова Н. А., Малков Г. В., Грибов Б. Г. Фотохимические генераторы кислоты. Применение и современное состояние разработок // Успехи химии, 2020. — Т. 89. — № 2. — С. 173–190.

УДК 54.057

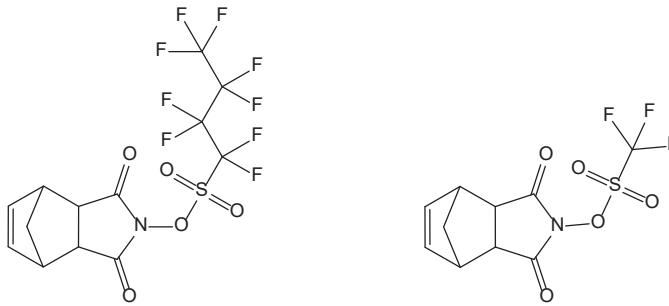
Синтез производного норборнендикарбоксимида — перспективного фотогенератора кислоты для химически усиленных фоторезистов

Заморецков Д. С., Аккуратов А. В.
ФИЦ ПХФ и МХ РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1

В работе представлена оптимизация синтеза производного норборнендикарбоксимида — перспективного фотогенератора кислоты (ФГК) для изготовления химически усиленных фоторезистов. Важным результатом работы стала новая усовершенствованная методика получения перфторалкансульфонатов норборнендикарбоксимида в виде термодинамически стабильных экзостереоизомеров. Предложенные методы позволяют существенно сократить затраты на получение ФГК, что должно способствовать быстрому появлению на рынке российских фоторезистов для фотолитографии на длине рабочего излучения 248 нм.

Ключевые слова: химически усиленный фоторезист; норборнендикарбоксимид; иммерсионная фотолитография.

В последние годы резко возрастает спрос на отечественные материалы, приборы и технологии для разработки микроэлектроники. На текущий момент важной задачей является получение отечественных фоторезистов, используемых в фотолитографии с длиной волны рабочего излучения 248 нм. Наиболее подходящим ФГК для создания химически усиленного резиста для этого процесса являются производные норборнена [1]. Повышенное внимание к данным материалам обусловлено строением норборнендикарбоксимида. С одной стороны, включение такого объемного блока способствует повышению точки кипения образующейся фотокислоты, в то время как жесткой каркас не позволяет молекуле разрушаться под воздействием сильного ультрафиолетового излучения, а наличие двух карбонильных групп обеспечивает растворимость в полярных растворителях, таких как 2-метоксипропилацетат [2]. Наряду с этим стоимость зарубежных соединений на основе норборнена остается чрезвычайно высокой.



а *б*

Рис. 1. Перфторбутан- (*а*) и трифторметансульфонатные (*б*) производные 5-норборнен-2,3-дикарбоксимида

В этой связи мы поставили задачу по воспроизведению, упрощению и масштабированию синтеза ФГК неионного типа — перфторбутан- и трифторметансульфоната 5-норборнен-2,3-дикарбоксимида (рис. 1).

Вышеупомянутые ФГК обычно получают из *N*-гидрокси-5-норборнен-2,3-дикарбоксимида и соответствующих ангидридов перфторбутан- или трифторметансульфоновой кислот. Дополнительные реагенты (основания и растворители) вносят также большой вклад в стоимость производства продукта, если речь идет о переходе от лабораторных синтезов к полупромышленным масштабам.

Мы предложили для синтеза ФГК применять перфторбутан- и трифторметансульфинилхлориды, которые существенно проще и удобнее в наработке. Более того, нам удалось провести финальную стадию сульфоацилирования с применением в качестве основания дешевого водного раствора поташа. В результате оптимизация большинства стадий синтеза позволила снизить стоимость норборнен-содержащих ФГК в 15 раз.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (122111700041-8).

Литература

1. Feke G. D., Grober R. D., Pohlers G., Moore K., Cameron J.F. 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 generato. and process for production of sulfonic acid salt: № US8889888B2: application 2009-07-06: publ. 2014-11-18 / Masashi Nagamori Masaki, Fujiwara Kazunori, Mori Satoru Narizuka. 36 p.

УДК 681.513, 621.382

Оценки дозовой ошибки литографической установки по наборам функций плотности распределения размера, получаемым при проходе по дозе

Балан Н. Н.[1,2], **Васин А. А.**[1,2]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[2] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1

Рассматривается метод оценки дозовой ошибки литографического оборудования, основанный на анализе сдвига и ширины функций плотности распределения размера при различных значениях дозы. В работе приведены результаты серии вычислительных экспериментов, показавшие возможность выделения дозовой ошибки оборудования рассмотренным методом.
Ключевые слова: дозовая ошибка литографического оборудования; фотошаблон; функция плотности распределения ошибки.

Внесение каких-либо модификаций в литографический процесс (например замена материалов или узлов установок экспонирования и обработки резиста), как правило, приводит к изменению значений составляющих дозовой ошибки, вносимой на той или иной стадии литографического процесса. Увеличение дозовой ошибки литографического оборудования EL_{tool} [1, 2] без изменения класса используемого фотошаблона негативно сказывается на качестве формируемой фоторезистивной маски (ФРМ), что делает актуальной задачу практического определения изменившегося значения EL_{tool}. В этом случае становится возможным оценить новые требования к рисунку на фотошаблоне, необходимые для сохранения удовлетворительного качества ФРМ [3].

В докладе предлагается метод оценки EL_{tool}, включающий в себя:

- разработку тестового фотошаблона, организованного по принципу Picked CD [4, 5];
- план практического эксперимента;
- методику анализа результатов пропечатки.

Для определения возможностей предлагаемого метода была проведена серия вычислительных экспериментов, моделирующих литографический перенос периодических тестовых структур с вариацией линейного размера. Для имитации ошибки размера, возникающей в ходе производства ФШ, на тестовые структуры были наложены случайные припуски. Для учета ошибок, вносимых литографическим оборудованием, моделирование проводилось при различных значениях параметров процесса, таких как толщины фоторезиста, экспозиционная доза, положение фокуса и т. п. При проведении эксперимента выполнялся проход по дозе в диапазоне, большем предполагаемого EL_{tool}. Анализ результатов пропечатки экспериментальной выборки, соответствующей определенному разбросу размера, температуры, освещенности и т. д. при разных значениях экспозиционной дозы, позволяет построить набор функций плотности распределения ошибки размера на пластине

и определить значение EL_{tool} как удвоенную разность доз, соответствующих функции, центр которой находится на границе разброса допустимых размеров, и функции, край которой находится на границе разброса допустимых размеров.

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. Mack C. A. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.
3. Балан Н. Н. и др. Система требований к фотошаблонам для проекционной фотолитографии, применяемым в производстве полупроводниковых изделий современных проектных норм // Российский форум «Микроэлектроника-2022», 2022. — С. 142–143.
4. Waelpoel J. A. C., van Schoot J. B. P., Zanzal A. G. Demonstrating next-generation CD uniformity with today's tools and processes // 17th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology and Management / eds. J. A. Reynolds, B. J. Grenon. SPIE, 1997. Vol. 3236. P. 275–283.
5. Kiers T. et al. Reticle error correction for lithography tool qualification benefits and limitations // 20th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology / eds. B. J. Grenon, G. T. Dao. SPIE, 2001. Vol. 4186. P. 217–226.

УДК 543.062, 543.064, 543.421/.422

Разработка метода контроля содержания катионов металлов в фоторезистах с химическим усилением, чувствительных к актиничному излучению с длиной волны 248 нм

Кузьмина Е. А.[1,2], Джонс М. М.[3], Шишлянников А. В.[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, 6/1
[3] ООО «Поликетон»
603009, г. Нижний Новгород, ул. Батумская, 7а

Разработана методика измерений массовых долей элементов методом атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией в пробах фоторезиста, чувствительного к актиничному излучению с длиной волны 248 нм. Представлено краткое описание принципа метода, требования к нему и характеристики.

Ключевые слова: AAS-GFA; фоторезист; атомно-абсорбционная спектрометрия.

В настоящий момент активно ведутся работы по импортозамещению в сфере материалов для микроэлектроники. В частности, данные работы включают создание импортонезависимых материалов для фотолитографии — фоторезистов с химическим усилением и антиотражающих покрытий — в целях создания клонов импортных резистов для применения в производственных процессах микроэлектронных предприятий современного уровня.

Тенденция уменьшения топологических размеров микросхем диктует ужесточение требований к жидким средам, используемым на всех этапах производства микросхем, следовательно, и умение их анализировать с приемлемым уровнем достоверности должно соответствовать допустимым концентрациям (отнесенным к критическим) из примесей металлов в % масс.:

- алюминий $1{,}5 \cdot 10^{-6}$
- железо $2{,}0 \cdot 10^{-6}$
- магний $1{,}5 \cdot 10^{-6}$
- калий $2{,}0 \cdot 10^{-6}$
- кальций $3{,}0 \cdot 10^{-6}$
- марганец $1{,}0 \cdot 10^{-6}$
- натрий $3{,}0 \cdot 10^{-6}$
- медь $1{,}5 \cdot 10^{-6}$
- молибден $2{,}0 \cdot 10^{-6}$
- цинк $3{,}0 \cdot 10^{-6}$

При выполнении анализа примесей элементов в диапазонах указанных концентраций (их еще называют ультраследовыми) возникает ряд проблем, одними из которых являются исключение или сведение к минимуму риска загрязнения

пробы и подбор параметров пиролиза и озоления, соответствующих именно фоторезистам с учетом их химического состава.

Разработанный метод основан на измерении поглощения (абсорбции) резонансного излучения нейтральными атомами определенных элементов, образующимися в результате атомизации в графитовой кювете раствора пробы (AAS-GFA). Растворитель и концентрацию раствора подбирали практически, основываясь на показателях абсорбции.

Источником излучения выступают спектральные лампы с полым катодом (ЛПК), установленные в приборе. Свет от ламп пропускается через аналитическую ячейку — кювету (трубку), выполненную из спектрально чистого графита с пиролитически нанесенным графитовым покрытием. В кювету вносится раствор образца с помощью автоматического дозатора — автосамплера. Кювета далее электротермически нагревается в соответствии с заданной программой температурой до полного разложения вещества образца и перехода атомов образца в газообразное состояние в атмосфере инертного газа аргона. Свет от источника поглощается возбужденными атомами пропорционально концентрации искомого элемента — аналита — на выбранной длине волны. Выбор длин волн (резонансных или проминентных линий) осуществляется монохроматором прибора в соответствии с программой анализа аналита.

Для вычисления концентрации искомого аналита предварительно программа осуществляет градуировку (калибровку) с помощью стандартных растворов с известной заданной концентрацией и построением калибровочного графика зависимости измеряемой оптической плотности от концентрации.

Для учета неспецифической (фоновой) абсорбции света ЛПК в приборе применена коррекция фона с помощью эффекта Зеемана — расщепление пика аналита в магнитном поле за счет круговой поляризации и автоматическое вычитание поляризованной компоненты.

Описанный метод измерений используется для контроля разрабатываемого отечественного фоторезиста, проходит аттестацию для получения сертификата. После чего методика будет использована для аттестации фоторезиста при испытаниях на сохраняемость и для выходного и входного контроля.

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., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
3. Уэйст К. Использование ламинарных шкафов и боксов для защиты от загрязнений взвешенными в воздухе частицами, CleanAirProducts(USA) // CleanRooms, September, 2008.
4. Пупышев А. А. Атомно-абсорбционный спектральный анализ. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2009. — 784 с. ICBN 978-5-94836-231-1.

УДК 621.382

Использование метода двойного экспонирования со сдвигом маски для улучшения разрешающей способности фотолитографического процесса

Тихонова Е. Д.[1,2]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[2] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
etikhonova@niime.ru

В статье описан способ формирования критического размера линии длиной 45 нм с использованием метода двойного экспонирования со сдвигом маски, позволяющий выйти за пределы разрешения исходного процесса. Были проведены эксперименты по сравнению единичного переэкспонирования и двойного экспонирования.
Ключевые слова: фотолитография; разрешающая способность; двойное паттернирование; двойное экспонирование; фоторезист; шероховатость линии.

В настоящее время в России идет активное внедрение 65-нм техпроцесса. Для дальнейшего освоения 28 нм и более передовых технологий необходимо улучшать разрешение фотолитографического процесса, определяемое критерием Рэлея [1]:

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

где k_1 — технологический коэффициент применяемого фотолитографического процесса, λ — длина волны экспонирующего излучения, NA — числовая апертура используемой оптической установки.

Одним из способов преодоления дифракционного предела является применение методов двойного паттернирования [2, 3]. Однако использование двух фотошаблонов приводит к возникновению ошибки совмещения и к проблеме низкой пропускной способности, в связи с чем актуальным является применение метода двойного экспонирования [3].

В настоящей работе мы используем метод двойного экспонирования со сдвигом маски (Mask Shift Double Exposure, MSDE) для получения линий размером 45 нм. В стандартном процессе фотолитографии профиль фоторезиста создается путем однократного пропускания света через фотошаблон. В нашем случае излучаемая энергия разделяется на две. При сдвиге координат фотошаблона происходит изменение значений суммарной энергии, что позволяет добиться меньших критических размеров (КР).

Сначала мы провели эксперимент, целью которого было убедиться, что если не перемещать координаты фотошаблона и пластины, то при разделении световой энергии на две части с учетом значения пороговой энергии, суммарная доза экспонирования будет линейной комбинацией этих частей, т. е. получившийся массив линий не будет отличаться от исходного. В итоге, сравнив получившиеся профили

линий, нам удалось выяснить, что массив линий формируется одинаково как при одиночном экспонировании, так и при двукратном воздействии, и подобрать оптимальное значение дозы. Возникающий при этом небольшой сдвиг энергии обусловлен эффектом сопротивления временной задержки [3].

Затем мы сравнили двойное экспонирование с переэкспонированием — подачей дозы энергии, превышающей наилучшую, для массива линий размером от 90 до 150 нм. По мере увеличения дозы реакция фотогенератора (ФГК) становилась выше 50% и начинала распространяться в более непредвиденном направлении, что привело к ухудшению показателя шероховатости линии (Linewidth Roughness, LWR). Метод двойного экспонирования, напротив, продемонстрировал хорошее значение шероховатости линии из-за более узкого диапазона интенсивности света и меньшей избыточной энергии.

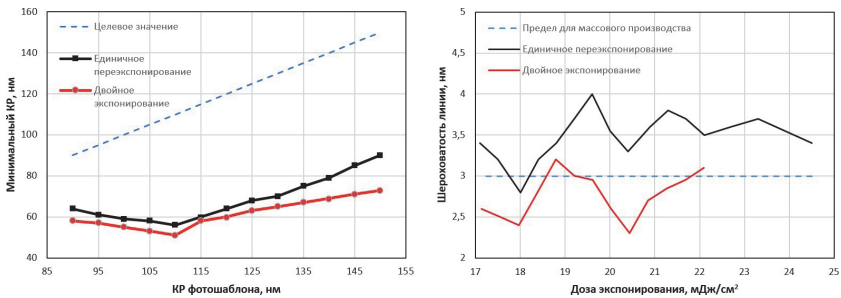


Рис. 1. Сравнение единичного переэкспонирования и двойного экспонирования: графики зависимости предельного критического размера от данного на фотошаблоне (слева) и шероховатости линии от дозы экспонирования (справа)

Как показано на рисунке выше, показатели шероховатости линии при использовании двойного экспонирования удовлетворяют требованиям промышленного производства. Однако для применения метода двойного экспонирования со сдвигом маски в производственном процессе необходимо сконструировать более сложный макет маски, способный отображать два (и более) различных шаблона, например, с помощью разделения проектируемого участка на две области.

Таким образом, за однократный процесс фотолитографии возможно будет получить массив линий или более сложные структуры меньших размеров. В дальнейшем можно использовать процесс двойного паттернирования для достижения лучшего разрешения литографического процесса.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.
2. Тихонова Е. Д., Горнев Е. С. Использование материала spin-on-carbon для улучшения метода самосовмещенного двойного паттернирования // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-3 (102). — С. 859–861.
3. Lee S., Byers J., Jen K., Zimmerman P., Rice B., Turro N. J., Willson C. G. An analysis of double exposure lithography options // Proc. SPIE 6924, Optical Microlithography XXI, 2008. Vol. 6924. P. 1–12.

УДК 51-74

Методы расчета припусков на травление при проектировании фотошаблонов

Харченко Е.Л., Уткина А.А.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
ekharchenko@niime.ru, autkina@niime.ru

В работе рассмотрена проблема ухода размеров топологических элементов в процессе травления. Для решения проблемы применено компактное полуэмпирическое моделирование и методы машинного обучения. На основе рассчитанных припусков составлены правила коррекции топологии при проектировании фотошаблонов.
Ключевые слова: вычислительная литография; фотолитография; фотошаблон; травление.

В процессе проектирования фотошаблонов возникает немало задач, их количество и сложность возрастают по мере уменьшения критического размера на пластине [1]. Необходимо не только разместить элементы технологического обрамления, оптимально расставить кристаллы на кадре, но и откорректировать топологическую информацию для учета дифракционных эффектов, возникающих в фотолитографии. Помимо дифракционных эффектов во время экспонирования фоторезиста, также стоит учитывать неточности переноса рисунка в процессе травления слоя под фоторезистивной маской [2]. Сложность заключается в том, что уход размеров неравномерный и зависит от геометрии топологического рисунка.

В целяхю расчета припусков на травление необходимо спроектировать матрицу периодических тестовых структур. Далее провести измерение структур в результате проявления фоторезистивной маски и после травления слоя под ней. Разница в полученных измерениях показывает припуск, который требуется учитывать при проектировании фотошаблонов. Однако измерить все встречающиеся на практике случаи не представляется возможным, поэтому возникает необходимость в построении соответствующих моделей [3].

В работе рассмотрен подход использования компактных полуэмпирических моделей и моделей на основе машинного обучения для расчета припусков на травление на примере затворного слоя для проектной нормы 28 нм. Исходными данными для моделирования являлись измерения 207 периодических структур, которые разделили на калибровочное и верификационное множества. Сравнение моделей проводилось непосредственно на верификационном множестве. Критерием сравнения являлось среднеквадратическое отклонение смоделированного размера от измеренного на пластине. Модель, показавшая наименьшую ошибку, была взята для определения правил коррекции топологической информации на фотошаблоне.

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. Granik Y. Correction for etch proximity: new models and applications // Optical Microlithography XIV. SPIE, 2001. Vol. 4346. P. 98–112.
3. Liu Q., Cheng R., Zhang L. Study of model based etch bias retarget for OPC // Optical Microlithography XXIII. SPIE, 2010. Vol. 7640. P. 982–987.

УДК 537.862

Терагерцевый эмиттер на основе Co/Mo с возможностью управления амплитудой и поворотом поляризации ТГц-излучения

Авдеев П. Ю.[1], Лебедева Е. Д.[1], Горбатова А. В.[1], к. ф.-м. н., Климов А. А.[1], Гусев Н. С.[2], к. ф.-м. н., Буряков А. М.[1], д. ф.-м. н., Сапожников М. В.[2], д. ф.-м. н., Мишина Е. Д.[1]

[1] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
[2] Институт физики микроструктур РАН
603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105
pasha.avdeev.2000@mail.ru

Экспериментально исследован спинтронный эмиттер ТГц-излучения на основе структуры Co (3 нм) / Mo (3 нм). В данном эмиттере показана возможность управления ТГц-генерацией при изменении поляризации оптической накачки. Использование Mo позволило изменять ТГц-амплитуду на 41 % при вращении линейной поляризации накачки. Продемонстрировано управление ТГц-поляризацией на 360° при помощи внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: ТГц-излучение; спинтронные эмиттеры; ТГц-поляризация; управление ТГц-поляризацией; контроль ТГц-амплитуды.

Применение терагерцевого (ТГц) излучения открывает большие перспективы для медицины, визуализации, обеспечения безопасности [1, 2] и т. д. В связи с этим возникает необходимость в высокоэффективных широкополосных ТГц-источниках. На эту роль отлично подходят спинтронные эмиттеры — магнитные металлические наноструктуры, в которых ТГц-генерация происходит в результате спин-зарядовой конверсии, вызванной сверхбыстрыми лазерными импульсами [3]. Наиболее распространенным механизмом преобразования спина в заряд является обратный спиновый эффект Холла (ОСЭХ), который происходит в объеме материала с сильной спин-орбитальной связью [4]. В эмиттерах на основе ОСЭХ-амплитудой и поляризацией ТГц-сигнала можно управлять приложением магнитного поля [5]. Среди спиновых эффектов ТГц-генерации также примечателен обратный эффект Рашбы — Эдельштейна (ОЭРЭ), основанный на спиновом расщеплении электронов на границе материала с нарушенной инверсионной симметрией. В работах [6] и [7] было показано управление амплитудой ТГц-сигнала эллиптично-поляризованной лазерной накачкой. Таким образом, в эмиттерах на основе ОЭРЭ имеется возможность управления ТГц-амплитудой при помощи поляризации возбуждающего излучения, что недостижимо при других механизмах ТГц-генерации.

В своей работе мы сообщаем о спинтронном эмиттере, основанном на ОЭРЭ, с возможностью управления ТГц-амплитудой при помощи поляризации возбуждающего излучения, а также управления ТГц-поляризацией внешним магнитным полем. Использование пленки Mo в качестве немагнитного слоя позволило управлять ТГц-амплитудой посредством поворота линейно-поляризованной накачки.

Исследуемый спинтронный эмиттер на основе структуры Co/Mo был получен методом магнетронного напыления на подложку SiO_2. Толщина слоя кобальта

и молибдена составила 3 нм соответственно. Для формирования одноосной магнитной анизотропии в процессе напыления прикладывалось магнитное поле напряженностью 1500 Э в плоскости образца. С использованием методики продольного магнитооптического эффекта Керра была подтверждена одноосная магнитная анизотропия в плоскости выращенных пленок.

Эксперимент проводился при помощи методики терагерцевой спектроскопии временного разрешения (THz-TDS — terahertz time-domain spectroscopy) в геометрии на пропускание. Подробное описание экспериментальной установки приведено в работе [8].

Показано, что изменение стороны воздействия возбуждающего излучения вызывает изменение фазы ТГц-сигнала на 180 градусов. Это явление связано с изменением направлений спинового (j_s) и зарядового (j_c) токов, что подтверждает наличие спин-зарядовой конверсии в исследуемом спинтронном эмиттере. Показано, что механизм ТГц-генерации имеет магнитную природу и связан с эффектом Рашбы — Эдельштейна.

Амплитуда ТГц-излучения достигала величины 3,3 кВ/см, а ширина спектра, ограниченная чувствительностью детектирующего кристалла ZnTe, составила 3,0 ТГц.

Показана глубина модуляции 70 % при изменении направления магнитного поля, приложенного вдоль оси легкого намагничивания. Амплитуда ТГц-сигнала при намагничивании эмиттера вдоль легкой оси магнитной анизотропии на 32 % выше, чем при намагничивании вдоль трудной оси.

Продемонстрировано управление ТГц-амплитудой путем поворота плоскополяризованного возбуждающего излучения. При изменении величины и направления магнитного поля глубина модуляции ТГц-амплитуды составила от 24 до 41 %.

Продемонстрировано управление поворотом плоскости ТГц-поляризации в диапазоне от 0 до 360° при приложении к спинтронному эмиттеру магнитного поля напряженностью до ±200 Э. Была показана возможность точной подстройки ТГц-поляризации в диапазоне от 0 до 360° при приложении магнитного поля различной напряженности вдоль трудной оси намагничивания. При аналогичном намагничивании эмиттера вдоль легкой оси магнитной анизотропии происходило скачкообразное изменение поляризации на 180°.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда № 23-19-00849.

Литература

1. Pawar A. Y. et al. Terahertz technology and its applications // Drug Invent. Today, 2013. Vol. 5. № 2. P. 157–163.
2. Гареев Г., Лучинин В. Применение терагерцевого излучения в биологии и медицине // Наноиндустрия, 2014. — № 6. — С. 34–45.
3. Wu W. et al. Principles of spintronic THz emitters // J. Appl. Phys., 2021. Vol. 130. № 9.
4. Seifert T. et al. Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation // Nat. Photonics. Nature Publishing Group UK London, 2016. Vol. 10. № 7. P. 483–488.
5. Khusyainov D. et al. Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure // Sci. Rep., 2021. Vol. 11. № 1. P. 697.
6. Zhou C. et al. Broadband Terahertz Generation via the Interface Inverse Rashba-Edelstein Effect // Phys. Rev. Lett., 2018. Vol. 121. № 8. P. 086801.

7. Jungfleisch M. B. et al. Control of Terahertz Emission by Ultrafast Spin-Charge Current Conversion at Rashba Interfaces // Phys. Rev. Lett., 2018. Vol. 120. № 20. P. 207207.
8. Buryakov A. M. et al. Efficient Co/Pt THz spintronic emitter with tunable polarization // Appl. Phys. Lett., 2023. Vol. 123. № 8. P. 082404.

УДК 621.3.049

Исследование болометрического отклика Ван-дер-Ваальсова сверхпроводника $NbSe_2$

Шеин К.[1], Жаркова Е.[2], Кащенко М.А.[2], Любчак А.[1,2], Нгуен Е.[2], Семенов А.[1], Гольцман Г.Н.[1], Новоселов К.С.[4,2], Чараев И.[5], Шиллинг А.[5], Гайдученко И.[1], Бандурин Д.А.[6]

[1] Московский государственный педагогический университет, физический факультет
119435 , г. Москва
2 Центр нейрофизики и нейроморфных технологий
121205, г. Москва
[3] Центр фотоники и двумерных материалов
141700, г. Долгопрудный
[4] Институт функциональных умных материалов, Национальный университет Сингапура
117575, Сингапур
[5] Университет Цюриха, Цюрих, Швейцария, 8057
[6] Факультет материаловедения и инженерии, Национальный университет Сингапура
117575, Сингапур

Продемонстрировано использование сверхпроводников $NbSe_2$ vdW в качестве ТГц-болометров. Улучшенный интерфейс между $NbSe_2$-выводами спиральной антенны способствовал уменьшению несоответствия импеданса между $NbSe_2$ и схемой считывания радиочастотного сигнала, что позволило нам достичь сильного фотоотклика на частотах 0,13 ТГц.

Ключевые слова: болометр на горячих электронах; терагерцевые технологии.

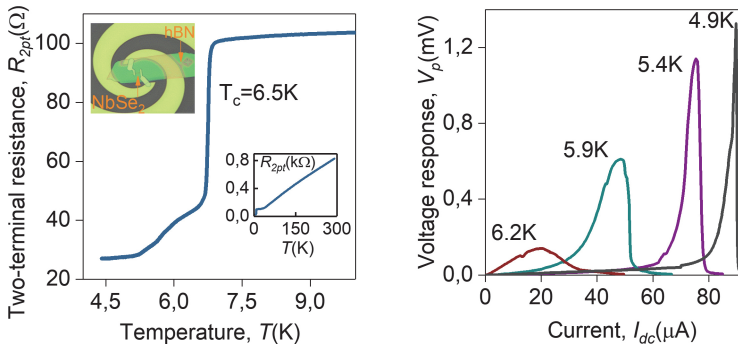
Работа сверхпроводящих болометров на горячих электронах (HEB) основана на поглощении падающего ТГц-излучения, которое вызывает повышение электронной температуры, Te. Это приводит к значительному увеличению сопротивления образца, когда его температура приближается к температуре сверхпроводящего перехода [1].

Наши $NbSe_2$-устройства (см. вставку на рис. 1*а*) были изготовлены с использованием метода сухого переноса [2]. Так, устройства состояли из флейков малой ширины (микропроводов) $NbSe_2$, покрытых тонкими слоями hBN для предотвращения загрязнений и деградации сверхпроводника в процессе электронной литографии, используемой для нанесения электрических контактов. Микропровод $NbSe_2$ был соединен с золотой спиральной логопериодической антенной, которая была разработана в желаемого диапазона частот.

Перед измерениями фотоотклика мы охарактеризовали транспортные свойства наших приборов на основе $NbSe_2$. На рис. 1*а* показана зависимость сопротивления R_{2pt} от температуры T для одного из них. Микропровод $NbSe_2$ имеет стандартное металлическое поведение (вставка на рис. 1*а*) и характеризуется типичным для $NbSe_2$ отношением остаточного сопротивления (RRR = 8) [3]. Температура сверхпроводящего перехода, T_c, микропровода составляла около 6,5 K [4]. В середине

сверхпроводящего перехода $R_{2pt} \approx 50\ \Omega$, что совпадает с импедансом схемы радиочастотного считывания и обеспечивает идеальное согласование между $NbSe_2$ и схемой, позволяя исследовать фундаментальные пределы времени отклика в сверхпроводящих HEBs из $NbSe_2$.

Для проведения измерений фотоотклика устройства были помещены на полусферическую линзу, прикрепленную к холодному пальцу криостата с переменной температурой, оснащенного высокочастотными коаксиальными кабелями. Такая установка вместе с широкополосной антенной позволила проводить измерения при различных T. В схеме мы использовали лампу обратной волны (ЛОВ) с частотой f = 0,13 ТГц. Выходное излучение модулировалось с помощью механического прерывателя, вращающегося с частотой 77 Гц, а напряжение отклика ΔV измерялось как функция тока смещения I_{dc} с помощью стандартной методики измерения методом lock-in, синхронизированной с частотой прерывателя. Мощность выходного излучения, P_0, определялась с помощью калиброванного измерителя мощности или ячейки Голея в зависимости от диапазона мощности. На рис. 1*б* показаны зависимости ΔV от тока смещения I_{dc} при освещении образца излучением 0,13 ТГц. Наблюдался ярко выраженный пик ΔV вблизи критического тока при заданной температуре T.



а *б*

Рис. 1

Литература

1. Gousev Yu. P. et al. Broadband ultrafast superconducting NbN detector for electromagnetic radiation // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 75. № 7. P. 3695–3697.
2. Castellanos-Gomez A. et al. Deterministic transfer of two-dimensional materials by all-dry viscoelastic stamping // 2D Mater., 2014. Vol. 1. № 1. P. 011002.
3. Boaknin E. et al. Heat Conduction in the Vortex State of $NbSe_2$: Evidence for Multiband Superconductivity // Phys. Rev. Lett., 2003. Vol. 90. № 11. P. 117003.
4. Khestanova E. et al. Unusual Suppression of the Superconducting Energy Gap and Critical Temperature in Atomically Thin $NbSe_2$ // Nano Lett., 2018. Vol. 18. № 4. P. 2623–2629.

УДК 537.638.215

Терагерцевая генерация в обменно-смещенной гетероструктуре Co/IrMn

Лебедева Е. Д.[1], Авдеев П. Ю.[1], Горбатова А. В.[1], к. ф.-м. н., Пашенькин И. Ю.[2], д. ф.-м. н., Сапожников М. В.[2], к. ф.-м. н., Буряков А. М.[1]
[1] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
caterina.lebedewa2015@yandex.ru
[2] Институт физики микроструктур РАН
603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105

Настоящая работа посвящена исследованию управления характеристиками ТГц-излучения в спинтронном генераторе на основе Co/IrMn за счет манипулирования обменной связью между слоями ФМ/АФМ. В работе продемонстрировано динамическое управление величинами обменной связи, обменного смещения, коэрцитивных сил, а также направления пиннинга при помощи лазерных импульсов и магнитного поля. Результаты данной работы дадут возможность отказаться от энергозатратных постоянных магнитных полей для управления характеристиками ТГц-излучения, а также позволят расширить область применения ТГц-технологий.

Ключевые слова: ТГц-излучение; обменное смещение; структура ферромагнетик/антиферромагнетик; лазерно-индуцированное управление.

Обратный спиновый эффект Холла (ISHE) является одним из фундаментальных механизмов преобразования спин — заряд в сверхбыстрой спинтронике [1]. Этот эффект заключается в генерации тока поперечного заряда при спиновой накачке ферромагнетика (ФМ) за счет спин-орбитальной связи. Значительное усиление спин-зарядной конверсии может быть достигнуто путем добавления к ФМ тонкого слоя антиферромагнитного материала (АФМ) [2]. В результате обменного взаимодействия между слоями ФМ и АФМ происходит усиление спинового тока. Таким образом, структуры на основе тонких пленок ФМ/АФМ обеспечивают более эффективное преобразование спина в заряд по сравнению с чистыми ФМ, что может быть использовано в различных приложениях спинтроники [3]. Кроме того, АФМ обладает такими свойствами, как устойчивость к внешним магнитным полям и сверхбыстрое спиновое возбуждение. Эти свойства, наряду с возможностью генерации ТГц, позволяют создавать на основе АФМ спинтронные устройства, которые могут превзойти возможности существующих спинтронных устройств на основе ФМ [4]. Однако относительно небольшая чистая намагниченность затрудняет управление магнитными моментами АФМ. Таким образом, поиск эффективных методов манипулирования магнитными моментами АСМ имеет решающее значение для реализации спинтронных устройств на основе АСМ. В данной работе мы исследовали возможность манипулирования величиной обменного смещения в структуре FM/AFM с помощью лазерного нагрева и приложения малых магнитных полей.

FM/AFM-структура была изготовлена на подложке Al_2O_3. Слои Co (3 нм) и IrMn (5 нм) были осаждены с помощью магнетронного распыления. Поверхности активных слоев были защищены тонкими слоями SiO_2. Наличие слоя АСМ помогло

создать одноосную анизотропию в плоскости образца, о чем свидетельствует наличие четко выраженных тяжелой и легкой осей в петлях ТГц-гистерезиса.

С помощью спектроскопии во временной области ТГц были получены зависимости амплитуды ТГц от внешнего магнитного поля (ТГц-Н). Путем локального нагрева слоя АСМ фемтосекундными лазерными импульсами общим числом около 10000 было зарегистрировано магнитное состояние во внешнем магнитном поле. Плотность энергии лазерного излучения составляла 2,1 мДж/см^2. Для регистрации состояния в плоскости образца было приложено магнитное поле напряженностью около 100 Оэ. Приложение магнитного поля напряженностью около 20 Оэ в направлении, противоположном исходному, демонстрировало переключение состояния намагниченности в исследуемой структуре, характеризующееся возвратом в исходное состояние. Таким образом, наблюдалось три состояния петли гистерезиса — симметричная петля (начальное состояние), а также положительно и отрицательно смещенные петли. Помимо смещения петли относительно оси магнитного поля, наблюдалось увеличение коэрцитивного поля в обменно-неоднородных состояниях. Следующим этапом исследования стало определение природы ТГц-генерации. При изменении знака приложенного магнитного поля наблюдалось изменение фазы ТГц-сигнала, что указывает на спиновую природу ТГц-генерации. Кроме того, были получены временные профили ТГц-сигнала при возбуждении образца со стороны подложки и со стороны пленки. Наблюдалась инверсия фазы сигнала, что указывает на то, что основным механизмом генерации ТГц в данном образце является обратный спиновый эффект Холла.

Таким образом, была продемонстрирована возможность манипулирования направлением обменного смещения в структуре Co/IrMn с помощью магнитных полей порядка 100 Оэ и лазерного нагрева. Исследование поля обменного смещения между слоями материалов FM и AFM проводилось с помощью ТГц-спектроскопии во временной области. Результаты показали наличие трех стабильных состояний намагниченности, характеризующихся сдвигом петли ТГц-гистерезиса. Величина поля смещения в данном случае составляла 76 Оэ. Коэрцитивное поле в обменно-связанных состояниях увеличилось на 49 Oe. Кроме того, был определен основной механизм генерации ТГц-излучения в этом образце.

Литература

1. Prezioso M. et al. Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors // Nature. Nature Publishing Group UK London, 2015. Vol. 521. № 7550. P. 61–64.
2. Merolla P.A. et al. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface // Science (80-.). American Association for the Advancement of Science, 2014. Vol. 345. № 6197. P. 668–673.
3. Khoroshilov A.L. et al. Hall Effect in the Antiferromagnetic State of Ho0. 8Lu0. 2B12 // JETP Lett. Springer, 2022. Vol. 115. № 3. P. 130–135.
4. Jungwirth T. et al. The multiple directions of antiferromagnetic spintronics // Nat. Phys. Nature Publishing Group UK London, 2018. Vol. 14. № 3. P. 200–203.

УДК 621.382

Механизмы радиационной деградации пробивного напряжения p-n-переходов мощных МОП-транзисторов с различными структурами

Арзамасцева Д. М., Петров А. С., Таперо К. И.
АО «Научно-исследовательский институт приборов»
140080, г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8
DMArzamasceva@niipribor.ru

Исследовано влияние гамма-облучения на пробивное напряжение *p-n*-переходов мощных вертикальных МОПТ (VDMOSFET) и КНИ МОПТ с боковой диффузией (SOI LDMOSFET). Для VDMOSFET деградация пробивного напряжения связана с паразитной структурой, в SOI LDMOSFET изменяется концентрация носителей в области дрейфа.
Ключевые слова: мощные МОП-транзисторы; радиационные эффекты; напряжение пробоя *p-n*-переходов.

Благодаря возможности работы при больших токах (до 70 А) и высоких напряжениях (до 1000 В) мощные МОП-транзисторы стали неотъемлемой частью источников тока, схем коммутации и распределения электропитания и другой критически важной аппаратуры. Такая аппаратура часто используется в условиях воздействия ионизирующего излучения (ИИ), например, для обеспечения работы ядерных энергетических установок. Таким образом, исследования влияния радиационного облучения на изменение пробивного напряжения *p-n*-переходов мощных МОП-транзисторов становятся все более актуальными. Однако физические механизмы, ответственные за изменение напряжения пробоя перехода сток-исток VDMOSFET (vertical diffused MOSFET) и SOI LDMOSFET (silicon-on-insulator lateral double-diffused MOSFET), не были до конца изучены. Цель данной работы — проанализировать эти физические механизмы.

В работе [1] был исследован эффект увеличения пробивного напряжения сток-исток после воздействия гамма-излучения на мощные n-МОПТ IRFR4615PbF и IRFR3710ZPbF, изготовленные по технологии HEXFET. Структура HEXFET — это размещенные в одном кристалле тысячи параллельно включенных VDMOSFET, образующих шестиугольник. Ток каждого транзистора вносит вклад в общий ток структуры ввиду ее вертикальности. В каждом VDMOSFET выделяют четыре области [2]: n^+ — сильнолегированная область истока, p — область подложки, n^- — слаболегированная область дрейфа в стоке, n^+ — сильнолегированная область стока (рис. 1).

В данной структуре велика вероятность включения «паразитного» биполярного транзистора n^+-p-n^-. Для подавления этого эффекта обычно соединяют эмиттер и базу «паразитного» транзистора металлическим электродом истока на поверхности транзистора, однако подача высокого напряжения с быстрой скоростью нарастания (как при ЭСР в [1]) приводит к включению этой структуры. Радиационное облучение вызывает деградацию коэффициента усиления «паразитного» транзистора, вследствие чего пробивное напряжение сток-исток повышается.

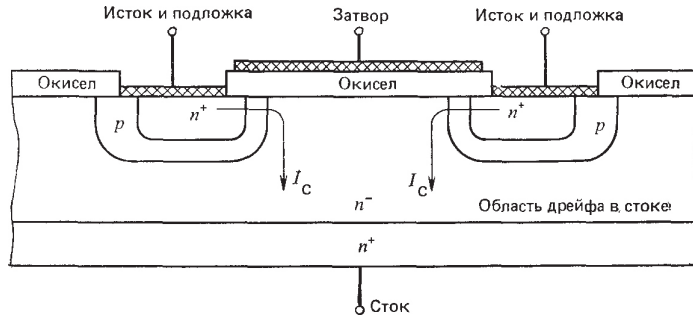


Рис. 1. Поперечное сечение структуры вертикального VDMOSFET [2]

Для SOI LDMOSFET механизм изменения пробивного напряжения вследствие воздействия ИИ иной. ИИ вызывает генерацию электрон-дырочных (e-h) пар в оксиде МОП-структур. Электроны удаляются из оксида за время около пикосекунды, поскольку имеется поперечное электрическое поле. Некоторые e-h-пары успевают прорекомбинировать, но большая часть дырок, вследствие меньшей по сравнению с электронами подвижности, захватывается на локализованные в оксиде состояния (уже имеющиеся до облучения). Таким образом, в объеме скрытого и полевого оксидов (BOX и FOX соответственно) накапливается положительный заряд (рис. 2). Поскольку BOX гораздо толще FOX, в нем накопится больше заряда за одно и то же время облучения. Накопление положительного заряда в окисле вызывает образование инверсного слоя в области дрейфа, который соединяет области стока и истока.

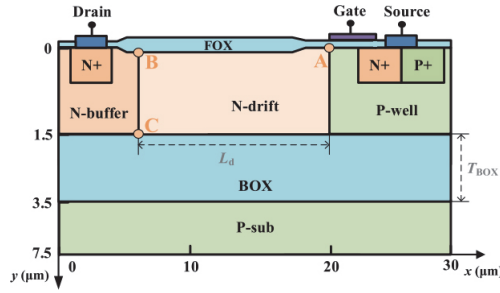


Рис. 2. Структура SOI LDMOSFET

Структуры SOI LDMOSFET имеют длинную слегка легированную область дрейфа *n*-типа, и именно эта область определяет напряжение пробоя. Зависимость пробивного напряжения сток-исток от уровня легирования этой области показана на рис. 3. По механизму, описанному выше, воздействие ИИ изменяет концентрацию носителей в дрейфовой области, что приводит к изменению пробивного напряжения сток-исток.

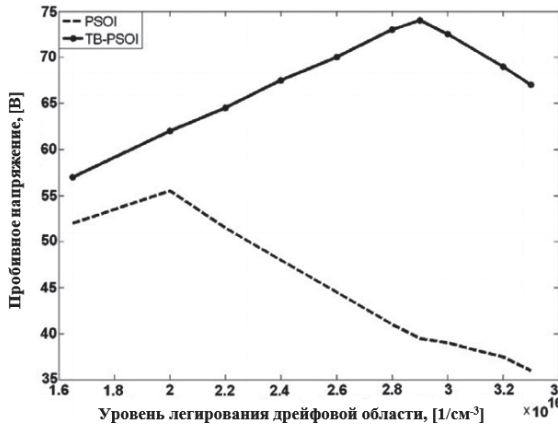


Рис. 3. Зависимость пробивного напряжения сток-исток SOI LDMOSFET от уровня легирования дрейфовой области [3]

Таким образом, воздействие ИИ может как увеличивать, так и уменьшать пробивное напряжение сток-исток мощных МОПТ в зависимости от особенностей структуры конкретного транзистора.

Литература

1. Арзамасцева Д. М., Петров А. С., Таперо К. И. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2023. — № 3. — С. 19–22.
2. Окснер Э. С. Мощные полевые транзисторы и их применение: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1985.
3. Saremi M. et al. A partial-SOI LDMOSFET with triangular buried-oxide for breakdown voltage improvement // Microelectronics Reliability, 2011. P. 1–8.

УДК 621.382:621.315.592.3

Диагностика вызванных тяжелыми заряженными частицами повреждений МОП-структур с помощью импедансной и DLTS-спектроскопии

Горбачук Н. И.[1], Поклонский Н. А.[1], Ермакова Е. А.[1], Шпаковский С. В.[2]
[1] Белорусский государственный университет
220030, Республика Беларусь, г. Минск, просп. Независимости, 4
gorbachuk@bsu.by, poklonski@bsu.by, ermakova.7003@gmail.com
[2] ОАО «Интеграл»
220108, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Казинца, 121А
shpaks@tut.by

Исследовались структуры Al/SiO_2/*n*-Si, облученные ионами He с энергией 5 МэВ флюенсом 10^{10}–10^{12} $см^{-2}$. Показана возможность регистрации методом спектроскопии DLTS поверхностных состояний на границе SiO_2/*n*-Si. С помощью импедансной спектроскопии продемонстрировано формирование квазисплошного нарушенного слоя.
Ключевые слова: МОП-структуры; кремний; радиационные дефекты; DLTS; импедансная спектроскопия.

Структуры металл — диэлектрик — полупроводник или металл — оксид — полупроводник (МДП или МОП) являются базовыми для современных технологий микро- и наноэлектроники. Необходимость разработки изделий электроники, устойчивых к воздействию ионизирующих излучений и к облучению тяжелыми заряженными частицами, требует развития методов диагностики. Традиционно для исследования радиационных повреждений МОП-структур применяются методы емкостной спектроскопии [1]. Наличие ловушек для носителей заряда на границе раздела оксид — полупроводник и компенсация легирующих примесей радиационными дефектами осложняет анализ результатов измерений. Это связано с появлением дополнительной зависимости емкости и от частоты переменного тока, и от напряжения смещения вследствие перезарядки поверхностных состояний и наличия дополнительных электрических потерь в компенсированном кремнии. Применение методов импедансной спектроскопии для исследования подобных структур может дать дополнительную информацию [2, 3]. Спектроскопия DLTS, как правило, используется для контроля барьеров Шоттки и *p*-*n*-структур [4]. В исследовании же МОП-структур она применяется пока не столь успешно. Цель работы — продемонстрировать возможности комбинированного применения DLTS и импедансной спектроскопии в диагностике радиационных повреждений структур Al/SiO_2/*n*-Si.

Структуры Al/SiO_2/*n*-Si изготавливались на пластинах (100) монокристаллического кремния КЭФ-4,5, выращенного методом Чохральского. Слой SiO_2 толщиной 420 нм формировался термическим окислением. На планарную сторону поверх слоя SiO_2 термическим напылением наносился алюминий. Площадь металлизации толщиной 0,7 мкм составляла 1,85×1,85 $мм^2$. Контакты к непланарной стороне также формировались напылением Al. Со стороны Al/SiO_2 структуры облучались ионами гелия (энергия 5 МэВ, средний проективный пробег ≈ 24 мкм). Облучение проводилось при комнатной температуре. Флюенс варьировался от 10^{10} до 10^{12} $см^{-2}$.

Установлено, что дисперсия электрической емкости в режиме сильной инверсии определяется генерационно-рекомбинационными процессами, протекающими в области пространственного заряда; в режиме обеднения дисперсия в основном обусловлена перезарядкой поверхностных состояний. Наличие радиационно компенсированного слоя кремния существенно сказывается на дисперсии электрической емкости при флюенсе облучения 10^{12} см$^{-2}$ и проявляется даже в режиме обогащения. Расчет плотности поверхностных состояний в облученных структурах, проведенный по данным измерений вольт-фарадных характеристик, показывает наличие двух максимумов: в окрестности E_c — 0,1 эВ и E_c — 0,4 эВ. Установлено, что варьирование напряжения заполнения и напряжения эмиссии позволяет независимо регистрировать сигналы DLTS от центров, локализованных на границе раздела SiO_2/*n*-Si, и от радиационных дефектов в глубине кремния, при этом максимум на спектре DLTS, определяемый поверхностными состояниями, расположен при $E = 0{,}4 \pm 0{,}05$ эВ.

Литература

1. Nicollian E. H., Goetzberger A. The Si-SiO_2 interface electrical properties as determined by metal-insulator-silicon conductance technique // The Bell System Technical Journal, 1967. Vol. XLVI. № 6. P. 1055–1133.
2. Impedance spectroscopy: theory, experimen. and applications / Eds. E. Barsoukov, J. R. Macdonald. Hoboken: Wiley, 2005. 595 p.
3. Vitanov P., Ivanova K., Harizanova A. Investigation of thin film of metal oxides on silicon with impedance spectroscopy // Vacuum, 2004. Vol. 76. № 2–3. P. 207–210.
4. Lang D. V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors // Journal of Applied Physics, 1974. Vol. 45. № 7. P. 3023–3032.

УДК 621.382

Способ мониторинга порогового напряжения МОП-транзисторов в широком временном интервале после воздействия импульса ионизирующего излучения

Земцов А. Э., Петров А. С., Таперо К. И.
АО «Научно-исследовательский институт приборов»
140080, г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8
m1705366@edu.misis.ru

Представлен метод определения порогового напряжения МОП-транзисторов посредством импульсного изменения смещения на затворе и снятия сток-затворной характеристики.

Ключевые слова: МОП-транзисторы; пороговое напряжение; сток-затворная характеристика; ионизирующее излучение.

Сдвиг порогового напряжения (V_{th}) МОПТ является основным индикатором накопления и релаксации заряда в подзатворном оксиде. Измерение данного параметра транзисторов при воздействии импульсного ионизирующего излучения (ИИИ) затруднено протеканием ионизационных токов в исследуемых структурах. Кроме того, в подобных экспериментах стандартные методы регистрации V_{th} могут искажать результаты исследований, так как изменение электрического режима в процессе и непосредственно после облучения влияет на значение таких параметров, как выход заряда, время переноса дырок и сечение их захвата на оксидные ловушки [1, 2]. Целью данной работы являлась разработка и апробация способа мониторинга V_{th} МОПТ с учетом указанных выше аспектов.

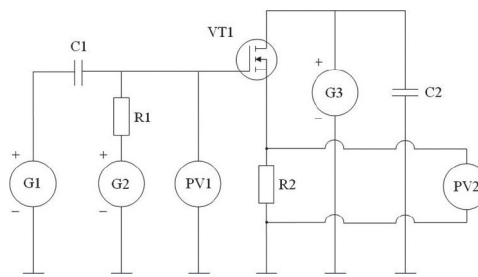
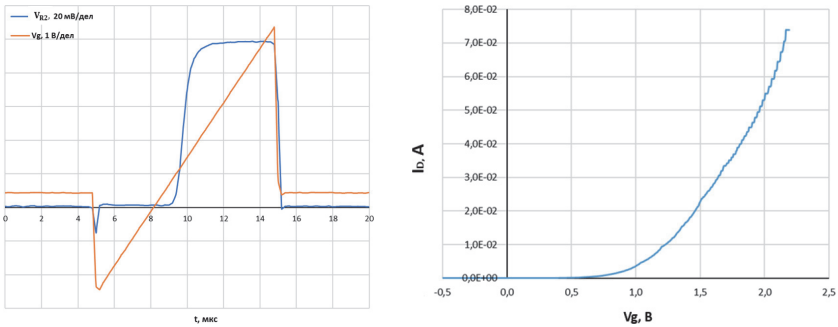


Рис. 1. Схема измерения порогового напряжения n-канального МОПТ после воздействия ИИИ

Схема измерения V_{th} n-канальных МОПТ представлена на рис. 1. Источники напряжения G2 и G3 включаются до начала облучения. G2 обеспечивает постоянное значение электрического поля в подзатворном оксиде исследуемой структуры и его направленность к границе раздела сред Si/SiO_2 до, в процессе и после воздействия ИИИ. С помощью G3 на сток МОПТ подается постоянное напряжение порядка 0,1 В, при котором транзистор работает в линейном режиме. Генератор G1 служит для подачи на затвор МОПТ короткого измерительного сигнала с высокой длительностью нарастания ($t_{сигнала} \approx t_{нарастания} = 10$ мкс), форма которого соответствует кривой Vg на рис. 2*а*.

Включение генератора по необходимому временному закону может осуществляться внешней системой запуска или посредством внесения данных в интерфейсе программы прибора. Осциллографом PV1 контролируется напряжение на затворе транзистора, а осциллографом PV2 регистрируется напряжение на токосъемном резисторе R2. Для записи данных об относительно редких изменениях напряжения осциллографы работают в режиме сегментирования памяти.

Для определения минимального (V_{G1min}) и максимального (V_{G1max}) значений напряжения сигнала генератора и номинала токосъемного резистора R2 предварительно до облучения производится измерение V_{th} стандартными методами. В данной работе использовался встроенный тест прецизионного параметрического анализатора Keysight B2902A. Параметры измерительного сигнала должны соответствовать условию $V_{G1min} < (V_{th0} - \Delta V_{th}) < V_{G1max}$, а номинал R2 выбирается таким, что ток ограничения превышает ток стока при $Vg = V_{th}$.



а *б*

Рис. 2. Общий вид сигнала с токосъемного резистора (V_{R2}) и затвора МОП-транзистора (Vg) (*а*) и часть сток-затворной характеристики с учетом поправки на изменения напряжения V_{DS}

На рис. 2*а* приведен общий вид осциллограмм, полученных с помощью представленного метода на образцах n-канальных МОПТ типа BS170 при $V_{G2} = 0{,}5$ В, $V_{G3} = 0{,}1$ В, R2 = 50 Ом. Измеряемое на токосъемном резисторе напряжение пересчитывалось в ток стока транзистора с учетом изменения напряжения V_{DS}, обусловленного последовательным с каналом сопротивлением:

$$I_D = \frac{V_{R2} / R}{1 - V_{R2} / V_{G3}}, \quad (1)$$

где V_{R2} — падение напряжения на токосъемном резисторе R2; R — сопротивление резистора R2.

На рис. 2*б* представлена итоговая сток-затворная характеристика транзистора BS170 с учетом описанной выше поправки в расчете I_D. Проведя касательную к зависимости $I_D(Vg)$ через точку, соответствующую максимальному значению крутизны МОПТ, можно определить величину V_{th} в момент измерения сток-затворной характеристики. Серия таких измерений через различные интервалы времени после ИИИ позволяет отследить изменение V_{th} транзистора, обусловленное релаксацией заряда в подзатворном оксиде. Альтернативным способом обработки результатов

подобного эксперимента может служить определение по зависимостям $I_D(Vg)$ значения Vg при фиксированной величине I_D.

Литература

1. Boesch H. E., McGarrity J. M., McLean F. B. Temperature- and field-dependent charge relaxation in SiO_2 gate insulators // IEEE Transactions on Nuclear Science, 1978. Vol. NS-25. № 3.
2. Ausman G. A. Field Dependence of Geminate Recombination in a Dielectric Medium, DTIC ADA179671, 1987.

УДК 537.9

Влияние толщины слоя $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ и степени электротренировки на время хранения состояния элемента сегнетоэлектрической памяти

Парочкин А. В., Савичев И. А., Савельева Е. О., Чуприк А. А.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1
chouprik.aa@mipt.ru

Исследовано влияние толщины слоя $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ и длительности электротренировки на эффект «пробуждения» и время хранения состояния в структурах $W/Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2/TiN$. Продемонстрирован подход к сохранению высокой остаточной поляризации ($2Pr = 40$ мкКл/см^2) при масштабировании толщины (5–8 нм).

Ключевые слова: энергонезависимая память; время хранения состояния; оксид гафния.

Разработка нового поколения высокоплотной энергонезависимой памяти требует использования нанометровых сегнетоэлектрических пленок. Наиболее перспективными кандидатами являются поликристаллические легированные пленки оксида гафния, поскольку они идеально совместимы с кремниевой технологией, обладают большой остаточной поляризацией и малым коэрцитивным напряжением [1]. Однако остаточная поляризация пленок HfO_2 снижается при уменьшении их толщины до нескольких нанометров [2]. Поэтому актуальными задачами являются разработка научно-технологических подходов изготовления сверхтонких сегнетоэлектрических пленок с высокой остаточной поляризацией, измерение характеристик ячеек памяти на их основе и изучение физических механизмов влияния параметров пленок на характеристики.

Основным недостатком сегнетоэлектрической памяти является ограниченное время хранения состояния, что связано с внутренним свойством сегнетоэлектрика — существованием в нем электрического поля, создаваемого зарядами спонтанной поляризации и неидеальностью его экранировки зарядами в электродах. Поле спонтанной поляризации приводит к пространственному перераспределению мобильного заряда в сегнетоэлектрической пленке, который, в свою очередь, создает внутреннее паразитное поле. При считывании информации оно складывается с приложенным полем, в результате чего суммарное поле в сегнетоэлектрике оказывается меньше приложенного, часть доменов не переключается, что приводит к ошибке считывания информации.

В данной работе представлены результаты исследования влияния толщины и процесса электротренировки на время хранения состояния сегнетоэлектрических конденсаторов на основе структуры $W/Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2/TiN$ с толщиной слоя $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ 5, 6 и 8 нм. Одной из причин уменьшения остаточной поляризации с толщиной является так называемый эффект пробуждения, длительность которого тем больше, чем тоньше пленка. Эффект пробуждения заключается в постепенном увеличении остаточной поляризации на начальном этапе работы ячейки

памяти и происходит во время процедуры электротренировки, заключающейся в приложении серии биполярных импульсов. В свежеприготовленных структурах остаточная поляризация мала, поскольку полярная ось зерен сегнетоэлектрической фазы преимущественно ориентирована в плоскости пленки, а в процессе электротренировки она поворачивается и становится более вертикальной, то есть происходят необратимые ферроупругие переключения [3].

Параметры электротренировки были подобраны таким образом, чтобы во всех типах структур сегнетоэлектрик находился в электрическом поле одинаковой напряженности и частоты; при этом электротренировка не вызывала пробой структуры и увеличение паразитного тока утечки, но в то же время приводила к одинаковой величине остаточной поляризации. Установлено, что с уменьшением толщины слоя $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ и при неизменной длительности электротренировки снижается время хранения состояния элементом памяти; с уменьшением слоя и при одинаковой степени поляризации снижается время хранения состояния; с уменьшением длительности электротренировки и при неизменной толщине слоя возрастает время хранения состояния. Последнее обусловлено меньшей величиной поля спонтанной поляризации в структурах, подвергшихся слабой электротренировке вследствие более горизонтально ориентированной полярной оси. Снижение времени хранения состояния с уменьшением толщины связано с большей величиной встроенного электрического поля. Действительно, при одинаковой величине паразитного удельного заряда напряженность создаваемого им электрического поля увеличивается с ростом толщины диэлектрического слоя конденсатора.

Представленные экспериментальные результаты могут быть полезны для разработки научно-технологических основ инженерии материалов в области энергонезависимой памяти на основе тонких пленок оксида гафния.

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования МФТИ при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00370, https://rscf.ru/project/20-19-00370).

УДК 621.31

Адаптация метода кусочной аппроксимации для оценки времени хранения логических состояний ячеек памяти FeRAM с учетом эффекта импринта

Быковский К. С., Захаров П. С., Скворцов Е. Б., Константинов В. С.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

Разработаны принципы метода кусочной аппроксимации деградационных зависимостей. В рамках адаптации метода к ячейкам памяти FeRAM подтверждена гипотеза о зависимости скорости деградации от количества заряда импринта.

Ключевые слова: метод кусочной аппроксимации; FeRAM; адаптация; импринт.

Развитие микроэлектроники столкнулось с ежегодным повышением сложности задач, для решения которых нужны устройства, способные безотказно выдавать необходимые потребителю характеристики. Энергонезависимая память является одним из базовых компонентов этих систем и обладает следующими основными характеристиками: время хранения, ресурс, объем, быстродействие, энергоэффективность и стойкость [1]. В настоящее время активно разрабатываются устройства памяти FeRAM, которые должны соответствовать типовым требованиям по времени хранения логического состояния, а именно не менее 10 лет при температуре 85 °C.

На сегодняшний день известны методы оценки длительности хранения логических состояний на основе проведения ускоренных испытаний при повышенных температурах. Такие методы предполагают использование уравнения Аррениуса с проведением эксперимента за пределами диапазона рабочих температур и последующей экстраполяцией в область более низких температур.

Существующие методы имеют следующие недостатки:

1) энергия активации может зависеть от температуры;
2) не все процессы деградации подчиняются уравнению Аррениуса.

Поэтому в [2] был представлен метод кусочной аппроксимации деградационных зависимостей, который является разновидностью метода прямых наблюдений, ускоренных за счет разбиения деградационного процесса на этапы и одновременного наблюдения за каждым из них. Метод не предполагает экстраполяции по температуре, поэтому лишен недостатков, присущих методам на основе уравнения Аррениуса.

В процессе адаптации метода к ячейкам памяти FeRAM подтверждена гипотеза о зависимости скорости деградации от количества заряда импринта и установлено, что по мере накопления заряда импринта скорость его накопления уменьшается.

В результате адаптации с учетом эффекта импринта построена синтезированная деградационная кривая на основе метода кусочной аппроксимации и проведено сравнение с кривой естественной деградации, которое показало, что синтезированная кривая имеет погрешность на уровне 18 % относительно естественной

деградационной кривой при проведении эксперимента длительностью 1 час при температуре 125 °C.

Литература

1. Красников Г. Я., Шелепин Н. А. Состояние и перспективы развития технологий и элементной базы СБИС с энергонезависимой памятью // Проектирование систем на кристалле: тенденции развития и проблемы: Тезисы докладов, Москва–Зеленоград, 19–21 октября 2010 года. — Москва–Зеленоград: МИЭТ, 2010. — С. 55.
2. Скворцов Е. Б., Быковский К. С., Захаров П. С., Константинов В. С. Метод оценки времени хранения ячейки памяти FERAM на основе кусочной аппроксимации деградационных зависимостей // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2024): Сборник докладов Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА, Москва, 12–16 апреля 2024 года. — М.: МИРЭА — Российский технологический университет, 2024. — С. 579–585.

УДК 621.382.2/.3

Исследование электрофизических параметров памяти EEPROM, изготовленной с использованием импортозамещенных материалов

Резник А. А.[1,2,3], Морозов Е. Н.[1], Ашанин М. Е.[1]
[1] АО «Микрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
reznik.aa@phystech.edu

Проведены электрические измерения микросхем памяти EEPROM, изготовленные по технологии 90 нм (в составе техпроцесса 180 нм), с использованием импортозамещенных материалов. Тесты на деградацию при различных температурах показывают, что основные характеристики микросхем находятся в пределах допустимых значений.

Ключевые слова: энергонезависимая память; EEPROM; пороговое напряжение; деградация.

Несмотря на активную разработку как в России, так и за рубежом новых видов энергонезависимой памяти, таких как сегнетоэлектрическая (FeRAM), резистивная (ReRAM), магниторезистивная (MRAM) и другие, память на транзисторах с плавающим затвором, к которой относятся Flash и EEPROM, до сих пор находит широкое применение в номенклатуре электронных устройств [1]. Хоть перспективные виды энергонезависимой памяти и могут значительно превосходить EEPROM по ключевым характеристикам, таким как количество циклов перезаписи, напряжение переключения, скорость работы и другие [2], но в то же время технология производства транзисторов с плавающим затвором лучше отработана, а физические процессы, протекающие во время работы ячейки памяти, например заброс «горячих» электронов в область плавающего затвора, достаточно хорошо изучены.

Новые виды энергонезависимой памяти на данный момент находят применение в сценариях, где не требуется большой объем хранимой информации, например в памяти для микроконтроллеров или микросхемах специального назначения, обладающих радиационной стойкостью [3]. Микросхемы памяти EEPROM в России используются для создания загранпаспортов нового образца, транспортных карт, RFID-меток и другой продукции, для которой характеристики перспективных видов памяти могут быть избыточны.

Начиная с 2022 года на зеленоградском заводе «Микрон» начался выпуск микросхем, в том числе и EEPROM по технологии 180 нм, с использованием импортозамещенных материалов. В частности, используются новые фоторезисты (ФР). Такие материалы имеют немного другие физико-химические характеристики, что приводит к изменению геометрии структур во время производства из-за отлаженного технологического процесса с использованием материалов с конкретными свойствами. Чтобы не допустить изменения электрических характеристик

микросхем памяти EEPROM, используются корректировки технологического процесса: например, по новым ФР применялись следующие действия: изменение толщин ФР, корректировка температур сушки ФР, добавление при проявлении т. н. двойной «лужи» (Double puddle), по сути двойного проявления. Все эти действия выполнялись в целях достижения требуемых значений по линейным размерам (Critical Dimension, CD) для каждого конкретного слоя/фоторезиста.

Контроль электрических параметров микросхем памяти EEPROM, выполненной по технологии 90 нм (в составе техпроцесса 180 нм), производится на тестовых структурах при помощи зондовых измерений. Оценка ресурса переключений и пороговых напряжений сформированных структур проводилась с помощью зондовой системы Cascade Summit 12000B-AP с полупроводниковым анализатором параметров Agilent B1500A. Для оценки деградации микросхем памяти измерения проводятся при различных повышенных температурах вплоть до 125 °C. В результате проведенных измерений строится зависимость порогового напряжения ячеек памяти от количества циклов переключений, как это изображено на рис. 1.

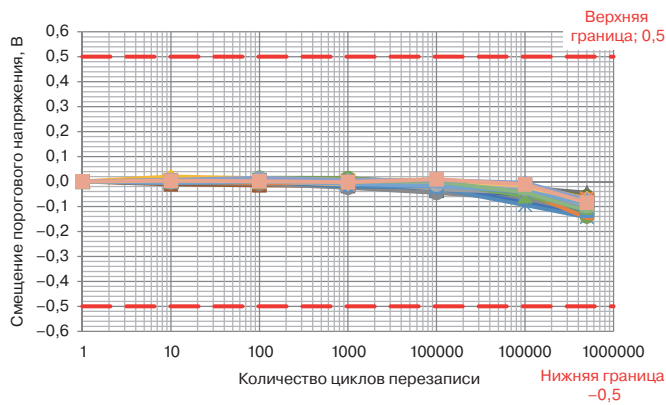


Рис. 1. Зависимость смещения порогового напряжения ячеек памяти EEPROM от количества циклов переключений при комнатной температуре

В результате проведения 500 тысяч циклов перезаписи ячеек памяти EEPROM были получены зависимости порогового напряжения, а также данные об энергии активации. Параметры измеряемых структур находятся в границах спецификации.

Литература

1. Красников Г. Я., Шелепин Н. А. Состояние и перспективы развития технологий и элементной базы СБИС с энергонезависимой памятью // Проектирование систем на кристалле: тенденции развития и проблемы, 2010. — С. 55–55.
2. Zyuzin S. S. et al. Computer Modeling of Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition of HfO_2 and ZrO_2 // Russian Microelectronics, 2023. Vol. 52. № Suppl 1. P. S184–S193.
3. Красников Г. Я., Мещанов В. Д., Шелепин Н. А. Семейство микросхем ПЗУ информационной емкостью 4-64 Мбит для космических приложений // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2015. — № 2 (158). — С. 4–10.

УДК 537.312.7

Элементы энергонезависимой резистивной памяти на основе человеческой крови

Клюкина Е. В.[1,3], Ванькаев А. С.[1,2], к. ф.-м. н., Ковешников С. В.[1]
[1] Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
skoveshnikov@iptm.ru
[2] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
s.vankaev14@gmail.com
[3] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
katerina-klyukina@mail.ru

В данной работе проведены исследования электрических характеристик человеческой крови. Наблюдалось резистивное переключение в вертикальном электрическом поле. Проведены исследования влияния облучения ультрафиолетом на проводимость крови в горизонтальном электрическом поле.
Ключевые слова: резистивное переключение; человеческая кровь; воздействие ультрафиолета; биомемристор; резистивная память.

В настоящее время необходим активный поиск новых материалов, пригодных для выполнения функций искусственных синапсов для нейроморфных вычислений. Элементы резистивной памяти на основе биологических материалов могут быть использованы для решения этой задачи [1]. Результаты многих исследований показывают наличие резистивного переключения в биологических материалах, таких как белки, ферменты, полисахариды [2].

В рамках работы необходимо было подготовить образцы для исследования в вертикальном электрическом поле. Кровь была разделена методом центрифугирования на две фракции: плазму и форменные элементы. После этого было подготовлено три вида образцов: плазма крови, форменные элементы крови и неразделенная кровь. Каждый образец был нанесен на металлическую подложку, которая выступала нижним электродом. Верхним электродом выступала металлическая игла, опущенная в образец. Толщина слоя крови составила 50–100 нм. Далее проводились измерения электрических характеристик образцов.

На образцах с плазмой крови и форменными элементами эффекта резистивного переключения не наблюдалось. При исследовании образцов с неразделенной кровью были получены вольт-амперные характеристики, которые демонстрируют классическое биполярное резистивное переключение.

На следующем этапе проводилось исследование влияния коротковолнового ультрафиолетового облучения на проводимость крови в горизонтальном электрическом поле. Длина волны облучения составляла 253 нм. По результатам исследований было обнаружено, что проводимость форменных элементов крови и плазмы не изменялась при облучении ультрафиолетом, в то время как значения проводимости неразделенной крови увеличивались от 3 до 100 раз. Необходимо отметить,

что облучение с большей длиной волны вплоть до видимого света не приводило к изменению проводимости.

Для изучения механизмов резистивного переключения необходимы дальнейшие исследования.

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

1) по итогам исследований было обнаружено, что человеческая кровь обладает эффектом резистивного переключения;
2) обнаружено, что человеческая кровь при облучении в коротковолновом диапазоне приводит к изменению проводимости, что может использоваться для изготовления солнечного «слепого» детектора.

Литература

1. Niloufar R. H., Lee J. S. Resistive switching memory using biomaterials // Journal of Electroceramics, 2017. Vol. 39. P. 223–238.
2. Wang H. et al. Resistive switching memory devices based on proteins // Adv. Mater., 2015. 27 (46). P. 7670–7676.

УДК 681.586.74

Исследование газочувствительных характеристик пленок нанокомпозитов на основе различных полимерных матриц с добавлением углеродных нанотрубок

Горшкова А. С., Павлова А. С.
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
443086, г. Самара, Московское ш., 34
asmoskal@yandex.ru

В данной работе исследовались методы формирования пленок нанокомпозитов на основе силиконовой резины, фотополимерной смолы с добавлением углеродных нанотрубок и применение данных структур для детектирования газа NO_2.
Ключевые слова: углеродные нанотрубки (УНТ); газовые сенсоры; полимерные нанокомпозиты.

Цель исследования заключалась в проверке возможности использования данных матриц для улучшения гидрофобных свойств чувствительного слоя, а также для увеличения влагостойкости материала. В качестве метода формирования чувствительного элемента сенсоров было предложено использовать метод центрифугирования для получения равномерного пленочного покрытия [1].

Общая методика изготовления нанокомпозитов заключалась в следующем: производится обработка УНТ в полимерной матрице с помощью агатовой ступки для обеспечения равномерного распределения. Далее проводится нанесение пленки на поверхность стекла с помощью центрифугирования. Затем в случае силиконовой резины субстанция переносится методом штампа на поверхность заранее подготовленной полимеризованной силиконовой резины для полимеризации (ввиду недостаточного количества активных центров и сниженной вязкости субстанции), а в случае с фотополимерной смолой образец подвергается УФ-облучению.

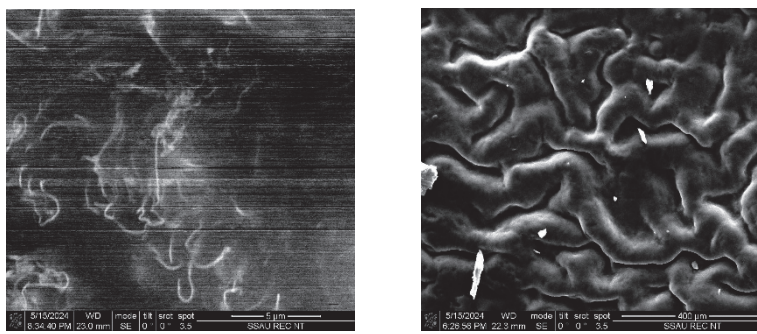


Рис. 1. Фотографии нанокомпозитов УНТ в силиконовой (слева) и фотополимерной (справа) матрицах, выполненные с помощью сканирующей электронной микроскопии

Для исследования газочувствительных характеристик образцы были проверены в диапазоне концентраций 20–70 ppm для газа NO_2.

Для сенсоров на основе силиконовой резины было исследовано восстановление сенсора без и с применением УФ-излучения. Применение УФ-излучения для восстановления сенсора на фотополимерной матрице оказалось неэффективно, поскольку фотополимерная матрица чувствительна к УФ-излучению.

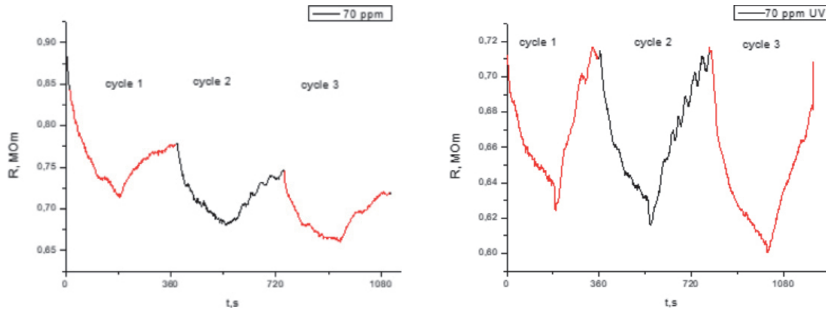


Рис. 2. Зависимость сопротивления сенсора на основе силиконовой матрицы с добавлением УНТ по времени от подачи газа NO_2 70 ppm с восстановлением в течение 3 минут в атмосфере воздуха без применения (слева) и с применением (справа) УФ-излучения

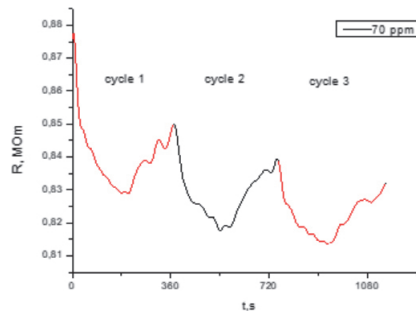


Рис. 3. Зависимость сопротивления сенсора на основе фотополимерной матрицы с добавлением УНТ по времени от подачи газа NO_2 70 ppm с восстановлением в течение 3 минут в атмосфере воздуха

Сенсоры на основе силиконовой резины показывают лучшие газочувствительные характеристики по сравнению с фотополимерной матрицей.

Процент восстановления данных сенсоров в атмосфере воздухе за 3 мин. увеличивается при возрастании концентрации газа, что обусловлено осаждением большего количества адсорбированных молекул газа на поверхности сенсора, а не в объеме нанокомпозита.

В сенсорах на основе фотополимерной смолы при больших концентрациях наблюдаются одинаковые значения отклика, что свидетельствует о достижении предела емкости чувствительного слоя данного сенсора.

Применение нековалентной функционализации УНТ (в частности ионной жидкости) для данных сенсоров привело к увеличению дрейфа сопротивления с амплитудой ~30 % от значения отклика, что может свидетельствовать об увеличении расстояния между нанотрубками в объеме пленки на основе фотополимерной и силиконовой матриц.

Литература

1. Rana M. M., Ibrahim D. S., Mohd Asyraf M. R., Jarin S. and Tomal A. A review on recent advances of CNTs as gas sensors // Sensor Review, 2017. Vol. 37. № 2. P. 127–136.

УДК 546.26 — 537.226.86

Исследование процесса генерации тока при деформации легированных азотом углеродных нанотрубок для разработки автономных датчиков деформации

Соболева О. И.[1], Ильина М. В.[2], к. т. н., Ильин О. И.[1], к. т. н.
[1] Южный федеральный университет,
Научно-исследовательская лаборатория
технологии функциональных наноматериалов
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
osotova@sfedu.ru
[2] Южный федеральный университет,
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2

Представлены результаты исследования влияния аспектного отношения легированных азотом углеродных нанотрубок (N-УНТ) на величину тока, генерируемого при их деформации. Показано, что с изменением аспектного отношения N-УНТ от 10,9 до 45 величина тока изменяется от 4 до 6,8 мкА при силе прижима 10,5 мкН.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; легирование азотом; датчики деформации; пьезоэлектричество; автономность; интеллектуальные сенсоры.

Активное развитие области носимой электроники привело к необходимости разработки различных миниатюрных датчиков для реализации интерфейсов человек — машина [1], применения в медицине и робототехнике [2]. Наиболее перспективными в данной области показали себя пьезоэлектрические датчики, но все еще идет поиск функциональных материалов. Легированные азотом углеродные нанотрубки (N-УНТ) из-за их аномальных пьезоэлектрических свойств [3, 4], высокой проводимости и гибкости являются перспективным материалом для создания на их основе устройств пьезотроники, в частности датчиков деформации. Целью данной работы является исследование влияния аспектного отношения (АО) длины к диаметру N-УНТ на величину тока, генерируемого при деформации под действием внешней силы.

Эксперименты проводились на массивах N-УНТ, выращенных методом плазмохимического осаждения из газовой фазы на проводящем подслое Mo. Значения АО N-УНТ составляли от 10,9 до 45 и достигались путем изменения параметров роста. Так, температура роста и соотношение технологических газов C_2H_2 и NH_3 изменялись от 500 до 600 °C и от 1:2 до 1:5. Геометрические параметры массивов N-УНТ определялись при помощи растрового электронного микроскопа. Исследование величины тока, генерируемого при деформации N-УНТ, проводилось при помощи силовой спектроскопии атомно-силовой микроскопии (АСМ). После сканирования массива в полуконтактном режиме АСМ-зонд подводился к вершине N-УНТ в контакт, в систему «АСМ-зонд — N-УНТ — проводящий подслой» подавалось напряжение от 0 до 0,2 В и АСМ-зонд давил на вершину N-УНТ с силой от 0,5 до 10,5 мкН. Величина генерируемого тока детектировалась встроенным осциллографом. Сопротивление нагрузки составляло около 10 МОм.

Анализ полученных результатов показал, что без подачи внешнего напряжения смещения величина тока, генерируемого под действием пьезоэлектрического потенциала деформированных N-УНТ, увеличивалась от единиц пА до единиц нА при приложении на АСМ-зонд силы от 0,5 до 2,5 мкН. Этот факт подтверждает возможность автономной работы датчиков деформации на основе массива N-УНТ. При этом с увеличением АО N-УНТ величина генерируемого тока изменялась нелинейно от 0,04 до 2,55 нА и наибольшие значения тока были получены при АО N-УНТ, равном 31,8. С увеличением силы прижима до 10,5 мкН величина генерируемого тока достигала 18,3 нА для N-УНТ с АО 45. При подаче внешнего напряжения смещения 0,2 В величина детектируемого тока увеличивалась до сотен нА. При этом максимальное значение детектируемого тока наблюдалось для N-УНТ с АО, равном 17,5, а величина тока достигала 6,8 мкА при силе 10,5 мкН. Данная зависимость генерируемого тока от АО N-УНТ обусловлена изменением величины их пьезоэлектрического модуля [5] и относительной деформации при приложении заданной силы.

Таким образом, показано, что N-УНТ являются перспективным материалом для создания на их основе пьезоэлектрических датчиков деформации с возможностью автономной работы.

Исследование выполнено за счет гранта «УМНИК» (очередь-II), договор 20ГУЭС18/91357. Отработка режимов роста N-УНТ с заданными параметрами выполнена за счет гранта РНФ № 22-79-10163.

Литература

1. Petronienė J. J. et al. Flexible strain sensors: Recent progress 2016-2023 // Sensors Actuators A Phys. Elsevier, 2024. Vol. 366. P. 114950.
2. Hu J. et al. Recent progress in flexible micro-pressure sensors for wearable health monitoring // Nanoscale Adv. Royal Society of Chemistry, 2023. Vol. 5. № 12. P. 3131–3145.
3. Il'ina M. V. 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.
4. Il'ina M. V. et al. Anomalous piezoelectricity and conductivity in aligned carbon nanotubes // J. Mater. Chem. C, 2021. Vol. 9. № 18. P. 6014–6021.
5. Il'ina M. V. et al. Study of the Piezoelectric Properties of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes for the Development of Energy-Efficient Nanogenerators // Nanobiotechnology Reports, 2023. Vol. 18. № 6. P. 858–864.

УДК 621.383

Синтез и функционализация TiS_3 для применения в гибких ИК-детекторах

Рымжина А. Р., д. ф.-м. н. Павельев В. С., Ph.D Трипати Нишант
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
443086, г. Самара, Московское ш., 34
nastya.rymzhina.98@mail.ru

Проанализирован гибкий фотодетектор на основе нанолент TiS_3, функционализированных нитратом серебра. Характеристики фотодетектора определены при освещении лазерным излучением с длиной волны 1064 нм.
Ключевые слова: фотодетектор; трихалькогениды переходных металлов; наноленты TiS_3; инфракрасное излучение; функционализация.

Сегодня потребность в гибких фотодетекторах стремительно растет [1]. Большинство известных материалов для них имеют ограниченный диапазон спектральной чувствительности (<1 мкм), низкую скорость отклика и восстановления, что затрудняет их применение на практике [2].

Чтобы преодолеть данные проблемы, необходимо исследовать новые чувствительные материалы, одним из которых является трисульфид титана (TiS_3), вызвавший интерес рядом преимуществ перед другими материалами [3].

В данной работе анализируется гибкий фотодетектор на основе нанолент TiS_3, функционализированных нитратом серебра ($AgNO_3$) и осажденных между контактами на гибкой подложке из полиэтилентерефталата (ПЭТ). Характеристики фотодетектора определялись при его взаимодействии с излучением лазера с перестраиваемой мощностью ($\lambda = 1064$ нм).

Разработанный фотодетектор демонстрирует времена отклика и восстановления соответственно 3,09 и 1,73 с. При напряжении смещения 10 В и плотности мощности излучения 150 мВ/см^2 рассматриваемый фотодетектор демонстрирует фототок ≈32,63 нА, фоточувствительность 205 Вт/А, квантовую эффективность 240 А/Вт·нм и обнаружительную способность $2{,}46 \cdot 10^{10}$ Джонс. Разработанный фотодетектор обладает конкурентоспособными характеристиками и может использоваться в сферах, не требующих быстрого срабатывания.

Литература

6. Segev-Bar M., Haick H. Flexible sensors based on nanoparticles // ACS Nano, 2013. Vol. 7. № 7 (10). P. 8366–8378.
7. Rymzhina A., Sharma P., Pavelyev V., Mishra P., Tripathi N. Recent trends in the fabrication of photodetectors: A detailed analysis on the photodetection properties of new 2D-TMCs // Materials Today Communications, 2023. Vol. 35. P. 106247.
8. Tripathi N., Pavelyev V., Sharma P., Kumar S., Rymzhina A., Mishra P. Review of titanium trisulfide (TiS_3): A novel material for next generation electronic and optical devices // Materials Science in Semiconductor Processing, 2021. Vol. 127. P. 105699.

УДК 537.311.322

Влияние отжига на электрофизические параметры аморфных пленок системы $GeTe\text{-}Sb_2Te_3$

Трусов Е. П., Ермачихин А. В., Литвинов В. Г.
Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1
eptrusov@yandex.ru

Выполнено исследование электрофизических параметров аморфных пленок халькогенидных полупроводников пяти составов по линии квазибинарного разреза $GeTe\text{-}Sb_2Te_3$ в широком температурном диапазоне температурного диапазона. Показано влияние отжига на характеристики тонких аморфных пленок. Приведены временные зависимости энергии активации проводимости, удельного сопротивления.

Ключевые слова: фазовая память; халькогениды; GST; температурное сканирование; электрофизические свойства; энергия активации проводимости; дрейф сопротивления.

На сегодняшний день материалы с фазовым переходом являются важным компонентом существующих и разрабатываемых технологий. Такие материалы обширно изучаются и широко используются в оптической памяти и энергонезависимой электрической памяти (PCM). Фазопеременные материалы могут быть использованы для производства гибких оптических дисплеев с высоким разрешением, интегральной энергонезависимой фотонной памяти, модуляторов и поглотителей излучения в ближней инфракрасной области спектра.

В работе рассмотрены параметры: энергия активации проводимости, дрейф сопротивления, положения уровня Ферми, удельное сопротивление. Исследования проводились в вакууме, при температурах от –150 до 50 °C для материалов $Ge_2Sb_2Te_5$, $GeSb_2Te_4$, $GeSb_4Te_7$, GeTe, Sb_2Te_3. Время между операциями напыления, измерения, отжига для материалов всех составов выдерживалось одинаковым. Хранение образцов между операциями осуществлялось в пластмассовых кейсах, исключающих воздействие света. Отжиг выполнялся при температурах 80 и 100 °C и завершался температурным сканированием проводимости.

На основе данных, полученных при температурном сканировании материалов квазибинарного разреза $GeTe\text{-}Sb_2Te_3$, выполнена оценка тенденции изменения электрофизических свойств этих сплавов в результате снижения концентрации Ge и увеличения концентрации Sb. Полученные результаты позволяют по-новому взглянуть на влияние Ge и Sb на электрические свойства таких соединений и на потенциальное использование семейства этих пленок GST в различных устройствах.

Температурные зависимости энергии активации проводимости и удельного сопротивления для всех составов показывают одинаковую тенденцию. Однако временная зависимость электрофизических характеристик при отжиге или естественном старении для различных материалов имеет существенные различия. Увеличение концентрации Sb способствует изменению влияния отжига на энергию активации проводимости, положение уровня Ферми, удельное сопротивление, дрейф сопротивления.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке FSSN-2020-0003 с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В. Ф. Уткина.

УДК 621.3.049

Система со взаимодействием Дзялошинского — Мория и SOT-эффектом

Турпак А. А., Базров М. А., Кузнецова М. А., Намсараев Ж. Ж., Черноусов Н. Н., к. ф.-м. н., Козлов А. Г., к. ф.-м. н., Давыденко А. В.
ДВФУ, Лаборатория пленочных технологий
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
turpak.aa@dvfu.ru

Получена магнитная структура со взаимодействием Дзялошинского — Мория и SOT-эффектом на основе переходных металлов W и Pt. Описан способ получения и исследования образцов.
Ключевые слова: взаимодействие Дзялошинского — Мория; SOT-эффект; доменная граница.

Известно, что переходные металлы W и Pt обладают разными коэффициентами спинового угла Холла [1], и поэтому эффективность передачи углового момента от кристаллической решетки тяжелых переходных металлов в магнитный слой с помощью электронов проводимости (Spin Orbit Torque или SOT-эффект) в этих многослойных структурах может стать нулевой при определенном сочетании толщин W/Pt. Мы исследовали взаимодействие Дзялошинского — Мория (ВДМ) по динамике доменных границ (ДГ) под действием комбинации внешних магнитных полей, а также SOT-эффект с помощью измерения сдвига петель гистерезиса, вызванного током, в многослойных структурах W/Pt/Co/Pt.

Исследование динамики ДГ происходило следующим образом: под действием перпендикулярного магнитного поля зарождался домен, который рос изотропно. При одновременном включении продольного поля, направленного слева направо, и перпендикулярного магнитного поля домен преимущественно начинал расти вправо. Продольное поле нарушало симметрию роста домена. Измерялось расстояние, на которое смещалась ДГ, за время включения магнитных полей. Скорость ДГ определялась как отношение расстояния, пройденного ДГ, к времени включения импульса магнитных полей. Были проанализированы зависимости скорости ДГ от величин продольного и перпендикулярного магнитных полей.

При пропускании зарядового тока через структуру образца генерируется спиновый ток, перпендикулярный плоскости структур и направлению протекания зарядового тока. В результате возникает SOT-эффект, который индуцирует эффективное магнитное поле в магнитном слое и приводит к сдвигу магнитных петель гистерезиса вдоль оси магнитных полей. Путем анализа величин сдвига петель магнитного гистерезиса в зависимости от плотности пропускаемого зарядового тока была определена SOT-эффективность в исследуемых структурах.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России по государственному заданию (проект № FZNS-2023-0012).

Литература

1. Tsung-Yi Chen et al. Current-induced spin–orbit torque efficiencies in W/Pt/Co/Pt heterostructures // Applied Physics Letters, 2020. Vol. 116. P. 072405.

УДК 621.382.33

Особенности формирования омического контакта к p+-GaAs-базе гетеробиполярного транзистора на основе гетероперехода InGaP/GaAs

Захаров С. И., Захарова Н. Ю., Козловский Э. Ю.
ЗАО «НПП «Планета-Аргалл»
173004, г. Великий Новгород, ул. Федоровский ручей, 2/13
argall@argall.nov.ru

В данной работе рассмотрены особенности выбора системы металлизации для формирования омического контакта к p+-GaAs-базе ГБТ. Опробованы четыре системы омических контактов: Pd/Ge/Ti/Au, Ni/Pd/Au, Pd/Ti/Pd/Au, Ni/Ti/Pt/Ti/Au. Выбрана оптимальная система металлизации для формирования омического контакта к p+-GaAs-базе ГБТ.

Ключевые слова: ГБТ; омический контакт; метод длинной линии (МДЛ).

Омические контакты к p+-GaAs с низким контактным сопротивлением необходимы для изготовления СВЧ ГБТ на основе GaAs с высокими значениями граничной частоты f_t и максимальной частоты генерации f_{max}. Однако технология изготовления таких транзисторов вносит некоторые ограничения для выбора систем металлизаций для создания омического контакта. Во-первых, для уменьшения сопротивления базы ГБТ и, следовательно, увеличения коэффициента передачи базовый слой делают максимально тонким, что исключает использование «сплавных» омических контактов. Во-вторых, формирование коллекторного омического контакта происходит после базового, поэтому отжиг базового омического контакта должен производиться при тех же (или более высокотемпературных) условиях, что и отжиг коллекторного контакта на основе AuGe/Ni/Au, т.е. базовый контакт не должен деградировать в условиях отжига коллекторного контакта.

Принимая во внимание ограничения, накладываемые конструкцией и технологией изготовления ГБТ, опробованы четыре системы омических контактов Pd/Ge/Ti/Au (20/30/10/100 нм), Ni/Pd/Au (50/50/100 нм), Pd/Ti/Pd/Au (20/20/20/100), Ni/Ti/Pt/Ti/Au (5/5/5/30/100 нм). Приведены значения удельных контактных сопротивлений, полученные на образцах ГБТ, отмечены преимущества и недостатки используемых систем металлизации.

Экспериментально подобрана система металлизации Ni/Ti/Pt/Ti/Au (5/5/5/30/100 нм) с низким контактным сопротивлением и высокой термостабильностью.

Исследования проводились в процессе разработки ГБТ, технология изготовления которого может быть использована для изготовления СВЧ МИС ГУН с малыми фазовыми шумами.

УДК 538.935

Эффект Аронова — Альтшулера — Спивака и характерный размер неоднородностей интерфейса гетероструктур AlGaN/AlN/GaN

Колобкова Е. М.[1], Андреев А. А.[1], к. ф.-м. н. Белов И. В.[1], к. ф.-м. н. Валеев В. Г.[1], Грищенко Ю. В.[1], к. ф.-м. н. Давыдов А. Б.[2], Езубченко И. С.[1], Куликов И. В.[1], к. ф.-м. н. Моргун Л. А.[2], к. ф.-м. н. Николаев С. Н.[1], Перминов П. А.[1], к. ф.-м. н. Черных И. А.[1], к. ф.-м. н. Чумаков Н. К.[1], Шабанов С. Ю.[1], к. ф.-м. н. Занавескин М. Л.[1]

[1] Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
kolobkovaevg@gmail.com
[2] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

Структура конфайнмента двумерного электронного газа (2DEG) нитридных транзисторов с высокой подвижностью электронов, синтезированных по технологии, разработанной в НИЦ КИ, исследована посредством электрофизических экспериментов на основе анализа параметров осцилляций магнитосопротивления 2DEG, обусловленных эффектом Аронова — Альтшулера — Спивака.

Ключевые слова: GaN HEMT; нитридные гетероструктуры; эффект Аронова — Альтшулера — Спивака.

В работе [1] создана новая технология фабрикации нитридных транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) для силовой и СВЧ электроники. Она позволяет получить гетероструктуры с 2DEG приборного качества, понизить температуру активной области более чем на 50 °C по сравнению с аналогами на подложках карбида кремния и состоит в формировании уникальных составных подложек поликристаллического алмаза с тонким слоем монокристаллического кремния Si (111) и последующем синтезе GaN-гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Однако контроль качества рабочего интерфейса таких структур посредством атомно-силовой микроскопии (АСМ) весьма затруднителен ввиду относительно большого и априори не всегда известного диапазона характерных размеров дефектов, возникающих в нем в процессе роста.

В настоящей работе продемонстрированы диагностические возможности метода исследования особенностей потенциала конфайнмента 2DEG нитридных HEMT, основанные на анализе результатов наблюдения осцилляций Аронова — Альтшулера — Спивака (ААС) [2] в магнитосопротивлении 2DEG в широком диапазоне магнитных полей. Показано, что описанный здесь метод позволяет определить характерные масштабы сложной структуры дефектов вблизи интерфейса, согласующиеся с результатами АСМ, и служит полезным дополнением к атомно-силовой технологии характеризации поверхности.

Магнитотранспортные исследования системы проведены в интервале температур 100 мК — 300 К и магнитных полях B до 14 Тл, приложенных перпендикулярно плоскости 2DEG. В области слабой локализации (WL) обнаружено

отрицательное низкотемпературное магнитосопротивление величиной порядка 1 %, переход от слабой WAL к WL имеет место при B ≈ 0,005 Тл. Осцилляции магнитосопротивления 2DEG с периодом h/2e, обусловленные эффектом AAC, отчетливо наблюдаются на фоне его плавного поведения. Эти осцилляции — результат интерференции волновых функций носителей заряда на траекториях, связанных друг с другом обращением времени. Они позволяют связать структуру AlN/GaN интерфейса HEMT в реальном пространстве с неоднородностью конфайнмента 2DEG вблизи него и оценить характерные размеры этой неоднородности.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 23-29-00536.

Литература

1. Chernykh M. Y., Andreev A. A., Ezubchenko I. S. et al. GaN-based heterostructures with CVD diamond heat sinks: A new fabrication approach towards efficient electronic devices // Appl. Mater. Today, 2022. Vol. 26. P. 101338.
2. Альтшулер Б. Л., Аронов А. Г., Спивак Б. З. Эффект Аронова — Бома в неупорядоченных проводниках // Письма в ЖЭТФ, 1981. — Т. 33 (2). — С. 101–103.

УДК 53.06

Исследование процессов многофиламентарного переключения в ячейках RRAM

Федотов М. И.[1,2,5], Ванькаев А. С.[3], Клюкина Е. В.[4], к. ф.-м. н. Ковешников С. В.[5]

[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
[4] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
[5] Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

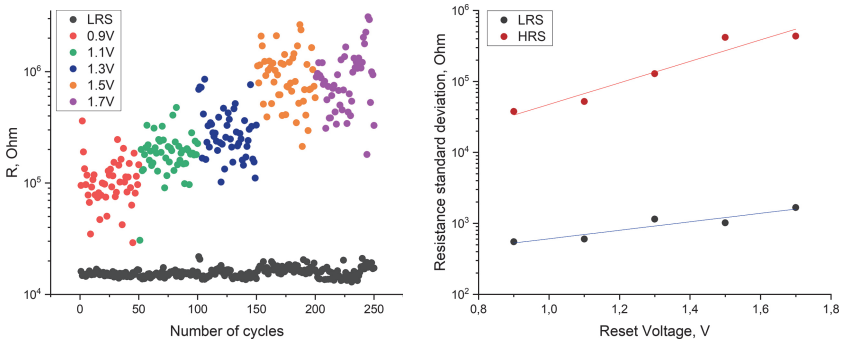
Проведено экспериментальное исследование процессов переключения в резистивной памяти на основе оксидов переходных металлов (HfOx, TiOx). Получены экспериментальные зависимости разброса сопротивления в высокоомном состоянии от максимального напряжения, а также исследованы процессы плавного перехода из низкоомного в высокоомное состояние. Разработана физическая модель многофиламентного переключения, объясняющая полученные экспериментальные данные.

Ключевые слова: RRAM; проводящий филамент; оксид гафния; оксид титана; нейроморфные системы.

Одним из перспективных вариантов компонентой базы для аналоговых нейроморфных систем является резистивная память (RRAM) [1]. Ключевое преимущество RRAM — возможность многоуровневого переключения за счет плавного перехода из высокоомного (HRS) в низкоомное (LRS) состояние [2]. Однако, несмотря на прогресс в разработке многоуровневых элементов резистивной памяти на основе оксидов металлов, их практическое использование ограничено рядом нерешенных проблем [3]. Одной из них является невоспроизводимость сопротивления в HRS, что ограничивает число практически достижимых логических состояний. Решение данной проблемы невозможно без понимания физического механизма резистивного переключения.

В рамках данной работы мы провели исследования ячеек RRAM на основе двух оксидов переходных металлов — HfOx и TiOx. В ячейках RRAM на основе оксида гафния исследовалась невоспроизводимость сопротивления в низко- и высокоомном состояниях в зависимости от максимального напряжения в режиме Reset (рис. 1), в то время как в ячейках RRAM на основе оксида гафния оксида титана изучался процесс плавного Reset (рис. 3). Для объяснения полученных результатов нами разработана модель многофиламентного резистивного переключения. Мы предположили, что в одной ячейке RRAM может формироваться не один,

а сразу несколько проводящих филаментов различной длины. В зависимости от соотношения длин филаментов разработанная нами модель позволяет объяснить и невоспроизводимость сопротивления в высокоомном состоянии (рис. 2), и эффект плавного переключения в режиме Reset (рис. 3).



а *б*

Рис. 1. Разброс сопротивления ячейки HfOx RRAM в низкоомном и пяти высокоомных состояниях (*а*); стандартное отклонение сопротивления в высокоомном состоянии при разных напряжениях в Reset (*б*)

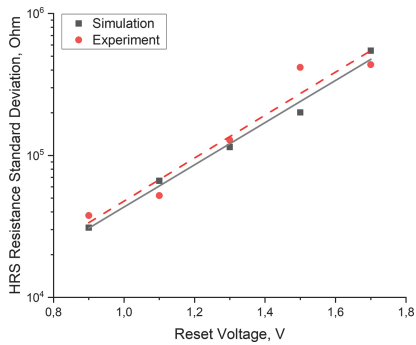
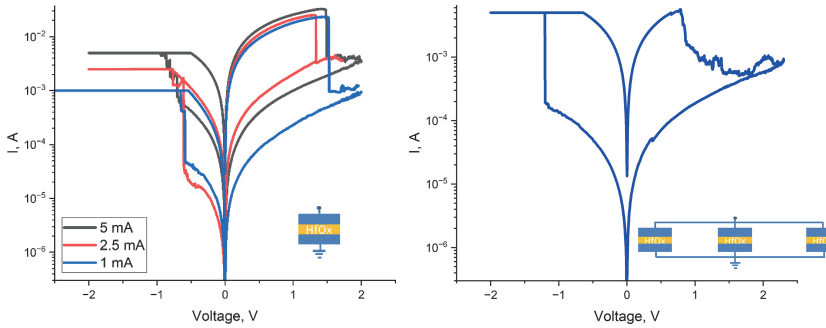


Рис. 2. Сравнение экспериментально измеренной и смоделированной зависимости стандартного отклонеия сопротивления ячейки HfOx RRAM в HRS от напряжения в Reset

Результаты нашей работы показывают, что наличие многих филаментов в ячейке RRAM является преимуществом, а не недостатком, так как обеспечивает плавный Reset и достижение надежных промежуточных резистивных состояний. Матрицы RRAM с многоуровневым переключением позволят создать качественно новые аналоговые нейроморфные вычислительные системы, способные в будущем значительно превзойти цифровые нейросети по производительности.



а *б*

Рис. 3. ВАХ трех однофиламентных ячеек TiOx RRAM при различных максимальных токах (*а*); ВАХ тех же ячеек, соединенных параллельно (*б*)

Литература

1. Zhuk M., Zarubin S., Zenkevich A., Karateev I., Matveyev Y., Gornev E., Krasnikov G., Negrov D. On-Chip TaOx-Based Non-volatile Resistive Memory for in vitro Neurointerfaces // Frontiers in Neuroscience, 2020. Vol. 14. № APR. P. 94.
2. Sarkar B., Lee B. and Misra V. Understanding the gradual reset in Pt/Al2O3/Ni RRAM for synaptic applications // Semiconductor Science Technology, 2015. Vol. 30. № 10.
3. Fedotov M. I., Korotitsky V. I. and Koveshnikov S. V. Experimental and Theoretical Study of Intrinsic Variability in Hafnium Oxide Based RRAM // 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2021. P. 26–32.

УДК 538.975

Мемристоры на основе HfO_2 и миграции ионов Ag

Жидков Н. С., Ханас А., к. ф.-м. н., Р., Зенкевич А. В., к. ф.-м. н.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассматриваются мемристоры с резистивными переключениями на основе миграции ионов серебра в слое из HfO_2. Исследуются параметры материалов, приводящие к энергонезависимым и энергозависимым переключениям. Предложен способ низкотемпературного синтеза наночастиц Ag для улучшения параметров резистивно переключающихся ячеек.
Ключевые слова: мемристор; оксид гафния; резистивные переключения; нейроморфные вычисления.

Нейроморфные системы — одна из перспективных вычислительных концепций, которые могут решить проблемы традиционной фон-неймановской архитектуры. Одним из важных направлений их развития является разработка нейроморфной элементной базы, т. е. масштабируемых микроэлектронных устройств, эмулирующих функциональность нейронов и синапсов мозга. Использование мемристоров (элементов с переменным сопротивлением, осуществляемым эффектом обратимого резистивного переключения) является одним из наиболее перспективных способов реализации таких устройств.

Среди многочисленных материалов и механизмов для резистивных переключений выделяется миграция ионов серебра в функциональном диэлектрическом слое HfO_2. Встречаются как энергонезависимые (долговременные), так и энергозависимые (пороговые) ячейки на основе сплошных пленок [1], а также на основе нанокластеров Ag [2]. Последний подход существенно улучшает параметры резистивных переключений ячеек, однако для его реализации обычно требуются высокие температуры, что может быть нежелательно при дальнейшем производстве СБИС по этой технологии. В данной работе предлагается использовать метод импульсного лазерного осаждения (ИЛО) наночастиц Ag при низких температурах для создания мемристоров на основе HfO_2.

Изготовлены структуры TiN/$Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ (HZO)/Ag/Pt, в которых слой нижнего электрода TiN и аморфный слой HZO (толщиной 10 нм) были сформированы методом атомно-слоевого осаждения. Слои Ag и Pt были сформированы методом ИЛО, из-за особенностей которого на поверхности HZO образовывались нанокластеры Ag с линейными размерами до нескольких десятков нанометров. В работе исследуются различные режимы резистивных переключений в зависимости от методологии изготовления устройств.

Литература

1. Midya R. et al. Anatomy of Ag/Hafnia-Based Selectors with 10^{10} Nonlinearity // Advanced Materials, 2017. 29, 1604457.
2. Li Y. et al. High-Uniformity Threshold Switching HfO_2-Based Selectors with Patterned Ag Nanodots // Advanced Science, 2020. 7, 2002251.

УДК 538.9

Магнитоплазменные колебания в сильноэкранированных прямоугольных двумерных электронных системах

Родионов Д. А.[1,2], Загороднев И. В.[1]
[1] ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В работе исследованы свойства собственных магнитоплазменных колебаний в сильноэкранированной двумерной электронной системе в форме прямоугольника. Оказалось, что в сильных магнитных полях частота всех плазменных мод стремится к нулю обратно пропорционально его величине, чего не наблюдается в других геометриях, таких как полоса, диск или полуплоскость. Также показано, что динамика магнитоплазменных колебаний в рассматриваемых системах аналогична динамике ротационно-гравитационных волн на мелкой воде в бассейне той же геометрии.

Ключевые слова: двумерные электронные системы; плазменные колебания; ротационно-гравитационные волны на мелкой воде.

Одной из важных фундаментальных задач в области физики конденсированного состояния является исследование свойств коллективных колебаний носителей заряда — плазменных колебаний или плазмонов — в двумерных электронных системах в связи с перспективами их возможного применения в области обнаружения и генерации терагерцевого излучения. Так, в недавней работе [1] экспериментально изучались плазменные колебания в квадратных двумерных электронных системах, в частности зависимость их частоты от внешнего магнитного поля (магнитодисперсия).

В нашей теоретической работе [2] исследуются свойства собственных магнитоплазменных колебаний в прямоугольном двумерном электронном газе, помещенном в постоянное однородное магнитное поле, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости электронного газа. Электронная система находится вблизи идеально проводящей бесконечной металлической пластины (затвора). Задача решалась в пределе сильной экранировки, т. е. рассматривался случай малости расстояния между электронным газом и металлом по сравнению с размерами прямоугольника и длинами волн изучаемых плазменных колебаний.

Как и в работе [1], наблюдается «расталкивание» магнитодисперсии некоторых плазменных колебаний. Кроме этого, частоты всех плазменных мод в сильных магнитных полях стремятся к нулю, включая фундаментальную, т. е. нижайшую по частоте. Это отличается от известного поведения магнитодисперсии фундаментальной моды, являющейся краевым магнитоплазмоном, в других геометриях, таких как диск, полоса или полуплоскость [3], где частота принимает ненулевое асимптотическое значение. Установлено, что в сильных магнитных полях частоты всех мод обратно пропорциональны циклотронной частоте. В случае квадратной геометрии найдены аналитические аппроксимации частоты нижайших плазменных мод, в том числе в области больших магнитных полей.

Также показано, что магнитоплазменные колебания в латерально ограниченных двумерных электронных системах имеют схожие свойства с волнами на мелкой воде, подверженной воздействию силы Кориолиса, в бассейне той же геометрии. Отметим, что наблюдаемое сходство полностью верно для линейных волн. Вероятно, оно может быть распространено и на нелинейные волны, однако неполностью. Так, например, в гидродинамике существует эффект опрокидывания волны, когда у нее возникает гребень. В электродинамике такое невозможно, поскольку аналогичный гребень у плотности заряда привел бы к неоднозначности порождаемого ею потенциала в каждой точке пространства.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Родионов Д. А. благодарит Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант № 21-1-5-133-1).

Литература

1. Zarezin A. M., Mylnikov D., Petrov A. S., Svintsov D., Gusikhin P. A., Kukushkin I. V., Muravev V. M. Plasmons in a square of two-dimensional electrons // Physical Review B, 2023. Vol. 107. P. 075414.
2. Rodionov D. A., Zagorodnev I. V. Fully screened two-dimensional magnetoplasmons and rotational gravity shallow water waves in a rectangle // Physical Review B, 2024. Vol. 109. P. L241402.
3. Zagorodnev I. V., Zabolotnykh A. A., Rodionov D. A., Volko V. A. Two-Dimensional Plasmons in Laterally Confined 2D Electron Systems // Nanomaterials, 2023. Vol. 13. P. 975.

УДК 535.015

Генерация второй гармоники и широкополосная фотолюминесценция в мезопористых наночастицах Si/SiO_2

Масталиева В. А.[1,2], Неплох В. В.[1,3], Айбуш А. В.[4], Макаров С. В.[5], Мухин И. С.[1,3,5]

[1] Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А
rebecconi@gmail.com
[2] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
[3] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
[4] Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук
119991, г. Москва, ул. Косыгина, 4, корп. 1
[5] Qingdao Innovation and Development Center, Harbin Engineering University Shandong, China

Преобразователи инфракрасного излучения в видимый диапазон востребованы при создании нелинейно-оптических устройств. В данной работе изучены нелинейно-оптические свойства монодисперсных сфер SiO_2 и Si/SiO_2, инкапсулированных в силиконовые пленки. Изготовленные два типа мембран, содержащие сферические наночастицы SiO_2 и Si/SiO_2, демонстрировали яркий сигнал генерации второй гармоники во всем видимом диапазоне.

Ключевые слова: генерация второй гармоники; кремний; наноструктуры; преобразователи ИК-излучения; мезопористые наночастицы.

Пористая структура кремния может обладать высокой удельной площадью поверхности, превышающей 100 $м^2/г$ [1]. В последние десятилетия это служит одной из причин активного изучения поверхностно-связанного эффекта генерации второй гармоники (ГВГ) в мезопористом кремнии [2]. Согласование электромагнитного поля при облучении накачки и генерируемой второй гармоники (ВГ) в наноразмерных резонаторах [3, 4] приводит к повышению эффективности преобразования и позволяет управлять оптическими свойствами системы [5].

В данной работе были исследованы образцы на стекле двух видов: мезопористые наночастицы Si/SiO_2 до и после отжига в инертной атмосфере при температуре 850 °C. Сферические мезопористые наночастицы Si/SiO_2 (мезо-Si/SiO_2 NPs) синтезированы в два этапа. На первом этапе были получены сферические частицы SiO_2 путем гидролиза тетраэтоксисилана в спирто-водно-аммиачной среде, содержащей цилиндрические мицеллы бромида цетилтриметиламмония в качестве порообразователя. Для удаления органических веществ полученные частицы были отожжены на воздухе при температуре 550 °C в течение 5 ч. Удельная площадь поверхности и объем пор синтезированных частиц составили 810 $м^2/г$ и 0,55 $см^3/г$ (около 50 % объема частиц) соответственно, а диаметр пор — около 3 нм [6]. На втором этапе для введения кремния в поры частиц SiO_2 использовался метод термического разложения моносилана. В результате получены сферические частицы SiO_2,

заполненные кремнием. Благодаря пористой структуре образцы обладают развитой поверхностью (до 300 $м^2/г$ [1]), что позволяет изучать оптические свойства поверхности кремния.

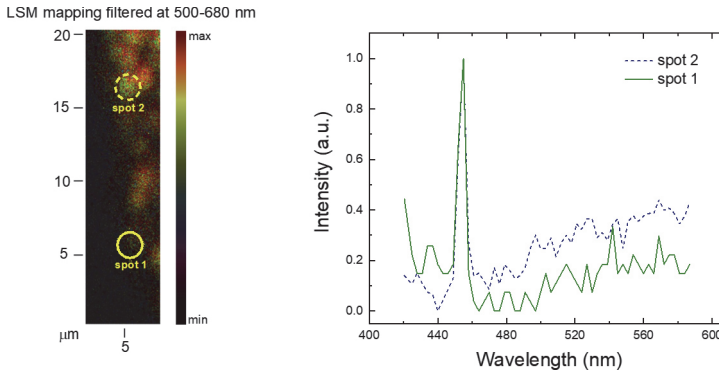


Рис. 1. ЛКСМ-карта слоя наночастиц Si/SiO_2 НЧ, интегрированная в спектральном диапазоне 500–680 нм, соответствующем сигналу ФЛ (*а*); соответствующие спектральные характеристики. Кружки на карте обозначают места получения спектров (*б*)

В работе проведено сравнение генерации второй гармоники в образцах наночастиц, в которых происходит изменение фазы кремния (из аморфного в нанокристаллический) в порах мезопористых наночастиц Si/SiO_2. В одном случае — из-за термического отжига в инертной атмосфере, в другом случае — в результате нагрева импульсами лазерного излучения (фемтосекундным лазером ИК-диапазона). Эти методы также усиливают вторую гармонику и фотолюминесцентный отклик. Полученные рамановские спектры подтвердили наличие кристаллической фазы Si, что проявилось в заметной узкой линии при 518,5 $см^{-1}$, соответствующей поперечной оптической фононной моде кристаллического Si. Сдвиг на 1,5 $см^{-1}$ относительно объемного c-Si 520 $см^{-1}$ соответствует nc-Si размером 5–10 нм в соответствии с ранее полученными нами результатами [1], что также коррелирует с данными, приведенными в литературе [7].

Для нелинейно-оптических измерений образцы из коллоида наночастиц наносились на предварительно очищенные закаленные кварцевые стекла. Исследования проводились с помощью установки лазерного конфокального сканирующего микроскопа (ЛКСМ) (LSM-980, Zeiss, Германия). Через порт внешнего акустооптического модулятора (АОМ) LSM подавались фемтосекундные лазерные импульсы (Discovery-NX, Coherent, США) с частотой повторения 80 МГц, длительностью 150 фс, диапазон длин волн излучения — 800–1020 нм. Оптимальной длиной волны для исследуемых образцов является диапазон 900–980 нм.

Таким образом, продемонстрирован метод формирования мезопористых кремниевых наноструктур для эффективной генерации второй гармоники и возможность контролируемого изменения фазы кремния с аморфной в нанокристаллическую со значительным увеличением эффективности ГВГ. Результаты могут быть использованы для создания преобразователей и визуализаторов ИК-излучения

в видимый диапазон, а также для проектирования фотонных платформ на основе кремниевых материалов.

Работа поддержана грантом РНФ № 23-79-00018 «Исследование нелинейных оптических свойств Si и гибридных SiO_2/Si-наноструктур для создания ИК-визуализаторов».

Литература

1. Kurdyukov D.A. et al. Fabrication of doxorubicin-loaded monodisperse spherical micro-mesoporous silicon particles for enhanced inhibition of cancer cell proliferation // Microporous and Mesoporous Materials, 2019. Vol. 281. P. 1–8.
2. Ha M. et al. Multicomponent plasmonic nanoparticles: from heterostructured nanoparticles to colloidal composite nanostructures // Chemical reviews, 2019. Vol. 119. № 24. P. 12208–12278.
3. Nikolaeva A. et al. Large-scale flexible membrane with resonant silicon nanowires for infrared visualization via efficient third harmonic generation // Applied Physics Letters, 2022. Vol. 120. № 15.
4. Fedorov V.V. et al. Gallium phosphide nanowires in a free-standing, flexibl. and semitransparent membrane for large-scale infrared-to-visible light conversion // ACS nano, 2020. Vol. 14. № 8. P. 10624–10632.
5. Rudenko A., Han A., Moloney J.V. Trade-Off between Second-and Third-Order Nonlinearities, Ultrafast Free Carrier Absorption and Material Damage in Silicon Nanoparticles // Advanced Optical Materials, 2023. Vol. 11. № 2. P. 2201654.
6. Trofimova E.Y. et al. Monodisperse spherical mesoporous silica particles: Fast synthesis procedure and fabrication of photonic-crystal films // Nanotechnology, 2013. Vol. 24. № 15. P. 155601.
7. Makarov S.V. et al. Nanoscale generation of white light for ultrabroadband nanospectroscopy // Nano letters, 2018. Vol. 18. № 1. P. 535–539.

УДК 543.424.2

Исследование влияния методов активации на структурные и электродинамические свойства ГКР активной пленки на основе Ag-Nb-N-O для фотонной сенсорики

Новиков Д. В.[1], к. т. н., Дубков С. В.[1], к. т. н., Лебедев Е. А.[1], Чумаченко Ю. В.[1], Громов В. Д.[1], Волкова Л. С.[2], Рязанов Р. М.[3]

[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
tororo@bk.ru
[2] Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук
119334, г. Москва, Ленинский просп., 32А
[3] Научно-производственный комплекс «Технологический центр» Московского института электронной техники
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

Разработана ГКР-подложка на основе тонкой многокомпонентной пленки Ag-Nb-N-O. Исследовано влияние методов экспресс-активации на морфологию поверхности и характеристики разработанной ГКР-подложки. Исследована устойчивость разработанной ГКР-подложки к длительному воздействию атмосферы.

Ключевые слова: ГКР-подложка; спектроскопия комбинационного рассеяния света; Ag; Nb; тонкая пленка; наночастицы.

Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР-спектроскопия) является перспективным методом анализа. Малые времязатраты на пробоподготовку и изучение образцов, высокая чувствительность и способность различать даже близкие по составу и структуре молекулы качественно выделяют ГКР-спектроскопию среди прочих методов качественного анализа. Ключевым элементом данного метода являются ГКР-подложки (сенсор), представляющие собой твердотельную пластину с массивом плазмонных наночастиц на поверхности. Эти же подложки являются основным недостатком данного метода, так как со временем наночастицы могут окисляться под действием атмосферы, что снижает чувствительность положки, либо поверхность сенсора покрывается адсорбированными из воздуха веществами, что значительно ухудшает качество дальнейшего анализа. Для решения данных проблем подложки могут вакуумироваться после иизготовления или химически обрабатываться перед измерением, что имеет свои недостатки. В данной работе был исследован иной подход к решению описанных проблем, заключающийся в формировании наночастиц из тонкой пленки (активации) непосредственно перед измерением за счет энергетического воздействия, что также позволяет удалить адсорбированные загрязнения.

В данной работе исследовалась ГКР-подложка на основе тонкой многокомпонентной пленки Ag-Nb-N-O. Формирование пленки производилось методом магнетронного распыления мишеней Nb и Ag в атмосфере Ar + об.10 % N_2 на монокристаллическую кремниевую подложку со слоем окисла 300 нм и частично пропиленной поверхностью, образующей прямоугольники длиной 26 мм и шириной 6 мм. Энергетическое воздействие осуществлялось двумя вариантами:

СВЧ-излучением мощностью 800 Вт в течение 15 секунд в бытовой микроволновой печи Samsung ME711KR; пропусканием тока порядка 280 мА в течение 1 минуты через подложку в гальваностатическом режиме.

Исследование ГКР-активности производилось с использованием растворов родамина 6G (R6G) концентрациями от 10^{-5} до 10^{-10} М. Измерения проводились при мощности лазера 44 мкВт, длине волны 532 нм, длительности измерения 1 секунда, диаметре пучка 1,5 мкм^2.

Установлено, что после изготовления в течение 20 дней часть серебра постепенно выделяется на поверхность подложки в виде разреженного массива полусферических многогранных наночастиц со средними диаметром 130 нм, расстоянием между частицами 500 нм и плотностью массива 5 мкм$^{-2}$. При этом исследование торца свежего скола ГКР-подложки показало, что основная масса Ag продолжает содержаться в объеме пленки.

Воздействие электрическим током порядка 280 мА в течение 1 минуты позволило сформировать массив полусферических наночастиц со средним диаметром 165 нм, расстоянием между частицами 138 нм и плотностью массива 14 мкм$^{-2}$. При этом подложка разогревалась до 280 °C, что с высокой долей вероятности удаляло адсорбированные вещества.

Влияние СВЧ-излучения в течение 15 секунд провоцировало формирование массива наночастиц сложной формы со средними диаметром и расстоянием между наночастицами 260 и 72 нм соответственно при плотности массива 12 мкм$^{-2}$. Ввиду невозможности определения температуры подложки непосредственно в момент активации, непосредственно после процесса был применен тепловизор, установивший температуру свыше 100 °C.

Дальнейший анализ ГКР-активности подложек показал, что активация электрическим током позволяет достичь коэффициента усиления порядка 10^5 и предела детектирования 10^{-8} М R6G. При этом активация подложки СВЧ-излучением позволила достичь коэффициента усиления порядка $8 \cdot 10^6$ и предела детектирования вещества 10^{-10} М. Отдельно стоит отметить, что перед активацией подложки хранились вне вакуума в течение 60 дней. При этом полученные спектры не демонстрировали присутствие посторонних веществ или следов углерода, характерные для органических соединений, подвергшихся неполному термическому разложению.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00610, https://rscf.ru/project/22-19-00654.

УДК 004.891.3:621.382.2/.3

Разработка системы автоматизированного подсчета полупроводниковых кристаллов VZOR

Сухомлинов Р. С., Васильченко Д. В., Ромащенко М. А.
Воронежский государственный технический университет
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
kipr@vorstu.com

Разработана система для автоматизированного подсчета годных кристаллов на полупроводниковых пластинах. В ее основе лежит система формирования цифрового изображения, которое далее анализируется с использованием нейронных сетей. Применение механической системы демпфирования обеспечивает равномерное распределение давления на пластину во время ее прижима к сканирующему устройству для формирования изображения.
Ключевые слова: электронный компонент; машинное зрение; дефектоскопия; оптическая инспекция; неразрушающий контроль.

В последние годы российская микроэлектронная промышленность сталкивается с серьезной проблемой отсутствия современного отечественного оборудования для производства микроэлектронных компонентов. Данная проблема негативно сказывается на развитии отрасли, делая ее зависимой от импортных технологий и комплектующих. В условиях нарастающих санкционных ограничений и политической нестабильности такая зависимость представляет помеху для устойчивого роста и технологической независимости страны.

Автоматизированная оптическая инспекция (АОИ) является важным элементом в производстве микроэлектроники. Она предоставляет точные методы контроля качества. Современные АОИ-системы заменяют человеческий глаз путем совмещения оптики высокого разрешения и возможностей ЭВМ. Они предназначены для визуального контроля и выявления дефектов на выпускаемых изделиях. Это актуально, поскольку размеры и сложность полупроводниковых изделий постоянно увеличиваются и традиционные методы инспекции становятся недостаточными для обеспечения требуемого уровня скорости и точности производства.

Методы глубокого машинного обучения и нейронных сетей в последнее время значительно повысили возможности систем АОИ при обнаружении и классификации дефектов, что позволило улучшить общую производительность и адаптацию к новым типам дефектов. Например, в [1] рассматриваются гибридные многоканальные системы, использующие глубокие нейронные сети для улучшения автоматизированной визуальной инспекции. Такой метод приводит к повышению точности обнаружения дефектов и увеличению скорости обнаружения ошибок.

Описываемое устройство (рис. 1) предназначено для автоматизированного подсчета количества качественных кристаллов на полупроводниковых пластинах [2]. При этом на предыдущем этапе функционального контроля кристаллы, не соответствующие требованиям, были помечены точками красящего состава. Основная задача заключается в получении изображения пластины с помощью сканирующего устройства и последующем его анализе с использованием методов машинного обучения. Нейронные сети сравнивают полученное изображение

с эталонными образцами, представляющими различные состояния пластины, чтобы подсчитать количество годных кристаллов.

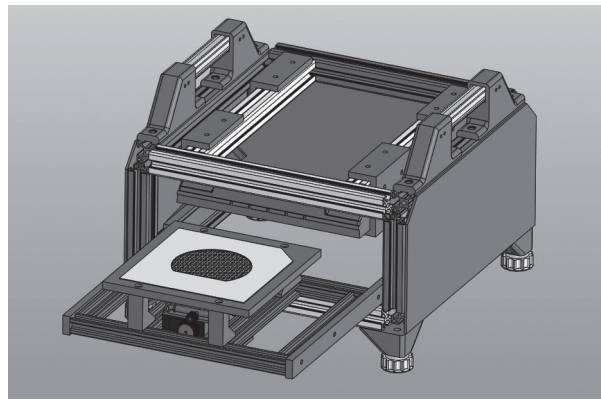


Рис. 1. Система автоматизированного подсчета полупроводниковых кристаллов VZOR

Процесс работы устройства включает следующие этапы. Перед началом сканирования демпфирующая система плотно прижимает пластину. Сканирующее устройство формирует цифровое изображение высокой четкости. Далее полученные изображения передаются в систему обработки, где происходит анализ обученной нейронной сетью и подсчет годных кристаллов. Таким образом, обеспечивается автоматизированный и высокоточный контроль, исключающий человеческую ошибку (рис. 2).

Рис. 2. Процесс анализа пластины

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие результаты. Разработан алгоритм, который использует изображение, сформированное с помощью сканирующего устройства, и нейронные сети для его анализа. Также создана механическая система демпфирования. Она обеспечивает равномерное

распределение давления на пластину во время прижима к сканирующему устройству. Это предотвращает вероятность повреждения и гарантирует получение качественного изображения без артефактов.

Введение подобных инноваций в производственные процессы способствует снижению уровня брака и повышению производственной эффективности, обеспечивая высокое качество конечной продукции в микроэлектронной промышленности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках конкурса «Старт-23-1» (очередь II) (договор № 5049ГС1/89569 от 24.10.2023).

Литература

1. Ромащенко М. А., Васильченко Д. В. Разработка аппаратной части комплекса оптической дефектовки топологии электронных компонентов // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2024. — Т. 20. — № 2. — С. 110–115. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.2.017. EDN CLRIYQ.
2. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие. 9-е изд., стер. — СПб.: Лань, 2021. — 480 с.: ил. ISBN 978-5-8114-0368-4.

УДК 620.22

Макетное моделирование церебральных сосудов с гигантской аневризмой для верификации компьютерной модели оценки необходимости нейрохирургических вмешательств

Горина А. В.[1], Галястов А. А.[1,2], Ставцев Д. Д.[1,2], Коновалов А. Н.[1,3], Гребенев Ф. В.[1,3], Телышев Д. В.[1,2]

[1] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
gorina_a_v@staff.sechenov.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] Нейрохирургический центр им. Бурденко
125047, г Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16

Определен алгоритм получения фантома сосуда головного мозга с аневризмой для проведения стендовых испытаний для верификации компьютерной модели. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования и стендовых испытаний.

Ключевые слова: церебральная аневризма; CFD-моделирование; гемодинамика; цифровая трассерная визуализация; лазерная спекл-контрастная визуализация; фантом сосуда.

Аневризма сосудов головного мозга представляет большую опасность для жизни и здоровья пациента в случае ее разрыва, так как приводит к внутримозговому кровотечению [1, 2]. Для нейрохирургов важно обладать информацией о характере кровотока для принятия решения о ходе дальнейшего лечения пациента. Данные о потоке можно получить из результатов компьютерного моделирования, которые необходимо верифицировать с помощью стендовых испытаний на фантоме исследуемой модели, используя методы визуализации кровотока, такие как цифровая трассерная визуализация (ЦТВ) и лазерная спекл-контрастная визуализация (ЛСКВ).

Метод ЦТВ основан на регистрации движения флюоресцентных микрочастиц, добавленных в исследуемую жидкость, с помощью высокоскоростной камеры FASTCAM Mini AX 100 (Photron Limited, Токио, Япония) под воздействием излучения твердотельного лазерного модуля непрерывного действия с диодной накачкой с длиной волны 532 нм MGL-F-532 (Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., Чанчунь, КНР). С помощью ЛСКВ анализируется изменение спекл-картин, образованных в результате рассеяния света на движущихся частицах. Во время проведения стендовых испытаний камерой NIR camera acA2040-90umNIR (Basler AG, Germany) с лазерным диодом LD785-SH300 (Thorlabs Inc., США) с длиной волны 785 нм регистрируются изображения спеклов, образованные в результате движения жидкости.

Для проведения стендовых испытаний и беспрепятственной регистрации движения жидкости необходимо, чтобы фантом был изготовлен из прозрачных материалов. Фантом сосуда можно получить с помощью LCD-печати из прозрачной

фотополимерной смолы, а также путем отливки из прозрачного силикона. Из полидиметилсилоксана (ПДМС) заливаются две части мастер-модели с полостью в форме сосуда, которые после застывания склеиваются между собой, или одна часть склеивается с предметным стеклом. Кроме того, можно создать фантом методом послойного погружения пластиковой модели в ПДМС, далее модель выплавляется и остается силиконовая оболочка с фиксированной толщиной стенки [3, 4].

Были проведены стендовые испытания на четырех видах фантомов, результаты которых были сопоставлены с результатами компьютерного моделирования. С помощью ЦТВ возможно регистрировать движение частиц во всех случаях при условии равномерности внешней поверхности, чтобы не вызывать искажений на камере. Для ЛСКВ подходит вариант фантома с предметным стеклом, так как данный метод регистрирует движение в пристеночном слое.

Литература

1. Penn D. L., Komotar R. J., Connolly E. S. Hemodynamic mechanisms underlying cerebral aneurysm pathogenesis // Journal of Clinical Neuroscience, May 2011. 18, 1435–1438.
2. Lazzaro M. A., Ouyang B., Chen M. The role of circle of Willis anomalies in cerebral aneurysm rupture // J. NeuroIntervent Surg., 2012. (4), 22–26.
3. Nilsson D. P. G., Holmgren M., Holmlund P., Wåhlin A., Eklund A., Dahlberg T., Wiklund K., Andersson M. Patient-specific brain arteries molded as a flexible phantom model using 3D printed water-soluble resin // Sci. Rep., Jun, 2002. 12 (1), 10172.
4. Hayakawa T., Maruyama H., Watanabe T., Arai F. Three-Dimensional Blood Vessel Model with Temperature-Indicating Function for Evaluation of Thermal Damage during Surgery // Sensors (Basel), Jan., 2018. 18 (2), 345.

УДК 621.3.049

Соотношение физиологических характеристик стадий сна между одновременно регистрируемыми ЭЭГ и МЭГ

Григорьева О. А., Клеева Д. Ф.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
662972, г. Москва, Покровский бульвар, 11, стр. 10
olia.grigoreva2018@gmail.com

Проведен комплексный анализ различных физиологических маркеров сна, выделенных в одновременно зарегистрированных ЭЭГ- и МЭГ-данных с их последующим сопоставлением в пределах нескольких стадий. Реализован синтез данных «смешанной» модальности при помощи реконструкции источников по МЭГ-записи с применением обратного оператора и изменением параметров нейросети UNET.

Ключевые слова: физиологические маркеры сна; реконструкция источников; классификация стадий сна.

Продолжительное время записи, полученные при помощи ЭЭГ, являлись некоторым золотым стандартом при выделении различных стадий сна. В связи с этим положением во многих работах, посвященных описанию классификаторов стадий сна, упоминается факт обучения моделей в большинстве случаев на данных, полученных при помощи ЭЭГ [1]. Таким образом, можно предположить получение на практике низких значений сходимости между последовательностями стадий, предсказанных при помощи классификаторов на основании МЭГ-данных, и последовательностями стадий, предсказанных на основании ЭЭГ-записей. Для преодоления данного ограничения в настоящем исследовании предполагается преобразовать имеющийся ЭЭГ-сигнал таким образом, чтобы увеличить сходимость между предсказаниями стадий для «преобразованной» записи и последовательностями классифицированных стадий для «первоначальной» ЭЭГ-записи, или, напротив, показать, что «новая» ЭЭГ-запись не содержит паттернов, позволяющих улучшить результат для имеющихся моделей.

В проведенном анализе данных можно выделить следующие этапы.

1. Разделение на стадии сна и расчет сходимости в пределах разных регионов

Данный этап выполнен при помощи функционала, предложенного в документации классификатора YASA. Данный алгоритм был выбран благодаря высоким показателям сходимости с ручной разметкой стадий сна клиницистами. Аналогичные алгоритмы находятся либо на стадии разработки и обучены на меньшем объеме нейрофизиологических данных, либо не обладают расширенным функционалом, отвечающим целям данного исследования (например выделение сонных веретен) [2]. Полученные на данном этапе последовательности были сопоставлены между собой. Под сходимостью в данном исследовании подразумевается коэффициент корреляции для качественных данных (меток стадий сна) в пересчете на проценты с заменой буквенных обозначений стадий на численные (например, стадии N1 соответствует число 1, стадии N2 — число 2 и т.д.). Больший процент соотносится с большей сходимостью (то есть с большей схожестью в предсказаниях между двумя последовательностями стадий).

2. Анализ сонных веретен

На данном этапе были выделены эпохи в записях на основании обнаруженных сонных веретен с последующим сравнением топографий на МЭГ- и ЭЭГ-сенсорах при помощи частотно-временного разложения.

3. Синтез ЭЭГ на основе МЭГ при помощи обратного оператора

В целях повышения показателя сходимости между предсказанными для МЭГ- и ЭЭГ-записей последовательностями была предпринята попытка видоизменения первоначального ЭЭГ-сигнала путем реконструкции источников по МЭГ-сигналу с использованием обратного оператора и последующего проецирования полученного сигнала на ЭЭГ-сенсоры. На данном этапе был произведен расчет прямой модели на основании данных о расположении источников, а также расчет обратного оператора (MNE) с его последующей нормировкой.

Литература

1. Dehghani N., Cash S. S., Halgren E. Topographical frequency dynamics within EEG and MEG sleep spindles // Clin. Neurophysiol., 2011a. Vol. 122. № 2. P. 229–235.
2. Vallat R., Walker M. P. An open-source, high-performance tool for automated sleep staging // eLife, 2021. Vol. 10. P. e70092.

УДК 616.853

Применение методов глубокого обучения для автоматического обнаружения межсудорожных разрядов на основе фильтров параметрического сопоставления кривых

Белокопытов А. С., Клеева Д. Ф., Осадчий А. Е., д. к. н.
Центр биоэлектрических интерфейсов, НИУ «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
Asbelokopytov@edu.hse.ru

Электроэнцефалография — важный инструмент для идентификации источников межсудорожных разрядов и аномалий мозговой коры. Традиционный ручной анализ данных ЭЭГ медленный и подвержен ошибкам. В этом исследовании представлен алгоритм глубокого обучения, интегрированный с методом Fast Parametric Curve Matching (FPCM), для автоматического обнаружения спайков в данных ЭЭГ. Алгоритм достиг значительных результатов: ROC AUC 0,967, PR AUC 0,9224 и точность 0,935. Однако для достижения более высокой эффективности необходима дальнейшая оптимизация модели.

Ключевые слова: электроэнцефалография (ЭЭГ); эпилепсия; межприступные спайки; обнаружение спайков; глубокое обучение.

Введение

Электроэнцефалография (ЭЭГ) является золотым стандартом при диагностике эпилепсии. Видео-ЭЭГ-сессии, включая ночной мониторинг, помогают обнаружить эпилептическую активность, что требует дальнейшего МРТ-исследования для выявления структурных аномалий, таких как гиппокампальный склероз или опухоли. Автоматическая система обнаружения эпилептической активности через интериктальные спайки, внеприступные всплески электрической активности, значительно снижает нагрузку на клиницистов. В данной работе мы используем модель глубокого обучения, тренированную на коэффициентах, полученных с помощью алгоритма Fast Parametric Curve Matching (FPCM) [1], который использует параметрическую морфологическую модель для идентификации межприступных спайков. Эти признаки используются для обучения модели, адаптированной к ЭЭГ конкретного пациента. Вдохновленный моделью SincNet [2] FPCM уменьшает сложность и количество параметров, необходимых для обучения, улучшая извлечение признаков.

Материалы и методы

Анализировались данные ЭЭГ за период с 2022 по 2024 гг., включающие 24-часовые сессии, обработанные полосовым фильтром и прореженные. Записи были разделены на «норму» здоровых пациентов (класс 0) и межприступные спайки (класс 1), аннотированные неврологами. Для устранения дисбаланса классов использовалась аугментация. Сегментированные данные межприступных спайков и данные здоровых пациентов были выровнены и Z-стандартизированы. Модель включала коэффициенты FPCM как отдельный слой в Keras, анализируя и конкатенируя их с исходным сигналом ЭЭГ. Процесс обработки включал использование сверточных и полносвязных слоев.

Результаты

Все результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Эффективность модели при извлечении и ее обучении на различных параметрах FPCM (FP — ложноположительные результаты; FN — ложноотрицательные)

Извлекаемые параметры	ROC AUC	PR AUC	Accuracy	FP/min	FN/min
Без FPCM	0,969±0,005	0,926±0,013	0,944±0,006	2,21±0,33	1,167±0,243
c_1 FPCM-коэффициент	0,935±0,013	0,853±0,02	0,901±0,036	4,14±2,85	1,86±0,72
c_2 FPCM-коэффициент	0,937±0,008	0,854±0,021	0,926±0,007	1,3±0,75	3,18±1,09
c_3 FPCM-коэффициент	0,921±0,018	0,821±0,055	0,913±0,023	2,54±1,43	3,02±0,6
c_4 FPCM-коэффициент	0,938±0,020	0,87±0,025	0,932±0,012	1,38±1,25	2,72±1,21
c_5 FPCM-коэффициент	0,903±0,115	0,785±0,282	0,842±0,164	7,09±10,46	2,43±2,47
c_6 FPCM-коэффициент	0,938±0.023	0,868±0.039	0,935±0.011	1,17±0,21	2,77±0,63
Конкатенация всех коэффициентов	0,967±0,015	0,9224±0,021	0,935±0,012	2,25±1,76	1,66±1,05

Обучение модели на каждом коэффициенте отдельно не привело к значительному улучшению производительности, что указывает на необходимость корректировки архитектуры.

Заключение

Исследование показало, что, хотя метод FPCM подходит для извлечения признаков из данных ЭЭГ, текущая архитектура модели может требовать дальнейшей доработки. В будущих работах внимание будет сосредоточено на оптимизации архитектуры и исследовании дополнительных методов для улучшения алгоритмов автоматического обнаружения спайков.

Литература

1. Kleeva D., Soghoyan G., Komoltsev I., Sinkin M., Ossadtchi A. Fast parametric curve matching (FPCM) for automatic spike detection // Journal of Neural Engineering, 2022. 19 (3). URL: https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac682a.
2. Hung C.-H., Wang S.-S., Wang C.-T., Fang S.-H. Using SincNet for Learning Pathological Voice Disorders // Sensors, 2022. 22 (6634). URL: https://doi.org/10.3390/s22176634.

УДК 621.3.049

Печатные электродные 3D-матрицы для применения в биомедицине

Жирнов С. В., Тунеков Т. А., Киреев А. К., Каршиева С. Ш., Забегалов К. Н., Лагунов В. С., Сенатов Ф. С.
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
szhirnov@misis.ru

Разработаны гибкие и растяжимые печатные электродные 3D-матрицы на основе токопроводящего полимерного композиционного материала. Для синтезированного токопроводящего материала показано отсутствие цитотоксического влияния на клетки человека.

Ключевые слова: нейроинтерфейсы; 3D-печать; композиционные материалы.

Одними из наиболее используемых экспериментальных методов нейронаук являются электрофизиологические методы: электроэнцефалография, электрокортикография, электромиография, нейростимуляция. Все эти методы требуют использования отдельных электродов или электродных матриц как для отведения электрических сигналов с органов и тканей, так и для направленной их электростимуляции в целях возбуждения определенных групп клеток.

На сегодняшний день золотым стандартом в электрофизиологии являются многоэлектродные матрицы на гибкой подложке (полиимид, парилен-С, полидиметилсилоксан), считывающим и проводящим элементом в которых являются тонкие металлические пленки (золото, платина), а стандартным методом производства таких матриц является литография. Однако такие электроды имеют сразу несколько фундаментальных недостатков, вытекающих из природы их материалов: отсутствие растяжимости, что приводит к их смещению относительно считываемой ткани при движениях, а также деградация металлических электродов при постоянном изгибе, что приводит к критическому падению соотношения сигнал/шум (SNR) и в конечном счете выходу устройства из строя.

Альтернативным подходом является применение композиционных электропроводящих материалов на основе углеродных наполнителей и полимерной матрицы. В таких материалах электронная проводимость реализуется за счет формирования подвижной перколяционной сети из частиц наполнителя в полимерной матрице, вследствие чего материал куда менее подвержен растрескиванию, чем металлические пленки, и в некоторых случаях может пренебрежимо мало изменять свое сопротивление при деформации.

Демонстрируется возможность аддитивного производства гибких и растяжимых многослойных мультиэлектродных матриц, которые могут быть использованы в качестве токосъемного элемента в электрофизиологических устройствах. Изучены элелектромеханические свойства печатных 3D-образцов проводящих филаментов, для которых показано пренебрежимо малое изменение сопротивления при одноосном растяжении до 30% деформации (область естественной деформации кожи). Изучена структура напечатанных электродов, демонстрирующая развитую поверхность, что может говорить о высокой емкости электрода на границе раздела с физиологическими жидкостями. Разработан дизайн мультиэлектродной

матрицы, а также алгоритм 3D-печати с учетом особенности технологии формирования структуры методом осаждения из раствора (LDM).

Для разработанного токопроводящего материала показано отсутствие цитотоксического эффекта для клеток человека, что говорит о возможности его применения в инвазивных устройствах.

Литература

1. Sonkusale S., Shojaei M. B., Aeron S. Materials and Processing for Flexible Bioelectronics // Flexible Bioelectronics with Power Autonomous Sensing and Data Analytics. — Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 1–25.
2. Ferguson M. et al. A critical review of microelectrode arrays and strategies for improving neural interfaces // Advanced healthcare materials, 2019. Vol. 8. № 19. P. 1900558.
3. Shen K. et al. Translational opportunities and challenges of invasive electrodes for neural interfaces // Nature Biomedical Engineering, 2023. Vol. 7. № 4. P. 424–442.

УДК 621.317.39.084.2

Исследование материалов и технологий нанесения на кожу для улучшения чувствительности и точности углеродных электронных татуировок

Касаткина К. А.[1], Мурашко Д. Т.[1], 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
kseniakor1802@gmail.com

В работе приведено исследование технологий формирования электронных татуировок для повышения чувствительности и точности диагностики физиологических показателей организма. Приведено сравнение углеродных нанотрубок, графена для формирования функциональных слоев электронных татуировок.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; графен; электрофизические свойства; датчики; электронные татуировки.

В России наблюдается растущий интерес к инновационным медицинским диагностическим технологиям. Разработка сенсорных систем в виде функциональных электропроводящих слоев, наносимых на кожу (электронные татуировки), может существенно улучшить доступность и качество диагностики для пациентов в удаленных местах от медицинских центров [1, 2]. Актуальность исследования обусловлена увеличением числа хронических заболеваний и старением населения. Электронные татуировки могут стать важным инструментом для интеграции телемедицины в российскую систему здравоохранения, позволяя врачам удаленно отслеживать состояние пациентов и оперативно реагировать на изменения физиологических показателей [3, 4].

Основной целью работы является создание биосовместимых электронных татуировок с электрофизическими свойствами, сопоставимыми с электродами для медицинской диагностики.

Предложенная технология основана на формировании композитных слоев из комбинации углеродных нанотрубок, восстановленного оксида графена и биополимера альбумина для получения перколяционных сетей в биосовместимом матриксе. Для получения заданной топологии заранее подготовленные слои равномерно осаждались на целлюлозные подложки, далее обрабатывались электромагнитным излучением и переносились на поверхность кожи.

Экспериментальные исследования продемонстрировали, что электронные татуировки обладают высокой чувствительностью для изменения сигналов с поверхности кожи, обеспечивая точность измерений до 0,1 мкВ. Электропроводность слоев составила 20–35 мСм, импеданс и угол сдвига фаз регистрировались в частотном диапазоне от 20 Гц до 1 МГц, а предел измерения сдвига достигал 10 нм. Таким образом, электронные татуировки обладают высокой чувствительностью к изменениям сигналов на поверхности кожи, обеспечивая высокую точность измерений.

Результаты работы указывают на возможность внедрения данных инновационных решений для улучшения медицинской диагностики с высокой степенью надежности и чувствительности.

Работа выполнена в рамках реализации крупного научного проекта, соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.

Литература

1. Кац Е. А. Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры: родословная форм и идей. — М.: изд-во ЛКИ, 2008.
2. Каримов Х. С. Исследование датчика давления на основе композита углеродных нанотрубок и комплекса ванадия // Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2012. — Т. 55. — № 7. — С. 561–566.
3. Киреев Д. Изготовление, характеристики и применение графеновых электронных татуировок // Протоколы природы, 2021. — Т. 16. — № 5. — С. 2395–2417.
4. Киреев Д. Непрерывный безманжетный мониторинг артериального давления с помощью графеновых биоимпедансных татуировок // Природные нанотехнологии, 2022. — Т. 17. — № 8. — С. 864–870.

УДК 620.3

Гибкие сухие электроды на основе углеродных нанотрубок и графена для долговременного ЭКГ-мониторинга

Куксин А. В.[1], Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
nix007@mail.ru
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
gerasimenko@bms.zone

Разработаны гибкие сухие электроды на основе гибридных наноструктур из углеродных нанотрубок и графена, сформированных в матрице полидиметилсилоксана под воздействием лазерного излучения. Проведены экспериментальные исследования особенностей структурных и электрофизических свойств созданных электродов. Показана возможность применения электродов для измерения электрокардиограммы.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; графен; лазер; электроды; электрокардиограмма.

Открытие новых аллотропных модификаций наноуглерода, таких как углеродные нанотрубки и графен, обозначило широкие перспективы для развития различных областей электроники. Поиск методов создания гибридных наноструктур на основе этих двух типов углеродных наноматериалов может привести к дополнению их структурных и электрофизических особенностей и созданию высокоэффективных устройств на их основе [1, 2].

Разработана методика формирования гибких сухих электродов на основе гибридных наноструктур из углеродных нанотрубок и графена, сформированных в матрице полидиметилсилоксана под воздействием лазерного излучения.

Проведенные экспериментальные исследования особенностей процесса формирования электродов выявили, что наиболее низким сопротивлением ~8 кОм обладали электроды на основе гибридных наноструктур из одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и восстановленного оксида графена (ВОГ). Формирование гибридных наноструктур в виде разветвленных электропроводящих сетей из ОУНТ и ВОГ производилось импульсным лазерным воздействием с длиной волны 1064 нм.

Исследования электрофизических свойств созданных электродов продемонстрировали возможность их применения для измерения электрокардиограммы (ЭКГ). Качество регистрируемого с помощью сформированных электродов сигнала ЭКГ соотносится с качеством сигнала, регистрируемого с помощью широко распространенных Ag/AgCl-электродов. Однако отсутствие гелевого слоя на сухих ОУНТ/ВОГ-электродах выгодно отличает их от коммерческих, так как при длительном ношении они не будут подвержены ухудшению качества сигнала из-за деградации гелевого слоя.

Для изучения биосовместимости электродов на основе ОУНТ/ВОГ проводились исследования процесса выращивания на их поверхности клеток фибробластов

эмбриона человека. После инкубации наблюдалось большое количество закрепленных и выросших клеток. Клетки образовывали структуры посредством межклеточных связей. Большая плотность роста клеток подтверждает, что клетки прикреплялись к поверхности электрода и вступали в активную фазу клеточного роста. Полученные результаты свидетельствуют о высокой степени биосовместимости электродов на основе ОУНТ/ВОГ, что делает их пригодными для использования в контакте с кожей.

Работа выполнена в рамках реализации крупного научного проекта, соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.

Литература

1. Kumar R., Singh R. K., Dubey P. K., Singh D. P., Yadav R. M. // ACS applied materials & interfaces, 2015. Vol. 7. № 27. P. 15042–15051.
2. Kuksin A. V., Gerasimenko A. Yu., Shaman Y. P., Kitsyuk E. P., Shamanaev A. A., Sysa A. V., Eganova E. M., Slepchenkov M. M., Poliakov M. V., Pavlov A. A., Glukhova O. E. Improving the emission properties of graphene-carbon nanotube hybrid nanostructures through functionalization with BaO nanoparticles and laser treatment // Applied Surface Science, 2024. Vol. 664. P. 160222.

УДК 621.317.39.084.2

Формирование тонких пленок тензочувствительных сенсоров из электропроводящих углеродных наноструктур с лазерным воздействием для регистрации проявлений синдрома обструктивного апноэ сна

Морозова А. С.[1], Пьянов И. В.[1,2], 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

Созданы сверхрастягиваемые тонкопленочные тензочувствительные сенсоры из углеродных наноструктур методами спрей-осаждения и лазерного формирования. Описано влияние дисперсий на основе различных растворителей на электрофизические характеристики сенсоров. Предложена система для детектирования остановок дыхания.
Ключевые слова: нанокомпозиты; углеродные нанотрубки; лазерное излучение; мониторинг дыхания; гибкая носимая электроника.

Гибкие тензочувствительные сенсоры, в отличие от металлических и полупроводниковых тензорезисторов, способны растягиваться до нескольких сотен процентов. Сенсоры на основе композитов углеродных нанотрубок (УНТ) с полимерными матрицами обладают повторяемостью при циклических нагрузках и долговечностью, высокой гибкостью и прочностью, а также являются сверхчувствительными к деформациям за счет высокого аспектного соотношения нанотрубок. Кроме того, УНТ обладают высокой электропроводностью благодаря туннельному эффекту и возможности создавать каркасную структуру. Поэтому тензочувствительные сенсоры на основе УНТ являются перспективными устройствами гибкой носимой электроники [1]. Одной из глобальных проблем здоровья человека на данный момент являются заболевания, вызывающие затрудненное дыхание. Синдром обструктивного апноэ сна (СОАС) представляет собой настоящую угрозу для сердечно-сосудистой системы человека [2]. СОАС тяжелой формы повышает риск смерти во сне от сердечного приступа у молодых людей на 30 %. Поэтому существует необходимость создания систем амбулаторного длительного мониторинга дыхания с помощью тензочувствительных сенсоров.

Для создания тензочувствительных сенсоров разрабатывался автоматизированный метод спрей-осаждения дисперсий углеродных нанотрубок на полимерные матрицы. Матрицы из двухкомпонентного силикона изготавливались путем заливки в формы, напечатанные на 3D-принтере. Для приготовления дисперсий применялись карбоксилированные УНТ (КУНТ), диспергированные в дистиллированной воде, в изопропиловом спирте и смеси этилового спирта с помощью погружного ультразвукового зонда и ультразвуковой ванны. Лазерная обработка полученных углеродных пленок импульсным иттербиевым лазером 1064 нм

приводила к образованию перколяционных сетей УНТ и уменьшению сопротивления пленок почти в два раза.

Установлена зависимость сопротивления от количества осажденных слоев дисперсии, т.е. от толщины углеродной пленки: с увеличением количества слоев сопротивление уменьшается до значения ~22 кОм, после которого график выходит на плато. Полученная зависимость открывает возможность для точного контроля электрических характеристик сенсоров.

Проводилось исследование характеристик дисперсий КУНТ с различными растворителями. Наибольшей вязкостью обладала дисперсия с этиловым спиртом и дистиллированной водой — 1,27 мПа·с, а наименьшей обладала дисперсия с дистиллированной водой — 0,79 мПа·с. Таким образом, для метода спрей-осаждения наиболее подходящей является дисперсия КУНТ с этиловым спиртом и дистиллированной водой, так как образует проводящую пленку на поверхности силикона. Исследование спектров поглощения изготовленных дисперсий позволило установить, что вид растворителя не вносит значительных изменений на положение пиков поглощения в диапазоне от 300 до 1100 нм, однако наибольшим коэффициентом поглощения обладает дисперсия на основе смеси этилового спирта и дистиллированной воды.

Оценка электрофизических характеристик сенсоров на основе углеродных пленок показала, что сенсоры обладают близким к линейному поведением, которое обеспечивает стабильный отклик на деформацию сенсоров. Средний коэффициент чувствительности сенсоров составил $24 \pm 0{,}4$. Такие параметры сенсоров позволили создать систему мониторинга дыхания при подключении сенсоров к электронному модулю. В программе визуализации в режиме реального времени строились графики сигналов сенсоров от времени в процессе вдоха и выдоха, что позволило обнаружить моменты остановки дыхания.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект FSMR-2024-0003).

Литература

1. Zhiran Shen, Fanmao Liu, Shuang Huang, Hao Wang, Cheng Yang, Tian Hang, Jun Tao, Wenhao Xia, Xi Xie. Progress of flexible strain sensors for physiological signal monitoring // Biosensors and Bioelectronics, 2022. Vol. 211. P. 114298.
2. Jun J. C., Swati Chopra and Schwartz A. R. Sleep apnoea // European Respiratory Review, 2016. Vol. 25. № 139. P. 12–18.

УДК 612.821

Нейроинтерфейс, дополненный механотерапией нижних конечностей и чрескожной электростимуляцией спинного мозга

Решетникова В. В.[1], к. б. н., Боброва Е. В.[1], д. б. н., Вершинина Е. А.[1], к. б. н., Гришин А. А.[1], к. ф.-м. н., Бобров П. Д.[2,3], к. б. н., Исаев М. Р.[2,3], Герасименко Ю. П.[1], д. б. н.

[1] Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН
199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 6
3069@bk.ru
[2] Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН
117485, г. Москва, ул. Бутлерова, 5А
[3] РНИМУ им. Н. И. Пирогова Минздрава России
117513, г. Москва, ул. Островитянова, 1

Разработан и протестирован нейроинтерфейс, основанный на воображении движений нижних конечностей и дополненный механотерапией и чрескожной электростимуляций спинного мозга. Исследование на здоровых испытуемых показало изменение ЭМГ-активности соответствующих мышц и изменение ЭЭГ-активности мозга.

Ключевые слова: нейроинтерфейс; воображение движений; механотерапия; чрескожная электростимуляция спинного мозга.

Нейроинтерфейсы — системы, позволяющие передавать команды, кодируемые активностью мозга, на внешние устройства, они могут быть использованы в области нейрореабилитации, в том числе двигательных функций [1].

На 11 здоровых волонтерах (семь женщин и четверо мужчин, 18–45 лет) разработан и протестирован нейроинтерфейс, основанный на кинестетическом воображении движений нижних конечностей (тыльное сгибание стоп) и дополненный чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга (ЧЭССМ) и механотерапией. Каждый участник эксперимента принял участие в четырех сессиях управления нейроинтерфейсом: (1) только со зрительной обратной связью, (2) с добавлением механотерапии, (3) с добавлением ЧЭССМ, (4) с добавлением механотерапии и ЧЭССМ. Перед испытуемыми была поставлена задача кинестетически воображать тыльное сгибание правой или левой стопы либо находиться в состоянии покоя согласно инструкции, предъявляемой на экране монитора. Механотерапия, представляющая собой пассивное сгибание стоп с помощью механотренажера «БиоКин» (ООО «Косима»), запускалась в случае успешного воображения движения испытуемым. При помощи ЧЭССМ стимулировали дорсальные корешки спинного мозга на уровне позвонков L1–L2 на расстоянии 1,5 см от средней линии позвоночника: при инструкции воображать движения левой стопы — с левой стороны тела, при воображении движений правой стопы — с правой стороны тела. ЧЭССМ представляла собой ритмическую стимуляцию через накожные электроды импульсами длительностью 1 мс с частотой 15 Гц, заполненными высокочастотным компонентом 5 кГц.

Дисперсионный анализ показал, что при воображении как правой, так и левой стопы добавление к работе нейроинтерфейса ЧЭССМ совместно с механотерапией увеличивает точность классификации сигналов мозга, то есть приводит к большему отличию активности кортикальных сетей при воображении движений от таковой в покое. Также при добавлении как механотерапии, так и ЧЭССМ наблюдаются значимые различия между активностью мозга в разных (альфа, бета-1, бета-2) диапазонах. Стимуляционные воздействия (ЧЭССМ и механотерапия) уменьшают ЭМГ-активность антагонистов (икроножной мышцы) при воображении движения обеих стоп и активность левой передней большеберцовой мышцы (агониста) при воображении движений ведущей ноги. Эти эффекты, по-видимому, важны для формирования адекватных координационных паттернов мышечной активности, обеспечивающих лучшее следование инструкции воображать движение.

Полученные данные могут быть использованы в области нейрореабилитации движений нижних конечностей, в том числе при синдроме отвисающей стопы.

Литература

1. Young M.J., Lin D.J., Hochberg L.R. Brain-computer interfaces in neurorecovery and neurorehabilitation // Seminars in Neurology, 2021. Vol. 41. № 2. P. 206–216.

УДК 621.389

Реструктуризация поверхности стимулирующего электрода лазерным излучением

Круковский Н. С.[1], 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

Реструктуризация поверхности стимулирующих электродов фемтосекундным лазерным излучением. Влияние данного метода на электрохимические характеристики электродов.

Ключевые слова: иерархическая реструктуризация; фемтосекундный лазер; стимуляция спинного мозга; электроды; фантомные боли.

Стимуляция спинного мозга может быть использована для лечения фантомных болей, поскольку обеспечивает воздействие на участки нервной системы, отвечающие за восприятие боли и ощущения в ампутированных конечностях. На данный момент существует несколько важных проблем, стоящих на пути создания эффективных и безопасных электродов для клинического применения. Одной из них является обеспечение безопасности и эффективности стимуляции при минимизации риска осложнений для доставки импульса к нервной ткани. Важной задачей служит разработка миниатюрных электродов с заданными значениями накопленного заряда и сопротивления, поскольку вместе с уменьшением размеров возрастает импеданс электрода. Необходимо нахождение правильного баланса между вышеперечисленными характеристиками наряду с биосовместимостью изделий [1, 2].

Одним из методов достижения вышеизложенных требований служит реструктуризация поверхности электрода с помощью лазерного воздействия, при которой изменяется морфология поверхности путем абляции, сублимации и плавления для придания управляемой шероховатости поверхности, что позволяет получить структуры с размерами элементов от 10^{-3} до 10^{-9} м. Использовался фемтосекундный твердотельный лазер с длиной волны 1030 нм для воздействия на электроды из слава Pt-10Ir. Установлена связь между параметрами лазерного излучения, а именно мощности в диапазоне 0,6–3,35 Вт или плотности энергии 2–12,3 Дж/см^2 от получаемой иерархической структуры, и сопротивлением между электродом и биообъектом при частоте тока до 10^3 Гц. Выявлена зависимость между средней мощностью лазера и накопленным электродом зарядом. Модифицированный электрод фемтосекундным лазером обеспечивает при напряжении до 4,2 В увеличение мощности на 1 мАч/см^2. Достигнутая структура и электрофизические параметры электродов могут обеспечить эффективное применение их для нейростимулирующих устройств.

Работа выполнена в рамках реализации крупного научного проекта, соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.

Литература

1. Shahram Amin, Wesley Seche, Nicholas May, Hongbin Choi, Pouya Tavousi, Sina Shahbazmohamadi. Femtosecond laser hierarchical surface restructuring for next generation neural interfacing electrodes and microelectrode arrays // Scientific Reports, 2022. Vol. 12. P. 1–19.
2. Nathan Dunlap, Dana B., Sulas-Kern, Peter Weddle, Usseglio-Viretta F., Laser ablation of Li-ion electrodes for fast charging: Material properties, rate capability, Li platin. and wetting // Journal of Power Sources, 2023. Vol. 537.

УДК 621.389

Микроэлектронные интерфейсы имплантируемых устройств для стимуляции нервной ткани

Кузнецова Е. А.[1], 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

Приведено сравнение микроэлектронных интерфейсов для стимуляции нервной ткани из перспективных материалов по импедансу, частоте, нагреву, силе тока и гидрофильности. Предложены устройства на основе композиционных конструкций из полимеров и углеродных наноматериалов.
Ключевые слова: микроэлектронные интерфейсы; нейронные протезы; нейростимуляция.

Современная медицина неразрывно связана с микроэлектронными технологиями. В настоящее время для лечения пациентов с хронической болью и параплегией используются электрические стимуляторы с нейроинтерфейсами, которые имплантируются на головной или спинной мозг, а также на периферические нервы. Экспериментальные исследования показывают, что низкоуровневая электростимуляция спинного мозга может значительно улучшить нейромоторную функцию и снизить интенсивность боли, что открывает новые возможности для немедикаментозной терапии в рамках нейрореабилитации.

Наряду с интерфейсами из благородных металлов, таких как платина, перспективными материалами для микроэлектронных интерфейсов имплантируемых устройств являются структуры из углеродных нанотрубок (УНТ) и графена [1–2]. Несмотря на хорошие электрохимические показатели, главным отрицательным моментом платиновых матриц является низкое максимальное значение инжекции заряда, превышение которого приводит к расслаиванию при сильном воздействии током [3]. Электростимуляция такими устройствами приводит к увеличению шероховатости в 3–8 раз, импеданса — в 2–4 раза и снижению угла смачивания даже при низких нагрузках в пределах 1,0–1,6 мА [4]. Это происходит ввиду окисления металла, что является главной проблемой металлических интерфейсов для хронических применений.

Материалы на основе графена и УНТ обладают высокой электропроводностью до единиц кСм/м, гибкостью и высокой прочностью при нормальной и тангенциальной нагрузках с модулем Юнга до 1 ТПа, биосовместимостью и прозрачностью в широком спектральном диапазоне [5]. Главным преимуществом графена является высокая химическая устойчивость при малой толщине (0,335 нм), а также возможность комбинирования его с различными материалами, улучшая характеристики изделий, что делает его универсальным материалом для электроники. В отличие от графена, УНТ имеют диаметр 0,4 до 40 нм с высоким аспектным соотношением длины и диаметра и могут обеспечивать создание настраиваемых перколяционных сетей при внешних воздействиях.

Анализ источников литературы позволил сформулировать совокупные параметры электродов на основе композиционных материалов из графена и УНТ для нейростимуляции:

- рабочая частота: < 1 кГц;
- нагрев: < 37 °C;
- сила тока: 60–100 мА;
- длительность импульсов: 0,5–1 мс;
- гидрофильность: краевой угол смачивания > 40°.

Установлено, что углеродные наноструктуры с sp2-гибридизованной структурой за счет высокой подвижности заряда обеспечивают высокую электропроводность, теплопроводность, гибкость и биосовместимость, являясь хорошими кандидатами для создания микроэлектронных имплантируемых нейроинтерфейсов.

Работа выполнена в рамках реализации крупного научного проекта, соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.

Литература

1. Alahi M. E. E., Rizu M. I., Tina F. W., Huang Z., Nag A., Afsarimanesh N. Recent Advancements in Graphene-Based Implantable Electrodes for Neural Recording/Stimulation // Sensors, 2023. Vol. 23. P. 9911.
2. Yuanyuan Guo, Shan Jiang, Grena B. J. B., Kimbrough I. F., Thompson E. G., Yoel Fink, Harald Sontheimer, Tatsuo Yoshinobu, Xiaoting Jia. Polymer Composite with Carbon Nanofibers Aligned during Thermal Drawing as a Microelectrode for Chronic Neural Interfaces // ACS Nano, 2017. Vol. 11. P. 6574–6585.
3. Ke Wang, Fishman H. A., Hongjie Dai, Harris J. S. Neural Stimulation with a Carbon Nanotube Microelectrode Array // Nano Letters, 2006. Vol. 6. № 9. P. 2043–2048.
4. Cavalcanti L., Filho G., Medeiros R., Diniz H., Damasceno I., Morya E., Simplício H. Characterization of Spinal Cord Stimulation Electrode for Chronic Implant in Animal Models // Engineering Proceedings, 2023. Vol. 35. I. 34.
5. Kostarelos K., Vincent M., Heber C. and Garrido J. A. Graphene in the Design and Engineering of Next-Generation Neural Interfaces // Advanced Materials, 2017. Vol. 29. I. 42.

УДК 681.2.08

Перспективы применения кольцевого лазерного гироскопа в биомедицинских исследованиях

Сметанин И. А., к. т. н., Синельников А. О.
Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
Ismetanin.ilya@yandex.ru

В статье описывается применение кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ) на виброподвесе для записи кардиосигналов. Представлены возможности гироскопов в диагностике сердечных и дыхательных заболеваний, спортивной медицине и неврологии. КЛГ может дополнить ЭКГ, предоставляя дополнительную информацию о частотном составе кардиосигналов.
Ключевые слова: кольцевой лазерный гироскоп; виброподвес; кардиосигнал; медицинская техника.

На сегодняшний день электрокардиограмма (ЭКГ) остается основным методом для записи кардиосигналов, используемым благодаря своей точности и распространенности в медицинской диагностике. ЭКГ регистрируется с помощью электродов, которые размещаются на теле человека вблизи сердца, и позволяет оценивать электрическую активность сердца. Однако последние исследования показывают, что гироскопы различных типов также имеют потенциал для записи кардиосигналов.

Гироскопическая кардиограмма (ГКГ), получаемая с использованием гироскопов, отличается от ЭКГ своей способностью фиксировать не только электрическую активность, но и механические колебания, связанные с сердечным циклом. Это открывает новые возможности для диагностики и мониторинга различных сердечно-сосудистых заболеваний, таких как аритмии и дисфункции клапанов. ГКГ может быть особенно полезной в случаях, когда ЭКГ не дает полного представления о состоянии сердца, например при наличии электродов или электрических помех.

В спортивной медицине гироскопы используются для более точной оценки двигательной активности спортсменов. Они позволяют анализировать параметры движений, такие как угловые скорости и ускорения, что важно для оптимизации тренировочных программ и предотвращения травм. Кроме того, в сочетании с пульсоксиметрами и другими приборами гироскопы помогают оценить физиологические реакции на физическую нагрузку и составить индивидуальные рекомендации по тренировкам.

В области неврологии гироскопы также нашли применение для регистрации неврологических проявлений, таких как треморы и двигательные расстройства. Они могут использоваться для оценки частоты и амплитуды колебаний, что помогает в классификации и мониторинге этих состояний. Анализ походки с помощью гироскопов является важным методом для диагностики болезней, связанных с нарушениями двигательных функций, таких как болезнь Паркинсона.

Современные МЭМС-гироскопы (микроэлектромеханические системы) представляют собой компактные и маломощные устройства, которые могут быть легко интегрированы в медицинские устройства и носимые технологии. Однако их точность и чувствительность могут быть недостаточными для определенных

медицинских приложений, требующих высокой точности измерений. Для таких целей кольцевые лазерные гироскопы (КЛГ) на виброподвесе представляются более подходящим решением. Они обеспечивают высокую чувствительность и точность, что особенно важно для медицинских исследований и диагностики.

Целью исследования является изучение способности лазерного гироскопа ЛГК-400 фиксировать кардиосигналы и их влияние на его работу. Для этого был создан экспериментальный стенд, настроенный с учетом требований эксперимента, включая подачу кардиосигнала на гироскоп. В результате исследования были проведены запись и анализ выходных сигналов гироскопа при отсутствии и при наличии кардиосигнала. Ожидаем, что данные дадут понимание способности гироскопа регистрировать и использовать кардиосигналы для улучшения стабильности его работы.

Литература

1. Солдатенков В. А. и др. Электросейсмокардиоблок для неинвазивной диагностики заболеваний человека // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 2019. — С. 233–236.
2. Данилова Н. Н. Вариабельность сердечного ритма. Стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования. — СПб.: ИНКАРТ, 2000.
3. Гуцол Л. О. и др. Физиологические и патофизиологические аспекты внешнего дыхания. — Иркутск: ИГМУ, 2014. — С. 7–9.
4. Лихачев С. А., Ващилин В. В., Дик С. К. Тремор: феноменология и способы регистрации. — Минск, 2010.
5. Вагнер Й. Ф. Об измерении параметров движения спортсменов с помощью гироскопов и акселерометров. Технические аспекты // Гироскопия и навигация, 2017. — Т. 25. — № 3. — С. 3–31.
6. Успенский В. М. Информационная функция сердца. Теория и практика диагностики заболеваний внутренних органов // Вестник Московской государственной академии делового администрирования. Серия: Философские, социальные и естественные науки, 2011. — № 1. — С. 104–112.

УДК 621.3.049

Инвазивная стимуляция периферических нервов как инструмент обратной связи в нейропротезной системе верхней конечности

Согоян Г. А.[1], Пилюгин Н. С. [1], к. м. н., Биктимиров А. Р.[2], Синцов М. Ю.[3], Лебедев М. А[4],

[1] Центр нейробиологии и реабилитации мозга им. Владимира Зельмана, Сколковский институт науки и технологий
121205, г. Москва, Большой Бульвар, 30, с. 1
[2] Дальневосточный федеральный университет
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
[3] Исследовательский центр «Моторика»
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 42, стр. 1, пом. №306
[4] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Исследования демонстрируют, что различные методы нейростимуляции могут эффективно восстанавливать тактильные и проприоцептивные ощущения у пациентов с ампутацией, а также снижать фантомные боли. В экспериментах участвовали два пациента с ампутацией верхней конечности, которым имплантировали электроды для стимуляции периферических нервов и спинного мозга. В результате тренировок пациенты смогли различать размеры объектов, управляя протезной рукой, что подтверждает потенциал использования нейростимуляции для создания мультисенсорных протезов конечностей.

Ключевые слова: ампутация; стимуляция; протезирование; периферические нервы; импланты; нейроинтерфейсы; интерфейс мозг — компьютер.

Ампутация конечностей приводит к таким разрушительным последствиям, как потеря моторных и сенсорных функций и фантомные боли в конечностях (PLP) [1]. В качестве лечения используются различные методы нейростимуляции, обеспечивающие искусственную соматосенсорную обратную связь, такие как стимуляция периферических нервов (PNS), стимуляция спинного мозга (SCS) и поверхностная электрическая стимуляция нервов (TENS) [2]. Помимо обезболивающего эффекта стимуляция способна создавать ощущения в фантомной конечности [2]. Такие испытания помогли бы выбрать наилучший метод или комбинацию методов и потенциально могли бы привести к разработке мультисенсорных протезов конечностей.

Двум пациентам с ампутацией верхней конечности на четыре недели имплантировали стимулирующие электроды, размещенные в медиальном нерве и эпидурально над спинным мозгом. PNS и SCS исследовались для каждого участника как подходы для обеспечения тактильных и проприоцептивных ощущений и подавления фантомных болей. Участники P1 и P2 — мужчины с левой трансгумеральной ампутацией. Каждый пациент подписал информированное согласие перед участием в экспериментах. Исследование было одобрено этическим комитетом Школы биомедицины Дальневосточного федерального университета (ДВФУ).

В ходе сенсорного картирования были определены характеристики тока, вызывающие проприоцептивный и тактильный ответ в фантомной кисти, что позволило включить стимуляцию в замкнутый контур управления протезом.

В этой задаче обратная связь от PNS позволяла различать размеры объектов, в то время как протезная рука захватывала цилиндрические объекты. Когда пациент инициировал захват, закрытие апертуры протеза (измеряемое с помощью энкодеров пальцев протеза) приводило к увеличению амплитуды стимуляции. Цилиндры были трех размеров: маленький (диаметром 20 мм), средний (40 мм) и большой (60 мм). Каждое тестирование захвата объектов состояло из двух сессий. В рамках сессии протезная рука хватала объект, а пациент должен был определить, является ли объект маленьким, средним или большим.

Во время сеансов испытуемые надевали повязку на глаза и шумоизолирующие наушники. При захвате они испытывали ряд вызванных ощущений, что позволило проверить, могут ли испытуемые связать уровень амплитуды PNS с размером апертуры протеза. Во время перерыва участники могли видеть протезную руку и цилиндры, и им разрешалось свободно взаимодействовать с ними.

Для каждого теста распознавания размера объекта параметры стимуляции выбирались на основе предыдущего сенсорного картирования. Использовалась пара электродов, имитирующих проприоцептивное ощущение в фантомной руке. Диапазон амплитуд стимуляции выбирался комфортным для субъекта и соответствовал значениям психометрической шкалы от 1–2 (едва различимое) до 7–8 (сильное, но комфортное восприятие). Показания энкодеров пальцев протеза обеспечивали измерение апертуры протезной руки, которая изменялась от 0 % (полностью закрыта) до 100 % (полностью открыта). Этот сигнал преобразовывался в амплитуду, которые в начале задания были ниже порога сенсорного восприятия.

Оба участника определяли размер объекта, захваченного протезной рукой, с точностью, превышающей уровень случайного угадывания в 33 %. На первый день пациент P1 улучшил точность с 28 до 57 %, на последний день точность пациента достигла 67 %, а итоговый балл после тренировки составил 73,33 %. До тренировки P2 не мог назвать объект, но после тренировки точность достигла 34 %. В конце его точность увеличилась до 85 %. В контрольной сессии без стимуляции оба участника не смогли различить размер объектов.

Мы заключаем, что способность выполнять сложные сенсомоторные задачи может быть обеспечена у пациентов с ампутацией с использованием индивидуально подобранной комбинации методов нейростимуляции. В дополнение к восстановлению ощущений нейростимуляция подавляет PLP.

Литература

1. De Nunzio A. M., Schweisfurth M. A., Ge N., Falla D., Hahne J., Gödecke K., Petzke F., Siebertz M., Dechent P., Weiss T., Flor H., Graimann B., Aszmann O. C., Farina D. Relieving phantom limb pain with multimodal sensory-motor training // Journal of Neural Engineering, 2018. 15(6), 066022.
2. Soghoyan G., Biktimirov A., Matvienko Y., Chekh I., Sintsov M., Lebedev M. A. Peripheral nerve stimulation enables somatosensory feedback while suppressing phantom limb pain in transradial amputees // Brain Stimulation, 2023. 16 (3), 756–758.

УДК 615.847 + 612.471.1

Исследование миосигналов и разработка системы поддержки движения верхней конечности человека при нарушении проводимости

Соколов М. Е.[1], Гончарова А. В.[1,2], Карнуп Г. А.[1,3]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
agoncharova@niime.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1

Реализован алгоритм адаптации миостимуляционного сигнала в режиме реального времени с тремя видами подстройки миостимуляционного сигнала. Разработан нейросетевой алгоритм с предсказанием точности двигательной активности мышц порядка 83,6 %.

Ключевые слова: миостимуляция; электромиография; мышечные дисфункции.

В настоящее время одной из проблем медицины является восстановление двигательных функций руки человека при моторных дисфункциях мышц. В связи со сложным паттерном движения верхних конечностей [1] реализация адаптивных систем миостимуляции и систем поддержки при совершении свободного движения остается открытой. На базе современных достижений микроэлектроники в обработке и методах предсказания биосигналов человека [2], а также достижений зарубежных партнеров [3] предлагается новый метод адаптивной миостимуляции, основанный на сравнении референтных электромиограмм (ЭМГ) с патологической огибающей, как наиболее информативной частью ЭМГ-сигнала, и подборе сигналов стимуляции исходя из антропометрических данных пользователя для двух случаев поражения верхней конечности.

1. Алгоритм на основе зеркального отражения данных с одинаковых мышц при парезах.

По данным ЭМГ-сигнала со здоровой руки, который принимается за эталон, происходит амплитудно-частотная подстройка стимулирующих импульсов для больной руки, которыми дополняется сигнал считанной электромиограммы [4] и далее передается на электроды миостимуляции. В случае парапареза — нарушения иннервации одновременно обеих конечностей одного пояса — применяется второй сценарий.

2. Алгоритм на основе базы данных эталонных ЭМГ-значений.

При заданных параметрах (рост, вес, возраст) пациента подбирается доверительный интервал ЭМГ и наиболее физиологичный стимулирующий сигнал как разность рефренного и реальных сигналов.

Для реализации алгоритма проведено исследование мышечной активности выборки из 120 здоровых человек без сопутствующих заболеваний нервно-мышечной

системы согласно разработанной методике снятия данных с пяти мышц верхней конечности и сформирована база данных амплитудных характеристик ЭМГ. Репрезентативность выборки обеспечивалась различным физиологическим состоянием объектов исследования.

Реализован алгоритм адаптивной миостимуляции для верхней конечности с нейросетевым алгоритмом на базе вариационного автоэнкодера с точностью предсказания двигательной активности 83,6 % [5].

Кроме того, исследование афферентного мышечного ответа эталонных сигналов позволило сформировать максимально физиологические импульсы стимулирующих сигналов с частотой дискретизации сигнала до 0,05 в сек. Это в свою очередь позволило применить прямой метод миостимуляции непосредственно на целевую группу мышц, что меняет терапевтический эффект по сравнению с HAL-терапией [6] нарушения двигательной активности в сторону удешевления и упрощения использования.

Полученные данные могут быть применены для лечебных целей как неотъемлемая часть системного подхода восстановления нейропластичности при цереброваскулярных болезнях, травматическом поражении мотонейрона конечности и миелопатии, в качестве стимулирующей терапии при ДЦП, мышечной дистрофии, рассеянном и боковом амиотрофическом склерозе, врожденных миопатиях и нейропатиях различной этиологии.

Литература

1. Охунжанова М. З. Реабилитация больных, перенесших инсульт // Barqarorlik Va Yetakchi Tadqiqotlar Onlayn Ilmiy Jurnali, 2022. — Т. 2. — № 4. — С. 78–85.
2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1. — С. 2–5.
3. Горнев Е. С. и др. Анализ разработанных зарубежных изделий микросистемной техники // Микросистемная техника, 2002. — № 7. — С. 6–11.
4. Гончарова А. В., Герасименко А. Ю. Исследование электромиографических сигналов пациентов в постинсультном состоянии для разработки алгоритма // Микроэлектроника и информатика — 2023. — С. 104–111.
5. Карнуп Г. А. Исследование вариационного автоэнкодера для обработки сигналов мышц и управления экзоскелетом руки // Российский форум «Микроэлектроника-2022», 2022. — С. 718–720.
6. Cruciger O., Schildhauer T. A., Meindl R. C., Tegenthoff M., Schwenkreis P. Impact of locomotion training with a neurologic controlled hybrid assistive limb (HAL) exoskeleton on neuropathic pain and health related quality of life (HRQoL) in chronic SCI: a case study // Disability and Rehabilitation. Assistive Technology, 2014. P. 1–6. ISSN 1748-3115. DOI:10.3109/17483107.2014.981875.

УДК 611.8

Разработка системы для нейромодуляции спинного мозга методом временной интерференции

Шалаева И. Г.
Научно-технологический университет «Сириус»
354349, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», Олимпийский проспект, 1
00irinsshalaeva00@gmail.com

Разработана система глубокой стимуляции спинного мозга методом временной интерференции электрических полей при эпидуральном наложении электродов. Проведено моделирование распределения полей в фантоме спинного мозга, приведены характеристики предлагаемой системы, структурное и схемотехническое решение. Адекватность моделирования оценивалась в ходе стендового эксперимента на цилиндрическом фантоме. Проведено пилотное тестирование на лабораторном животном.
Ключевые слова: стимуляция спинного мозга; временная интерференция; нейромодуляция; компьютерное моделирование.

Временная интерференция — это метод нейростимуляции, который использует генерируемые поверхностными электродами высокочастотные электрические поля для стимуляции глубоких нейронных структур, не затрагивая поверхностные, нецелевые структуры. Данный метод может иметь клиническое применение в области реабилитации после травм спинного мозга. Он может помочь в восстановлении контроля моторных и висцеральных функций, что может значительно улучшить качество жизни пациентов.

Была разработана система нейромодуляции спинного мозга методом временной интерференции электрических полей с использованием имплантируемых эпидуральных электродов. В частности, была разработана программа для моделирования распределения полей в фантоме спинного мозга и изготовлен макет системы глубокой стимуляции спинного мозга. Созданная программа упрощает определение оптимальных параметров управляющих сигналов стимулятора по критериям достижения порога возбуждения в координате целевой области и минимизации паразитной активации прочих зон. Адекватность расчетов была позднее проверена на цилиндрическом фантоме в ходе стендового эксперимента.

Задача разработки аппаратной части системы заключалась в поиске схемотехнического решения и создании системы для тестирования работоспособности прототипа и проверки точности моделирования. Генерация управляющих сигналов и регистрация экспериментальных данных осуществлялась при помощи модуля ввода/вывода аналого-цифровых сигналов E-502 (L-Card) и разработанных и изготовленных преобразователей сигналов. Один из них представлял собой ключевое звено стимулятора — выходной каскад, преобразующий сигнал перед его подачей на эпидуральные электроды. Он был разработан с учетом ряда ограничений, таких как возможная интерференция сигнала вблизи стимулирующих электродов.

Для тестирования макета и проверки результатов моделирования была изготовлена система позиционирования стимулирующих и регистрирующих электродов на поверхности и в объеме цилиндрического фантома, заполненного

физиологическим раствором, с использованием трехмерного роботизированного манипулятора, позволившая оценить распределение потенциалов в объеме.

В ходе пилотного тестирования на лабораторной крысе была экспериментально подтверждена работоспособность макета и эффективность метода временной интерференции применительно к активации глубоких структур спинного мозга, связанных с моторной функцией. Также было проведено сравнение двух паттернов стимуляции: временной интерференции синусоидальных сигналов и широтно-импульсной модулируемой временной интерференции.

УДК 621.3.049

Манжета на базе органических полупроводников для оптоэлектронной стимуляции периферических нервов

Юсуповская Е. А.[1], Марков А. Г.[1], Коновалов А. Н.[1,2], Пьявченко Г. А.[1], Телышев Д. В.[1,3]

[1] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
markov_a_g@staff.sechenov.ru
[2] Нейрохирургический центр им. Бурденко
125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16
[3] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработана полупроводниковая манжета для беспроводной стимуляции поврежденных периферических нервов. Представлены результаты проведения *in vitro* и *in vivo* исследований.

Ключевые слова: биоэлектроника; органические полупроводники; имплантируемое устройство; нейростимуляция.

Повреждение периферических нервов — одна из самых распространенных проблем в хирургии. Только в России в год требуется провести от 4 до 7 тысяч хирургических вмешательств в связи с такой травмой [1]. Для обеспечения более быстрого заживления была разработана специальная манжета для оптоэлектронной стимуляции на базе органического полупроводника. Она обеспечивает возможность беспроводной стимуляции нервов, возбуждая потенциал на устройстве только посредством световых импульсов от внешнего источника. Такая манжета представляет собой гибкую полиимидную пленку с золотым электродом (9 нм) и полупроводниковым пикселем, обеспечивающим стимуляцию поврежденного нерва при импульсе света 625 нм [2]. Материалы полупроводника — фталоцианин без металла H2Pc (30 нм) и N,N'-диметилперилен3,4,9,10-тетракарбоновый диимид PTCDI (30 нм) — подобраны из расчета оптимальной эффективности под воздействием импульсов света с длиной волны в окне прозрачности биологических тканей.

Для обеспечения эффективной стимуляции клетки необходимо подвести до 50 мВ для возбуждения потенциала действия. Индуцируемое фото ЭДС манжеты зависит от интенсивности светового импульса и составляет около 250 мВ для однослойного полупроводника на поверхности устройства, соответственно, может обеспечить инициации потенциала действия клеток даже на расстоянии от полупроводникового пикселя.

Эффективность такого устройства уже доказана в ходе проведения экспериментов *in vitro* на клеточных культурах mpf и neuro2A. При стимуляции плотность населения клетками увеличивалась до двух раз в сравнении с этой же клеточной культурой без проведения стимуляции. При проведении эксперимента *in vivo* на седалищном нерве крыс линии Wistar проводимость рассеченного нерва у крыс после ежедневной стимуляции в течение трех месяцев была значительно лучше, чем у сшитых рассеченных нервов без проведения стимуляции.

Литература

1. Говенько Ф. С. Хирургия повреждений периферических нервов. — СПб.: Феникс, 2010. — С. 384.
2. Markov A., Gerasimenko A., Boromangnaeva A. K. et al. Multilayered organic semiconductors for high performance optoelectronic stimulation of cells // Nano Research, 2023. Vol. 16. № 4. P. 5809–5816. DOI: 10.1007/s12274-022-5130-8. EDN RWBVPC.

УДК 681.326.3

Аппаратно-программный комплекс управления прототипом стимулятора зрительного импланта

Белянин Р. И., Савюк В. О., Малето М. И.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

В целях обеспечения работ по созданию прототипа стимулятора импульсов тока, формирующих фосфены изображения, разработано устройство управления для прототипа макета стимулятора, обеспечивающего формирование в независимых каналах последовательностей разнополярных импульсов с заданными временными характеристиками и уровнями напряжений, подключенных к электродам для имплантации. Устройство реализовано в виде конечного автомата на основе ИС программируемой логики.

Ключевые слова: конечный автомат; генератор паттернов; интерфейс SPI.

Для тестирования и работы целого ряда цифровых и аналого-цифровых устройств, представляющих синхронные конечные автоматы, требуется реализация встроенных или внешних генераторов цифровых паттернов, реализующих тактовые диаграммы (стимулы цифровых воздействий) для переключения состояний [1]. При этом в зависимости от назначения устройств количество синхронно переключаемых каналов может достигать нескольких десятков. Наиболее простой вариант технической реализации такого генератора основывается на загрузке битов кодовой последовательности в быстродействующее статическое ОЗУ и синхронизируемый внешним тактовым сигналом процесс последовательного считывания данных. Если использовать древовидное построение памяти с вложенными фрагментами повторяющихся участков тактовой диаграммы и описанием числа повторений этих фрагментов в той же памяти, то система становится универсальной, не зависящей от объема памяти. На первом уровне программируются элементарные фрагменты тестовых последовательностей, а второй уровень содержит таблицу повторений фрагментов и адреса переходов межу фрагментами первого уровня. Такая организация памяти обеспечивает большое количество состояний выходных сигналов и высокую частоту смены состояний выходных сигналов. Пример такой разработки подробно описан в работе [2].

Данная работа представляет развитие подобных методов, в ней учитывается, что электрические стимулы в ряде случаев могут принимать отрицательные значения. Когда количество каналов, обеспечивающих определенную последовательность выходных битов, ограничено, для реализации генератора паттернов, видимо, достаточно создать поведенческое описание конечного автомата на основе программируемой логики. Для применения в макете прототипа стимулятора, формирующего импульсы тока с заданными параметрами, передающиеся на электроды, непосредственно контактирующие с клетками, отвечающими за обработку визуальной информации для формирования фосфенов изображения [3], разработано устройство управления для прототипа макета стимулятора, обеспечивающего формирование в независимых каналах последовательностей разнополярных импульсов с заданными временными характеристиками и уровнями напряжений, подключенных к электродам зрительного импланта.

В данной аппаратной реализации данные, считанные по протоколу UART, разделяются на несколько пакетов. Данные, определяющие временные параметры стимуляции, передаются в модуль генератора импульсов, который запускает работу загружаемого декрементного счетчика тактовых импульсов, число которых соответствует длительности импульсов или длительности интервалов между ними. Аналоговые параметры стимуляции составляют исходную информацию для модуля логики, который формирует посылки интерфейса SPI для управления внешними цифроаналоговыми преобразователями, встроенными в макет стимулятора.

В результате на основе программируемой логики семейства Arty-7 разработано устройство управления прототипом макета стимулятора зрительного импланта, в котором реализованы следующие характеристики:

1) время установки сигнала с ЦАП 25 нс;
2) длительность импульсов и пауз до 0,1 мкс;
3) количество разнополярных импульсов в пачке 1–150 шт.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание для университетов №ФГФЗ-2023-0005. Рег. № 123052400076-8).

Литература

1. Martinez A. L. H., Khursheed S., Reddy S. M. URL: https://www.researchgate.net/publication/335324891_LFSR_generation_for_high_test_coverage_and_low_hardware_overhead. DOI:10.1049/iet-cdt.2019.004.
2. Горбоконенко П. А., Зинис К. А., Певцов Е. Ф., Чернокожин В. В. Программируемый генератор тестовых последовательностей // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы, 2012. — Вып. 2 (229). — С. 97–103.
3. Liu X., Chen P., Ding X., Liu A., Li P., Sun C., Guan H. A narrative review of cortical visual prosthesis systems: the latest progress and significance of nanotechnology for the future // Ann. Transl. Med., 2022. 10 (12): 716. DOI: 10.21037/atm-22-2858.

УДК 007.52 + 621.865.8 + 615.825

Разработка управляющих биоприближенных сигналов экзоскелета руки методами ИИ

Гончарова А. В.[1,2], Карнуп Г. А.[1]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
agoncharova@niime.ru

Представлены результаты исследования по разработке нейросетевого адаптивного алгоритма управления экзоскелетом руки для свободного движения с предсказанием в режиме реального времени и калибровкой под амплитудные возможности мышц пользователя.

Ключевые слова: электромиография; реабилитация; поддержка движения руки; экзоскелеты; нейросетевой алгоритм.

В России в 2022 году порядка 500 тыс. человек перенесли инсульт. Их количество будет расти в среднем более чем на 5 % в год, на что влияет увеличение численности населения, среднего возраста и одновременно рост количества хронических болезней и повышение среднего уровня стресса в целом [1]. На данный момент существует острая необходимость в автоматизированной реабилитации, отсутствие которой сужает поток пациентов до 5000 человек в год.

Актуальна задача разработки реабилитационной системы для восстановления двигательной активности верхних конечностей пациентов, которые перенесли инсульт, в частности, одним из наиболее эффективных методов — с применением экзоскелета верхней конечности [2–4]. Основная причина отсутствия решения для свободного движения рукой заключается в отсутствии управляющих алгоритмов, сравнимых по вариативности и мобильности с разнообразием двигательных паттернов руки и сигналов активации мышечной системы.

В работе предлагается один из подходов к решению проблемы — использование нейросетевых методов генерации траекторий движения экзоскелета управляющими биоприближенными сигналами. Рассмотрены различные способы извлечения полезных признаков из электромиографического (ЭМГ) сигнала в целях их дальнейшей подачи в нейросетевой алгоритм. Наиболее продуктивными показали себя полосовая фильтрация частот и метод частотной выборки [5].

Для того чтобы учесть взаимное влияние параметров ЭМГ-сигналов и координатной зависимости, использована архитектура self-attention. Данный механизм позволяет оценить как влияние мод в разный момент времени в пределах одной мышцы, так и влияние мод разных мышц друг на друга. Благодаря архитектуре self-attention, применяемой к токенизированным параметрам, на математическом уровне удается учесть сразу три фактора: взаимное влияние других мышц, временные интервалы между модами и последовательность частот.

Разработан сенсор регистрации ЭМГ-сигнала с нескольких мышц, и на языке Python с применением программного пакета PyTorch реализован нейросетевой алгоритм обработки и расчета предсказания в режиме реального времени с калибровкой данных под амплитудный потенциал мышц пользователя [6].

Литература

1. Охунжанова М. З. Реабилитация больных, перенесших инсульт // Barqarorlik va Yetakchi Tadqiqotlar Onlayn Ilmiy Jurnali, 2022. Vol. 2. № 4. P. 78–85.
2. Красников Г. Я. Возрождение наукоемких отраслей промышленности: реальность или фантазия? // Пути стабилизации экономики России. — Москва, 1999. — С. 162–174.
3. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано-и микросистемная техника, 2009. — № 1. — С. 2–5.
4. Бижанов Д. и др. Обзор и анализ экзоскелетов верхней конечности для реабилитации // Вестник КазАТК, 2023. — Т. 124. — № 1. — С. 315–323.
5. Kozyr P. S. et al. Analysis of the effectiveness of machine learning methods in the problem of gesture recognition based on the data of electromyographic signals // Computer research and modeling, 2021. Vol. 13. № 1. P. 175–194.
6. Гончарова А. В., Герасименко А. Ю. Исследование электромиографических сигналов пациентов в постинсультном состоянии для разработки алгоритма // Микроэлектроника и информатика — 2023, 2023. — С. 104–111.

УДК 616.079.5:681.5

Разработка электромиографического человеко-машинного интерфейса

Гуслянцев Е. Е.[1], Зубков И. С.[2], Герасименко А. Ю.[1]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф

Разработан человеко-машинный интерфейс, представляющий собой автономное устройство с электромиографическими датчиками и адаптивным алгоритмом обработки сигнала. Устройство предназначено для людей с ограниченными способностями в целях управления электронными приборами и замера сигналов с бицепса и трицепса для определения угла разгибания локтя.
Ключевые слова: электромиография; обработка сигналов; автономные носимые устройства; датчики.

Разработка человеко-машинного интерфейса имеет особую актуальность для задач реабилитации людей, у которых ограничена или отсутствует возможность управления персональным компьютером с помощью клавиатуры и мыши. Существующие компьютерные манипуляторы для людей с ограниченными возможностями имеют ряд недостатков. Такие устройства имеют высокую стоимость из-за сложной конструкции, вызывают проблемы при установке драйверов и имеют низкую совместимость с популярными операционными системами, вынуждая использовать специализированный компьютер, а их механические элементы подвержены износу.

Работа посвящена разработке электромиографического человеко-машинного интерфейса, лишенного вышеперечисленных недостатков. Интерфейс работает за счет снятия электромиографического сигнала с разработанными многоразовыми сухими электродами для датчиков, которые считывают активность бицепса, трицепса и запястья, что исключает механическое взаимодействие [1, 2]. Сигналы обрабатываются и конвертируются в команды Human Interface Device, обеспечивая совместимость с настольными и мобильными операционными системами. Время отклика не превосходит 500 мс. На стороне микроконтроллера используются алгоритмы фильтрации и анализа сигнала, частота считывания которого составляет 1 кГц. За счет выявления из сигнала дополнительных факторов, которые позволяют определить положение руки, было реализовано управление курсором мыши одной рукой с минимизацией количества датчиков до двух с шестью электродами.

Установлено, что частота электромиографического сигнала, считываемого с мышц-антагонистов бицепса и трицепса, зависит от угла разгибания локтя. Если рука разогнута в локте до упора, то частота снятого сигнала повышается. Таким образом, исследованное поведение сигнала на бицепсе и трицепсе можно применить для определения угла разгибания локтя, не используя дополнительных механических элементов. Разработанное устройство предназначено для людей с ограниченными способностями в целях управления электронными устройствами.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект FSMR-2024-0003).

Литература

1. Nikitina N. A., Ryabkin D. I., Suchkova V. V., Kuksin A. V., Pyankov E. S., Ichkitidze L. P., Maksimkin A. V., Kitsyuk E. P., Gerasimenko E. A., Telyshev D. V., Bobrinetskiy I., Selishchev S. V. and Gerasimenko A. Yu. Laser-Formed Sensors with Electrically Conductive MWCNT Networks for Gesture Recognition Applications // Micromachines, 2023. Vol. 14 (6). P. 1106.
2. Gerasimenko A. Yu. et al. Interfaces Based on Laser-Structured Arrays of Carbon Nanotubes with Albumin for Electrical Stimulation of Heart Cell Growth // Polymers, 2022. Vol. 14 (9). P. 1866.

УДК 621.3.049

Предсказание слова при натуралистическом восприятии речи

Лехницкая П. А.
ООО «Нейроиконика Ассистив»;
Казанский (Приволжский) федеральный университет
lekhnitskaya.polina@gmail.com

Получена примерная модель электрофизиологической активности головного мозга при прослушивании речи. Результаты работы модели были сравнены с результатами алгоритма обработки естественного языка в схожей задаче.
Ключевые слова: mask modelling; mTRF; ЭЭГ; естественная обработка языка.

Человеческий мозг — сложная динамическая система, непрерывно обрабатывающая входную информацию. Моделирование подобной системы представляется трудной задачей, но при ее решении возможно как лучше изучить особенности работы головного мозга, так и на основе этой работы спроектировать новые способы оптимизации существующих алгоритмов, применяемых в совершенно различных областях.

Целью текущего исследования является изучение связи между функцией ответов ЭЭГ во время естественного восприятия речи, оценкой уверенности обученной языковой модели. Предполагается, что связь между сигналами ЭЭГ и естественного восприятия речи обученной языковой модели существует. Ожидаемым результатом является моделирование указанной связи.

Была предпринята попытка к изучению связи между функцией ответов ЭЭГ и пропущенными словами во время естественного восприятия речи; возможностью моделирования данной электрофизической активностью и сопоставления полученной модели с обученными языковыми моделями в схожей задаче. Статистически значимые различия были получены в электродах T3, T5 и P3. Алгоритмы классификации машинного обучения также показывают четкие различия в сигналах ЭЭГ во время понимания аудиотекста. Были получены смоделированные ответы мозга для гамма- и бета-ритмов; данная модель была сравнена с языковой моделью. Полученный результат можно рассматривать как возможное решение для разработки семантической сети для речевой реабилитации среди пациентов с некоторыми типами афазии. Одним из возможных будущих направлений исследования является изучение процессов коммуникации в этой парадигме и увеличение размера выборки.

Литература

1. Bastos A. M., Lundqvist M., Waite A. S., Kopell N., Miller E. K. Layer and rhythm specificity for predictive routing. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020. 117 (49), 31459–31469.
2. Bialas Ole, Jin Dou, Edmund C. Lalor. mTRFpy: A Python package for temporal response function analysis // Journal of Open Source Software, 2023, 8.89: 5657.
3. Lindboom E. et al. Incorporating models of subcortical processing improves the ability to predict EEG responses to natural speech // Hearing Research, 2023. 433: 108767.

УДК 681.51

Система управления объемным расходом для устройств микрофлюидики

Михалин Д. А.[1], Ечеистов В. В.[1,2], Рыжков В. В.[1], Алибеков Р. Ш.[1], Рыжиков И. А.[1], Родионов И. А.[1,2]

[1] МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
irodionov@bmstu.ru
[2] ВНИИА им. Н. Л. Духова
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22

Показан программно-аппаратный комплекс управления объемным расходом в канале микрофлюидного чипа. Описаны алгоритмы, позволяющие получить высокую стабильность потока. Представлен комплекс, функционирующий в разомкнутом и замкнутом по расходу режиме и развивающий точность стабилизации в 0,2 мкл/мин.

Ключевые слова: микрофлюидика; орган на чипе; управление потоками; системы автоматического управления; микрофлюидные системы управления.

Системы «орган на чипе» считаются перспективной технологией для решения задачи тестирования новых лекарств и изучения иммунных реакций на клетках. Для оперирования системами органов на чипе требуется решить задачу контроля потоков между клеточными культурами, управляя подачей и обновлением питательной среды, прецизионно дозируя расход [1]. Использование перистальтических насосов ограничено высокой нестабильностью потока вследствие дозирования жидкости роликами, а шприцевых систем — дискретным движением шагового двигателя [2]. В пневматических регуляторах вталкивающую силу разности давлений на краях микрофлюидного канала создает воздушная среда в резервуаре с жидкостью. Пневматическое управление позволяет достичь высоких точностей стабилизации объемного расхода, однако накладывает ограничения в виде необходимости внешнего источника сжатого воздуха.

Для создания портативных прецизионных микрофлюидных приборов необходимо управлять потоками жидкостей без внешнего компрессора. Подобное решение построено по принципу регулятора давления, в котором пневматический насосный элемент включен в прямую цепь управления, что позволяет избавиться от внешнего источника сжатого воздуха. Для обеспечения желаемого расхода жидкости происходит замыкание обратной связи по расходу и давлению с достаточной частотой оцифровки АЦП для синтеза алгоритмов управления на основе фильтрующей оценки производных. Разработанный комплекс позволяет стабилизировать потоки в диапазоне расходов от 0,4 до 35 мкл/мин с точностью хуже 0,2 мкл/мин по 3σ на типовом общем гидравлическом сопротивлении канала чипа порядка 10^{11} кг/м^4 с.

Литература

1. Li M., Zhu M., Huang R. et al. Blood–brain barrier microfluidic chips and their applications // Organs-on-a-Chip, 2023. Vol. 5. P. 100027. DOI: 10.1016/j.ooc.2023.100027. EDN SDEJSD.
2. Heo Y. J. et al. Tuning-free controller to accurately regulate flow rates in a microfluidic network // Scientific reports, 2016. Vol. 6. № 1. P. 23273. URL: https://doi.org/10.1038/srep23273.

УДК 544.532.122

Композиционный материал для биомедицинской электроники

Оцупко Е. П.[1], Савельев М. С.[1,2], 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

Разработана технология создания композитного биосовместимого проводящего материала на основе биополимеров с добавлением углеродных нанотрубок. Формирование осуществляется методом двухфотонной полимеризации под воздействием лазерного излучения на длине волны 1070 нм.

Ключевые слова: двухфотонная полимеризация; композиционный материал; биомедицинская электроника; углеродные нанотрубки; биополимер.

Развитие биомедицинской электроники осложнено малым числом электропроводящих материалов, обладающих биосовместимостью. В настоящее время для биоэлектроники в основном используют биоинертные металлы и кремний, однако их механические свойства сильно отличаются от свойств нативной ткани. Решением проблемы могут стать гидрогели из биосовместимых полимеров. Проводимость таких материалов обеспечивается добавлением электропроводящего синтетического полимера либо внедрением электропроводящего наполнителя. Электропроводящие гидрогели применяются в разработке биосенсоров [1], гибких микроботов [2] и клеточных каркасов для регенерации тканей [3].

В данной работе представлена технология создания композитного биосовместимого электропроводящего материала методом двухфотонной полимеризации. Микрофабрикация основана на инициировании многофотонных процессов при использовании высокоинтенсивного лазерного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне. Полимеризация представленного материала происходит под воздействием наносекундного лазерного излучения на длине волны 1064 нм.

В состав гидрогеля входят бычий сывороточный альбумин (БСА), желатин, одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) и органический краситель эозин Н. БСА был выбран как основообразующий компонент по причинам отличной биосовместимости, легкой доступности, способности к ферментативному разложению. Желатин играет роль гелеобразующего агента. Значение динамической вязкости подготовленного гидрогеля составило 4,81 мПа·с. По результатам исследования нелинейно-оптических свойств методом z-сканирования было выявлено, что увеличение вязкости образца приводит к уменьшению коэффициента преломления и, как следствие, увеличению двухфотонного поглощения образца. Это в свою очередь позволило уменьшить необходимую мощность лазерного излучения для достижения нужной энергии полимеризации. Для уменьшения пороговой экспозиции лазерного излучения в образец также добавлен эозин Н, играющий роль фотоинициатора. В качестве фотоактивирующих компонентов рассмотрены несколько органических красителей: бенгальский розовый, рибофлавин, конго красный и эозин Н. Последний из них выбран на основании результатов исследования

оптических спектров и нелинейных оптических характеристик веществ. ОУНТ выступают в роли наполнителя гидрогелевой матрицы, образуя при воздействии лазерным излучением единую объемную пронизывающую сеть, обеспечивающую электропроводность материала.

В качестве источника излучения при полимеризации использовался лазерный комплекс на основе иттербиевого лазера «ОКБ Булат». Образец помещался на стеклянную подложку, формирование структуры происходило в форме квадрата со стороной 5 мм, скорость сканирования — 240 мм/с. Характеристики лазерного излучения составили: длина волны 1070 нм, энергия 142 мкДж, частота 30 кГц и длительность импульса 100 нс.

Электрические характеристики сформированного композиционного материала исследовались четырехзондовым методом ван дер Пау. Средняя удельная электропроводность составила 21,73 мкСм·см. Представленный материал может быть использован в тканевой инженерии в качестве клеточного каркаса с электростимуляцией.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект FSMR-2024-0003).

Литература

1. Xia S. et al. A flexible, adhesive and self-healable hydrogel-based wearable strain sensor for human motion and physiological signal monitoring // Journal of Materials Chemistry B, 2019. Vol. 7. № 30. P. 4638–4648.
2. Wang H. et al. Multimode microdimer robot for crossing tissue morphological barrier // Iscience, 2023. Vol. 26. № 11.
3. Navaei A. et al. Gold nanorod-incorporated gelatin-based conductive hydrogels for engineering cardiac tissue constructs // Acta biomaterialia, 2016. Vol. 41. P. 133–146.

УДК 004.94

Моделирование и анализ конструкции микрофлюидного чипа

Варфоломеева А. А., Паршина С. Р., Пятко Л. А.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
lapyatko@edu.hse.ru

Работа посвящена построению и анализу модели напряженно-деформированного состояния мембраны микрофлюидного чипа. Мембрана, являясь наиболее подвижным элементом чипа, подвергается механическим деформациям и напряжениям, которые способствуют накоплению микродефектов и повышению риска просачивания воздуха в его каналы. С помощью компьютерной модели исследуется влияние возможных изменений конструкции мембраны на минимизацию напряжений.
Ключевые слова: микрофлюидный чип; конечно-элементное моделирование; мембрана; ПДМС; ABAQUS.

Микрофлюидный чип — это компактное устройство, широко использующееся в научных и медицинских целях для изучения биологических объектов, основанное на микрофлюидных платформах и культивировании клеток *in vitro*. Устройство представляет собой систему микроскопических каналов и полостей, позволяющую реализовывать различные операции выделения, сортировки и анализа биологической пробы. Микроканалы формируются в пластине полидиметилсилоксана (PDMS), которая наклеивается на предметное стекло. Для обеспечения движения жидкости внутри каналов используется система пневмонасосов, мембраны которых также формируются в PDMS-пластине.

В процессе эксплуатации воздух из пневмосистемы просачивается через мембраны, что приводит к образованию пузырьков внутри микрофлюидной системы, которые затрудняют прокачку по ней жидкости [1, 2]. Одной из возможных причин этого эффекта может быть износ PDMS, приводящий к появлению микродефектов, приводящих к пропусканию воздуха.

В работе представлена компьютерная модель мембраны микрофлюидного чипа, которая позволяет проанализировать напряженно-деформированное состояние мембраны. Была исследована зависимость максимального напряжения от параметров мембраны, также было выявлено наличие концентраторов напряжений и предложены конструкторские решения по их устранению.

Литература

1. Michael Johnson, Greg Liddiard, Mark Eddings, Bruce Gale. Bubble inclusion and removal using PDMS membrane-based gas permeation for applications in pumping, valving and mixing in microfluidic devices // Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009. № 19. P. 1–9.
2. Lamberti A., Marassoab S. L., Cocuzzaab M. PDMS membranes with tunable gas permeability for microfluidic applications // RSC Adv., 2014. № 4. P. 61415.

УДК 004.932.72:615.47:535.8

Алгоритм обработки цифровых фотографий при визуализации вен в ближнем ИК-диапазоне

Ремизов Н. В., Якименко Д. С.
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
443086, г. Самара, Московское ш., 34
erenv97@yandex.ru

Проанализированы существующие методы обработки изображений, полученных при визуализации вен в ближнем инфракрасном диапазоне. Оценена эффективность существующих методов. Составлена база данных изображений. Разработан алгоритм обработки изображений, позволяющий увеличить контрастность кровеносных сосудов относительно кожи.
Ключевые слова: визуализатор вен; ближний ИК-диапазон; OpenCV; CLAHE; билатеральная фильтрация; фильтр Собеля.

Современные методы медицинской лабораторной диагностики зачастую требуют проведения венепункции, что может вызывать затруднения, когда вены не видны невооруженным глазом. Это потенциально приводит к ошибкам в заборе крови и интерпретации результатов анализов. Интерес к мониторингу вен также растет в спорте, особенно в пауэрлифтинге, где высокое давление при тяжелых подъемах может способствовать развитию варикозного расширения вен. Мониторинг изменений вен становится все более важным для спортсменов и тренеров.

Спрос на неинвазивные устройства, визуализаторы вен, растет. Хотя современные методы оптической визуализации вен имеют перспективы, существует ряд недостатков этих методов: малая глубина визуализации, малая контрастность, отсутствие стандартизированных параметров устройств. Встает задача разработки стандартизированного метода визуализации вен, включающего в себя как аппаратную стандартизацию, так и стандартизацию в вопросах обработки изображений [1].

В ходе данной работы были рассмотрены существующие подходы к обработке изображений при визуализации вен [2–4]. В частности, оценена эффективность следующих методов: методы улучшения гистограмм, линейные частотные фильтры, медианные фильтры, алгоритмы и фильтры выделения границ, вейвлет-фильтрация.

При помощи системы организации конкурсов по машинному обучению Kaggle была получена база данных, состоящая из 100 изображений предплечий различных людей, зарегистрированных в ближнем ИК-диапазоне [5]. В данной базе представлены предплечья с различными изъянами: слабой различимостью вен, татуировками, повышенной волосистостью. 70 из 100 изображений имеют разметку-маску вен.

Составлен алгоритм, включающий в себя обработку изображения путем последовательного применения следующих шагов: контрастно-ограниченная адаптивная гистограммная эквализация (CLAHE), билатеральная фильтрация, гауссов фильтр высоких частот, фильтрация Собеля по осям XY, CLAHE. Работоспособность алгоритма была проверена средствами библиотеки OpenCV. Параметры алгоритма были подобраны вручную таким образом, чтобы получить высокую

различимость вен на фоне кожи рук во всей базе данных. Результаты работы алгоритма для пяти изображений из базы данных приведены на рис. 1 и 2.

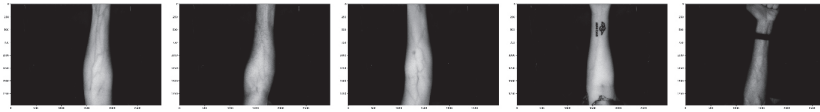


Рис. 1. Исходные изображения

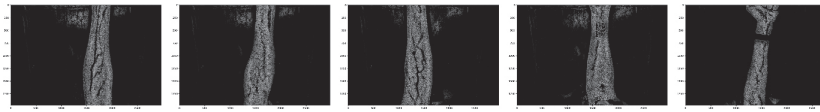


Рис. 2. Результаты работы алгоритма

Разработанный алгоритм позволяет существенно повысить контрастность кровеносных сосудов относительно окружающих тканей для всех изображений в базе данных. Быстродействие алгоритма позволяет применять обработку изображений в реальном времени, что является необходимостью для данного класса приборов.

Литература

1. Remizov N. V. et al. 3D Printed Modular Vein Viewing System Based on Differential Light Absorption in the Near Infrared Range // Journal of Biomedical Photonics & Engineering, 2023. Vol. 9. № 2. P. 8.
2. Ahmed K. I., Mohamed H. H., Islam M. R. A Real Time Vein Detection System // The Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJEECS), 2018. Vol. 10. № 1. P. 9.
3. Francis M. et al. A novel technique for forearm blood vein detection and enhancement // Biomedical Research, 2017. Vol. 28. № 7. P. 7.
4. Ozkan H. et al. A portable multispectral vein imaging system // Journal of electrical engineering, 2023. Vol. 74. № 1. P. 6.
5. Forearm Veins (NIR) (Kaggle Dataset) [Electronic resource] / KAGGLE.COM: Machine Learning and Data Science Community. URL: https://www.kaggle.com/datasets/chrismnugent/forearm-veins-nir (дата обращения: 07.06.2024).

УДК 621.3

Исследование и разработка датчика секвенирования на базе отечественной КМОП-технологии 180 нм

Рожнов Д. А., Калёнов А. Д.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
derodens@mail.ru

Спроектирован и разработан датчик секвенирования для определения точной последовательности нуклеотидов в нити ДНК на базе отечественной КМОП-технологии 180 нм. Приведены характеристики датчика и краткое описание принципов работы.
Ключевые слова: ISFET; КМОП; ДНК; секвенирование.

Секвенирования ДНК — ключевое современное исследование в области молекулярной биологии и генетики. Секвенирование ДНК позволяет детально определить порядок нуклеотидных оснований в геноме организма, что имеет фундаментальное значение для понимания генетической информации. Секвенирование превращает биологическую молекулу в текстовый файл, который можно рассматривать и изучать подобно обычному тексту. Современные методы секвенирования порождают огромное количество коротких фрагментов, которые затем можно сравнивать с уже существующим геномом, выявляя различия в последовательности «текста» ДНК. Сравнивая ДНК различных клеток, можно найти поврежденный ген. Это важный шаг на пути к выявлению генетических заболеваний. К числу тяжелых заболеваний относятся муковисцидоз, клеточная анемия и др.

Существующие методы секвенирования ДНК основаны на окрашивании с помощью флуоресцентного материала. Окрашивание — это утомительный процесс, который затрудняет проведение секвенирования в больших масштабах. Для преодоления недостатков традиционных методов секвенирования ДНК используются ионоселективные полевые транзисторы (ISFET). ISFET обеспечивает возможность получения изображения, что делает секвенирование ДНК более точным. Выбран ISFET с плавающим затвором, суть которого заключается в выносе чувствительной части датчика на поверхность пассивации интегральной схемы. Каждый ISFET расположен в собственной лунке. Форма лунки над ISFET — усеченный конус. Цепочка ДНК фрагментируется на мелкие части, образуя микробусины, которые помещаются в лунки. В процессе полимеризации преобразуется изменение pH в соответствующее выходное напряжение.

Суть передачи сигнала основывается на принципе работы приборов с зарядовой связью (ПЗС). Принцип работы ПЗС основан на изменении заряда при подаче напряжения на электрод. В устройстве ПЗС есть кремниевая подложка, на которой образован слой диэлектрика и электрод, выведенный из него. Если на него подавать высокий уровень напряжения, то носители заряда будут проникать вглубь структуры, тем самым образовывая потенциальную яму, так как дырки будут отсутствовать на границе разделов. При внедрении второго электрода в непосредственной близости к первому и подачt на него более высокого потенциала электроны будут переходить из одной ямы в другую. Основываясь на вышеупомянутой

механике, можно создать структуру из электродов, по которым сигналы будут проходить большие расстояния. Управлять данной структурой возможно благодаря всего трем шинам.

Проделана работа по изучению состояния современных технологий в сфере секвенирования, технической документации на данную тематику. Спроектированы и разработаны ISFET-структура и другие блоки, из которых в последующем создан датчик секвенирования, а также разработана тестовая структура для определения характеристик ISFET при различных вариациях, состоящая из четырех ISFET-структур с различными составляющими. Датчик секвенирования состоит из 5017600 ISFET. Напряжение питания составляет 1,8 В. Напряжение чувствительности — 500 мВ. Ток потребления составляет 112 мА. Занимаемая площадь — 249,6 мм^2.

Литература

1. Кузнецов А. Е. Гетерогенные биосенсоры на основе полевых структур: дис. ... док. тех. наук: 2.2.2. — Москва, Нац. исслед. ун-т МИЭТ, 2023. — С. 241.
2. Зубов В. В. Секвенирование по Ротбергу (потенциал полупроводникового секвенирования) // Биомика, 2013. — № 1–2. — С. 48–61.
3. Неизвестный С. И., Никулин О. Ю. Приборы с зарядовой связью. Устройство и основные принципы работы // Специальная техника, 1999. — № 4.

УДК 621.3.049

Разработка интероцептивного тренинга с использованием биологической обратной связи

Русинова А. В.[1], Аксиотис В. А.[1], к. б. н., Володина М. А.[1,2], д. ф.-м. н., Осадчий А. Е.[1,2,3,4]

[1] Центр биоэлектрических интерфейсов, НИУ ВШЭ
101000, г. Москва, Кривоколенный пер., 3а
arusinova@hse.ru
[2] Федеральный центр мозга и нейротехнологий ФМБА РФ
117513, г. Москва, ул. Островитянова, 1, стр. 10
[3] Научно-исследовательский институт искусственного интеллекта AIRI
123112, г. Москва, Пресненская наб., 6, стр. 2
[4] ООО «ЛИФТ Центр»
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», ул. Нобеля, 5

5-дневный интероцептивный тренинг, основанный на методе биологической обратной связи, повышает субъективный уровень альтруизма, внимательности и осознанности участников. Эти данные открывают новые возможности для применения биомедицинской электроники в психофизиологии.

Ключевые слова: интероцепция; тренинг; физиология; эмоциональные процессы.

В последние годы тренинги, основанные на принципе биологической обратной связи, становятся все более востребованы. С их помощью можно повысить навыки саморегуляции физиологического и психоэмоционального состояния. Одним из новых направлений стали интероцептивные тренинги, в процессе прохождения которых участники учатся замечать свое сердцебиение. Ранее было показано, что после прохождения такого тренинга у участников наблюдается повышение интероцептивной точности. Причем эффект наблюдался как после прохождения четырех сессий по 40 минут [1], так и после тренинга длительностью 20 минут. В исследовании прохождение тренинга помимо повышения уровня интероцепции вызывало снижение уровня тревожности. Известно, что нарушение осознанной интероцепции наблюдается при ряде психических расстройств и соматических заболеваний. Это дает основание предположить, что повышение способности воспринимать сигналы собственного тела может уменьшить проявление симптомов этих заболеваний.

Целью нашей работы было создать интероцептивный тренинг, который приводит к повышению интероцептивной точности, и оценить его влияние на психоэмоциональное состояние участников.

Интероцептивный тренинг включал пять сессий, которые проводили ежедневно. Каждая сессия состояла из семи тренировочных блоков, в течение которых перед участниками была поставлена задача нажимать кнопку после указанного на экране количества ударов сердца (2, 3 или 4 удара). Каждый блок состоял из двух фаз по 24 испытания: в течение первой фазы через 200 мсек после обнаружения R-зубца, что соответствует времени, когда человек ощущает сокращение сердца, на экране предъявлялось анимированное изображение сердца в течение 200 мсек,

во второй фазе обратная связь о сокращении сердца не предъявлялась. Аналогичный протокол тренинга использовали в исследовании [2]. Перед каждым испытанием на экране отображалась инструкция, через сколько ударов сердца необходимо нажать на кнопку. Ответ считался правильным, если участник нажимал кнопку в течение 450 мсек после детекции R-зубца. После каждого испытания участники получали обратную связь в виде зеленой галочки (правильный ответ) или красной буквы «Х» (неправильный ответ). Между фазами участникам давали письменную инструкцию в течение 30 секунд фокусировать внимание на ощущениях в своем теле, сделать глубже и медленнее вдохи и выдохи. За этим следовала 15-секундная пауза. Каждая сессия тренинга длилась примерно 40 минут.

Во время проведения тренинга первый ЭКГ-электрод крепился на среднеключичной линии с правой стороны от грудины, второй — с левой стороны по подмышечной линии.

В дальнейшем мы планируем включить в исследование 40 человек с прохождением предварительного и посттестирования. Тестирование будет включать в себя психологическое исследование, анализ интероцептивной точности, измерение ЭЭГ, ЭКГ, ЭМГ, кожно-гальванической реакции и респирометрии.

Различия в баллах психологического тестирования между группами до и после вмешательства были проанализированы с использованием дисперсионного анализа для повторных измерений (repeated measures ANOVA).

Результаты пилотного исследования, в котором приняли участие 11 человек (5 человек в экспериментальной группе, 6 — в контрольной), показали повышение субъективного уровня альтруизма ($p = 0{,}022$, $F = 6{,}805$), внимательности и осознанности в повседневной жизни ($p = 0{,}016$, $F = 7{,}738$) у участников тренинга.

С 1960-х годов известно, что физическое восприятие влияет на эмоции, а эмоциональные процессы — на поведение, особенно на принятие решений (гипотеза Антонио Дамасио). Мы предполагаем, что разработанный тренинг поможет участникам лучше понимать и регулировать внутренние сигналы своего тела. Это, в свою очередь, может увеличить их способность использовать более эффективные поведенческие стратегии.

Исследование осуществлено в рамках программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Литература

1. Sugawara A., Terasawa Yu., Katsunuma R., Sekiguchi A. Effects of interoceptive training on decision making, anxiet. and somatic symptoms // BioPsychoSocial Medicine, 2020. Vol. 14. № 1. P. 1–8. DOI: 10.1186/s13030-020-00179-7. EDN MOHNPB.
2. Meyerholz L., Irzinger J., Witthöft M., Gerlac A. L. and Pohl A. Contingent biofeedback outperforms other methods to enhance the accuracy of cardiac interoception: A comparison of short interventions // Journal of behavior therapy and experimental psychiatry, 2019. Vol. 63. P. 12–20.

УДК 004.925.84

Проектирование трехмерных моделей матки и шейки матки на основе данных изображений УЗИ

Шалобыта Е. Н., Корнеева И. П.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
enshalobyta@stud.etu.ru

Разработана методика получения параметрических твердотельных моделей матки и шейки матки по данным ультразвуковых изображений. Исследован потенциал их применения для выявления факторов наступления неблагоприятных перинатальных исходов.

Ключевые слова: параметрическое моделирование; твердотельные модели; беременность; преждевременные роды; биомеханика тканей.

Понимание тканевой биомеханики репродуктивных процессов играет ключевую роль в изучении нормального протекания беременности и выявления возможных аномалий на всех ее сроках. Несмотря на важность вопроса и растущий интерес к нему ученых и медиков, на сегодняшний день по-прежнему наблюдается нехватка клинических и фундаментальных научных исследований в данной области, что существенно осложняет задачу предупреждения и профилактики наступления патологических состояний.

Одной из доступных альтернатив прямым исследованиям физиологии беременности, проведение которых значительно ограничено особенностями ее протекания, является компьютерное 3D-моделирование. Создание параметрических твердотельных моделей обосновано, с одной стороны, их удобством (одна исходная модель может быть легко адаптирована под индивидуальные параметры), с другой стороны, их простотой и наглядностью, а также возможностью преобразования в числовые модели, пригодные для биомеханического моделирования.

Разработанный метод получения параметрических моделей основан на анализе изображений, полученных при проведении ультразвукового исследования (УЗИ) беременных женщин. Данные УЗИ являются более предпочтительными исключительно из практических соображений — как относительно недорогого и широко распространенного исследования с низким уровнем риска. Для получения всех необходимых анатомических параметров, используемых при построении трехмерных моделей, используется несколько изображений УЗИ, выполненных в разных (аксиальной и сагиттальной) плоскостях и при разном положении тела пациента. В число измеряемых параметров входят: диаметр матки, взятый в разных направлениях, толщина стенок матки, а также длина шейки матки (диаметр цервикального канала) — основной на сегодняшний день показатель, использующийся для выявления пациентов с высоким уровнем вероятности наступления неблагоприятного перинатального исхода [1].

Полученные трехмерные модели в дальнейшем могут быть преобразованы в численные для оценки механических нагрузок, расчета напряжения и деформации тканей. Именно по этим данным возможно определить анатомические

и механические изменения, подходящие для прогнозирования исхода беременности и предупреждения развития патологий.

Метод параметрического моделирования дает возможность быстрого создания твердотельных моделей матки и шейки матки по индивидуальным значениям показателей для каждого отдельного случая. Вместе с тем он включает в себя ряд упрощений, делающих его реализацию более доступной в ограниченных условиях [2].

Хотя метод не является строгим отражением естественной анатомии матки и шейки матки во время беременности, тем не менее он может стать основой для проведения исследований по расчету механической нагрузки и напряжения в тканях матки и шейки матки во время беременности.

Создание трехмерных моделей репродуктивных органов (матки и шейки матки) в период гестации позволяет получить более полное представление об их эволюции на протяжении беременности, изучить структурные изменения в окружающих органы тканях и способствует улучшению понимания общей биомеханики процесса. Все это в совокупности поможет разработать рациональные методы лечения патологий беременности, а также откроет новые возможности для разработки биомедицинских устройств, облегчающих прогнозирование развития неблагоприятных перинатальных исходов.

Литература

1. Louwagie E. M. et al. Longitudinal ultrasonic dimensions and parametric solid models of the gravid uterus and cervix // PLoS ONE, 2021. 16(1): e0242118.
2. Yoshida K. Bioengineering and the cervix: The past, curren. and future for addressing preterm birth // Current Research in Physiology, 2023. Vol. 6.

УДК 004.45

Анализ портируемости современного ПО для запуска микросервисных приложений и аналитики данных на платформу RISC-V

Степина Н. О., Шемаев К. Е., Шеремет С. С., Крючкова К. Ю., Ребдев П. А., Мороз Д. Д., Аверич В. Е., Черепанов Н. И.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б

Подготовка экспериментального стенда к запуску приложений с микросервисной архитектурой на основе компьютеров с процессорной архитектурой RISC-V. Инсталляция программного обеспечения для портирования микросервисов.

Ключевые слова: RISC-V; операционные системы; аппаратное обеспечение; микросервисы; портирование; экспериментальный стенд.

Введение

Микросервисные архитектуры становятся все более популярными в современных приложениях. Такие приложения могут демонстрировать различную эффективность в зависимости от аппаратной платформы. В связи с этим становится актуальной задача портирования ПО на различные платформы, в частности на перспективную архитектуру RISC-V. Данная архитектура отличается от ARM и x86 тем, что является открытой для использования. Архитектуры RISC имеют ряд преимуществ по сравнению с CISC [1]. Вот некоторые из них:

- производительность;
- энергоэффективность;
- простота программирования;
- меньший объем кода.

Постановка задачи

Перед нами стоит задача исследования портируемости микросервисных приложений на платформу RISC-V. Для проведения данного исследования предполагается произвести подготовку аппаратного и программного обеспечения:

- собрать экспериментальный стенд, основанный на двух компьютерах на платах *Lichee Pi 4A*;
- выбрать и установить ОС для стенда;
- установить окружение для работы над поставленной задачей;
- тестирование стенда в различных сценариях.

Для сборки тестового стенда необходимо воспользоваться комплектом сборки для двух ПК, в каждом из которых содержится:

- Lichee pi 4A;
- корпус с Wi-Fi-антенной;
- кулер с термоинтерфейсом;
- комплектный дисплей;
- JTAG-отладчик;
- стойка для дисплея.

Выбор ОС

Следующий важный этап — выбор ОС. Был проведен сравнительный анализ операционных систем по следующим критериям [2]:

- поддержка архитектуры RISC-V;
- ОС общего назначения;
- поддержка контейнеризации и многопоточности;
- открытый исходный код;
- популярность как среди серверов, так и обычных пользователей ПК.

В результате выбор остановился на Linux Debian, потому что его рекомендует производитель Lichee Pi 4A для своей платы, а также потому, что он открытый и поддерживает контейнеризацию.

Установка окружения

После установки ОС необходимо настроить и протестировать окружение, отвечающее нашей цели [3]:

- GCC — для установки ПО;
- Docker — для контейнеризации микросервисов;
- K3s — для оркестрации контейнеров.

Пакеты были установлены и протестированы запуском простейших программ.

Проблемы и перспективы

В ходе работы мы столкнулись с тем, что MIPI DSI не воспринимается системой. Чтобы это исправить, мы поставили по умолчанию этот видеовыход в конфигурационный файл /boot/extlinux/extlinux.conf.

Но самая главная проблема была связана с перенаправлением трафика: у нас получилось установить и запустить K3s, однако мы обнаружили, что не имеем доступ к сервисам, развернутым внутри него. Выяснилось, что трафик не перенаправляется извне к сервисам, между сервисами (в частности системными) и между узлами кластера. Появилось предположение, что проблема связана с самим дистрибутивом K3s, так как официальной поддержки RISC-V нет. Однако более глубокий анализ показал, что правила iptables (встроенный брандмауэр Linux) для оркестратора не создаются, а значит, корень проблемы может лежать в области ядра Linux. Проблема находится на стадии решения.

В перспективе мы собираемся решить проблему с оркестратором контейнеров. Далее изучить архитектуры микросервисных приложений и их требований к аппаратной среде. Выбрать три примера таких приложений. После чего провести эксперимент, сравнив их работу на архитектурах RISC-V и x86 по ряду метрик. На основе полученных данных проанализировать преимущества и недостатки работы микросервисов на платформе RISC-V.

Литература

1. Фролов В. А., Галактионов В. А., Санжаров В. В., Исследование технологии RISC-V. — URL: https://www.ispras.ru/proceedings/docs/2020/32/2/isp_32_2020_2_81.pdf (дата обращения: 03.03.2024).
2. Жданов А. Операционные системы реального времени, 1999. — URL: https://www.itweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=50257.
3. Yandex Cloud блог/статьи: Как устроен Docker и почему он популярен, 2022. — URL: https://yandex.cloud/ru/blog/posts/2022/03/docker-containers?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F.

УДК 621.3.049

Опыт разработки цифровых ИС на основе открытого ПО с использованием отечественных библиотек компонентов

Пятак И. М., Антропов В. А., к. т. н., Лешуков Я. А.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б

Исследована возможность реализации цифровых интегральных схем на основе отечественной библиотеки стандартных ячеек с использованием открытого ПО для разработки цифровых интегральных схем. Описаны шаги по интегрированию отечественной библиотеки компонентов в открытое ПО, замеченные проблемы и их возможные решения. Представлены примеры полученных топологий для тестовых HDL-описаний.
Ключевые слова: открытое программное обеспечение; цифровая интегральная схема; логический синтез; статический временной анализ; размещение и трассировка; топология интегральной схемы.

На сегодняшний день открытое некоммерческое ПО широко используется во многих сферах деятельности — от прикладных исследований до коммерческой разработки. Открытое программное обеспечение имеет ряд преимуществ, к примеру возможность модификации исходного кода ПО для конкретных применений, добавление нового функционала и т. п. Однако в сфере, связанной с разработкой цифровых интегральных схем, выбор открытого ПО по-прежнему не слишком велик.

В ходе работы было рассмотрено открытое ПО для основных стадий физической разработки цифровых интегральных схем: логический синтез (англ. logic synthesis), статический временной анализ (англ. static timing analysis, STA) и построение топологии на кристалле, которое включает в себя размещение и трассировку (англ. place and route, PaR), экстракцию паразитных параметров, экспорт GDSII-файла и проверки полученной топологии (DRC, DRC, LVS и т. д.). Также было рассмотрено открытое ПО для проверки формальной эквивалентности и конвертации кода на SystemVerilog в код на Verilog HDL.

В ходе анализа открытых источников были выбраны два кандидата для дальнейшей работы: ПО OpenLane [1] и ПО OpenROAD-Flow-Scripts [2], в них используется практически одинаковое ПО для отдельных стадий физической разработки ИС, но OpenROAD-Flow-Scripts имеет более подробную документацию по добавлению библиотек компонентов, что было крайне важно для дальнейшей работы.

Далее были проделаны шаги по интегрированию отечественной библиотеки компонентов в ПО OpenROAD-Flow-Scripts. Основной проблемой при интегрировании библиотеки компонентов является отсутствие правил для экстракции паразитных параметров и проверок DRC и LVS для рассматриваемого открытого ПО. Также отсутствует нативная поддержка System Verilog. Данные проблемы были проанализированы, предложены способы их решения.

Результатом работы являются топологии тестовых HDL-описаний, полученные в рассматриваемом открытом ПО OpenROAD-Flow-Scripts, в том числе для отечественного открытого RISC-V микропроцессорного ядра Syntacore «SCR1». Для оценки качества полученных топологий некоторые шаги разработки (DRC, LVS и STA) были проведены также в коммерческом ПО от Cadence Design Systems.

Литература

1. OpenLane. URL: https://github.com/The-OpenROAD-Project/OpenLane.
2. OpenROAD-Flow-Scripts. URL: https://github.com/The-OpenROAD-Project/OpenROAD-flow-scripts.

УДК 004.2

Учебный процессор CdM-16

Репин Н. Н., Храповицкий Т. А., Вашурин Д. В., Иртегов Д. В., Власов А. А., к. т. н.
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2
n.repin@g.nsu.ru

Разработана архитектура CdM-16 и набор инструментов, позволяющий компилировать и отлаживать программы на ассемблере и Си. Система апробирована на курсе «Цифровые платформы» направления подготовки «Компьютерные науки и системотехника» (КНиС) факультета информационных технологий (ФИТ) НГУ.

Ключевые слова: CdM-16; CdM-8; процессор; архитектура; системное программирование; цифровые платформы; образование.

На первом курсе КНиС ФИТ НГУ читается курс «Цифровые платформы», на котором студенты изучают основы архитектуры ЭВМ, цифровой электроники и низкоуровневого программирования [1].

Обучающиеся в течение года работают с архитектурой CdM-8 — это простой 8-битный процессор, созданный в образовательных целях. В конце года студенты выполняют проект — на основе процессора разрабатывают аппаратное обеспечение, а затем пишут для него программную часть. Проекты выполняются в среде Logisim [2] — это симулятор цифровых схем, одними из главных достоинств которого являются наглядность и интерактивность. Пользователи могут визуально наблюдать структуру и состояние схем вплоть до уровня логических вентилей. Благодаря этому, например, можно посмотреть, что происходит внутри процессора во время выполнения программы.

CdM-8 дает хорошее базовое понимание, но в нем нет многих концепций, которые применяются в настоящих процессорах, к тому же 8-битная архитектура накладывает серьезные ограничения на размер и сложность проекта, выполняемого в рамках курса.

Был разработан процессор CdM-16. Это 16-битная архитектура с более сложным устройством. Изучая ее, студенты могут познакомиться с такими концепциями, как аппаратные исключения, таблица векторов прерываний, разные режимы адресации, относительные инструкции перехода, выровненный доступ к памяти. Благодаря 16-битной адресации и более разнообразному набору команд процессор позволяет реализовывать более сложные и интересные проекты.

Также была разработана новая инфраструктура — ассемблер, компоновщик и дизассемблер. Разработан новый формат объектных файлов, сохраняющий совместимость с оригинальным форматом. В качестве текстового редактора используется VS Code, для которого разработано расширение, поддерживающее отладку, подсветку синтаксиса и автодополнение для ассемблера. Разработан протокол, по которому клиент может отлаживать программу в выбранной среде выполнения. Инструменты поддерживают все процессоры из линейки и могут быть легко перенацелены на новые.

В дополнение к этому ведется разработка бэкенда LLVM для CdM-16 [4], что позволит, в частности, компилировать программы на языке C под эту архитектуру.

Используя систему со средой выполнения Logisim, пользователи имеют возможность отлаживать программную часть, при этом визуально наблюдая состояние аппаратной системы, на которой она выполняется.

По результатам работы создан программный пакет [3], в состав которого на текущий момент входят:

- процессоры CdM-16 (эмулятор, схема) и CdM-8/8e (схема);
- набор инструментов (ассемблер, компоновщик, дизассемблер, компилятор микрокода);
- отладчик для среды выполнения Logisim;
- расширение для VS Code.

Система была полностью развернута в 2023–2024 учебном году. Многие студенты выбрали новый процессор как основу для итоговых проектов. По результатам опроса, большинство обучающихся было удовлетворено процессором и инструментами разработки. По их отзывам, его использование позволило выполнить более сложные проекты и разобраться в аппаратной реализации современных вычислительных устройств.

В будущем планируется реализация Verilog-модели процессора. Также ведется работа над компьютером на базе модифицированной архитектуры CdM-16, на котором можно будет изучать принципы работы ОС. В рамках этого уже существуют прототипы модифицированной архитектуры CdM-16e, диспетчера памяти и контроллера прямого доступа к памяти.

Литература

1. Лаврентьев М. М., Шафаренко А. В., Держо М. А. Франшиза бакалавриата компьютерных наук в Новосибирском государственном университете // Наука и технологии Сибири, 2023. — № 3 (10). — С. 16–21.
2. Logisim: офиц. сайт. — URL: http://www.cburch.com/logisim/ru/index.html (дата обращения: 08.07.2024).
3. Репозиторий cdm-devkit: офиц. сайт. — URL: https://github.com/cdm-processors/cdm-devkit (дата обращения: 08.07.2024).
4. Репозиторий бэкенда LLVM для CdM-16: офиц. сайт. — URL: https://github.com/leadpogrommer/llvm-project-cdm (дата обращения: 08.07.2024).

УДК 004.451.642

Поддержка запуска ОС Embox в Supervisor-режиме RISC-V

Фролов Т. С.
Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
tima1911@yandex.ru

В ОС Embox добавлена возможность запуска в Supervisor-режиме процессора архитектуры RISC-V с использованием OpenSBI.
Ключевые слова: RISC-V; Embox; операционные системы.

RISC-V — набирающая популярность открытая архитектура. В ней есть несколько режимов привилегий, в которых может работать исполняемый код M (Machine), S (Supervisor), U (User). В зависимости от режима, в котором работает код, у него может быть или не быть доступ к тем или иным аппаратным функциям.

Согласно стандарту [1], аппаратные потоки процессора запускаются в M-режиме, в котором у запущенного кода есть доступ ко всем аппаратным функциям процессора. Далее запущенный код может перевести поток в другой режим привилегий. Пользовательские приложения запускаются в U-режиме, а S-режим может быть использован для ядра ОС.

В S-режиме у запущенного кода нет доступа к части аппаратных возможностей процессора, которые необходимы многим ОС для корректной работы. Для получения доступа к этой функциональности необходимо взаимодействовать с прошивкой, запущенной в M-режиме. OpenSBI [2] — рекомендованный интерфейс для взаимодействия платформозависимой прошивки, запущенной в M-режиме, с операционной системой, запущенной в S-режиме.

Embox — операционная система реального времени с открытым исходным кодом. В ОС Embox есть поддержка многих процессорных архитектур (x86, arm и т. д.), однако поддержка RISC-V ограничена: поддерживается запуск только в M-режиме процессора, что ограничивает возможность применения: на некоторых платах производитель предполагает, что операционная система запускается в S-режиме.

В данной работе добавлена поддержка запуска ОС Embox в S-режиме процессора архитектуры RISC-V с использованием OpenSBI [3]:

- добавлен параметр для сборки Embox в S-режим процессора, при включении которого:
  - все инструкции и регистры M-режима заменяются на инструкции и регистры S-режима;
  - взаимодействие с функциями процессора, недоступными в S-режиме (получение идентификатора аппаратного потока, настройка таймера) происходит через OpenSBI;
- добавлена возможность конфигурации PLIC, определяющей области памяти, по которым ОС взаимодействует с PLIC.

Литература

1. The RISC-V Instruction Set Manual, Volume II: Privileged Architecture, Document Version 20211203. Editors Andrew Waterman, Krste Asanovi. and John Hauser, RISC-V International, December 2021. URL: https://github.com/riscv/riscv-isa-manual/releases/tag/Priv-v1.12 (дата обращения: 09.07.2024).

2. RISC-V Supervisor Binary Interface Specification, March 22, 2022. URL: https://github.com/riscv-non-isa/riscv-sbi-doc/releases/tag/v1.0.0 (дата обращения: 09.07.2024).
3. Embox. URL: https://github.com/embox/embox/pull/3039 (дата обращения: 09.07.2024).

УДК 004.382.4

Разработка системы освещения и моторизованного предметного столика для электронного микроскопа с использованием одноплатного компьютера на базе архитектуры RISC-V

Симонова Д. В., Шагалова П. А.
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24
kotik-da@yandex.ru, polli-shagalova@yandex.ru

Разработана система освещения и моторизированный предметный столик для электронного микроскопа с использованием одноплатного компьютера MangoPi MQ PRO D1 на базе архитектуры RISC-V. Приведено описание предлагаемого решения и электронная схема системы.
Ключевые слова: архитектура RISC-V; интерфейс GPIO; электронный микроскоп.

На сегодняшний день разработка устройств, использующих процессорную архитектуру RISC-V, является одним из перспективных направлений микроэлектроники, поскольку данная архитектура обладает рядом преимуществ [1]:

- масштабируемость — позволяет адаптировать процессоры под различные требования;
- открытость — предоставляет свободный доступ к данным об архитектуре;
- модульность — дает возможность использовать и создавать расширения;
- эффективность — позволяет создавать производительные решения.

В области микроскопии при обработке и анализе изображений с помощью электронного микроскопа важным фактором обеспечения хорошего качества изображения является освещение исследуемого образца.

В данной работе для реализации системы освещения и моторизированного предметного столика для электронного микроскопа был выбран микрокомпьютер MangoPi MQ PRO D1, использующий архитектуру RISC-V, обладающий малыми размерами и имеющий 40-контактный разъем GPIO, используемый нами для управления разрабатываемыми модулями [2].

Разработанная система состоит из двух основных модулей — освещения и передвижения предметного столика. Схема модулей была спроектирована и протестирована с использованием инструмента Proteus Design Suite. Собран каждый модуль на беспаячной макетной плате на 400 контактов. Схема подключения разработанных модулей представлена на рис. 1.

В модуль контроля уровня освещенности входят два резистора (220 Ом), потенциометр (WH148 50 кОм) и светодиод (12 Лм). Необходимая яркость светодиода настраивается с помощью потенциометра, однако рассматривается подключение к модулю датчика освещенности и использование нейронной сети для анализа качества изображения и определения необходимых настроек освещения. Модуль использует контакты GPIO — номера 18 для ввода и 22 для вывода, систему можно выключить программным управлением из ввода платы.

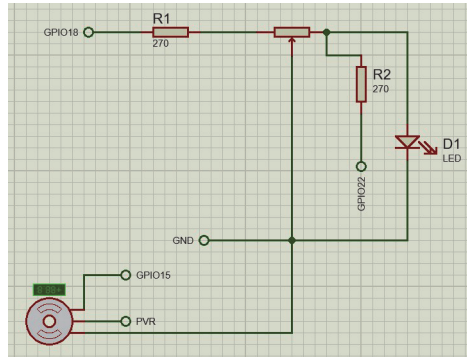


Рис. 1. Электрическая схема подключения модулей освещенности и передвижения к плате

Модуль передвижения предметного столика включает в себя сервопривод SG90, полностью управляемый с помощью программного обеспечения, собранного с помощью кросс-компилятора на более производительной машине. Пользователь указывает направление перемещения и расстояние, после чего соответствующий сервопривод двигает предметный столик. Код написан на Python с использованием библиотеки lgpio. Для управления используется контакт GPIO — номер 15.

В результате работы была спроектирована система освещения и моторизированного предметного столика для электронного микроскопа, отличающаяся простотой масштабирования и модернизации и использующая микрокомпьютер с современной архитектурой процессора RISC-V.

Литература

1. Харрис С.Л., Харрис Д. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера: RISC-V / Ред. А.Ю. Романов. Перев. А.Ю. Романова, В.С. Яценкова. — М.: ДМК Пресс, 2021. — С. 810.
2. Шагурин И.И. Современные микроконтроллеры и микропроцессоры. — М.: Горячая линия — Телеком, 2004. — С. 952.

УДК 004.416

Разработка расширения clang-tidy для автоматического преобразования векторных оптимизаций библиотеки OpenCV

Голубев Д. Е., Шагалова П. А.
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24
danil_golubev_02@mail.ru, polli-shagalova@yandex.ru

Разработаны плагины для clang-tidy, позволяющие автоматически преобразовывать векторные оптимизации в исходном коде библиотеки OpenCV, не прибегая к ручному рефакторингу.
Ключевые слова: LLVM; Clang-Tidy; векторная оптимизация; автоматический рефакторинг.

Автоматизация процессов в разработке программного обеспечения имеет важную роль. Автоматический рефакторинг направлен на улучшение качества кода, его читаемости и удобства сопровождения без изменения его поведения, он помогает избежать ошибок, связанных с человеческим фактором, и ускоряет процесс разработки.

В работе представлено программное решение для преобразования векторных оптимизаций библиотеки OpenCV с использованием открытого статического анализатора кода clang-tidy, являющегося частью системы компиляции llvm и необходимого для анализа языков C/C++/Objective-C [1].

Clang-Tidy анализирует код на уровне абстрактного синтаксического дерева (AST) [2] и препроцессора, используя инфраструктуру компилятора clang.

Современные компиляторы активно оптимизируют код для повышения производительности при соответствующей настройке параметров компиляции. Одним из инструментов оптимизации является векторизация.

Векторная оптимизация позволяет увеличить производительность программы за счет использования векторных операций. Такие операции выполняются над массивами данных, уменьшая количество операций и повышая быстродействие. Применение специализированных векторных инструкций позволяет значительно поднять скорость обработки блоков данных [3].

При разработке программного решения для автоматизации преобразования векторных оптимизаций библиотеки OpenCV были решены следующие задачи:

- анализ исходного кода программы, написанной на языке программирования C++, представленной в виде AST;
- знакомство с инфраструктурой LLVM/Clang-Tidy. Конфигурация и генерация сборки LLVM/Clang с помощью утилиты CMake [4];
- создание простого скрипта-плагина для clang-tidy с помощью внутреннего python-скрипта;
- добавление элементарного образца исправления кода и тестирование его функциональности;
- реализация и применение предупреждения и исправления на одном определенном файле;

- реализация плагинов, осуществляющих замену операторов на соответствующие функции add, mul, sub, div; замену compile-time nlanes на run-time вариант; замену массивов с типом векторный регистр на набор переменных с индексами.

Для проверки разработанного решения создано тестовое приложение, использующее функции библиотеки OpenCV. Приложение собрано под архитектуру RISC-V с использованием кросс-компилятора. На эмуляторе qemu настроена виртуальная машина с архитектурой RISC-V (и поддержкой RISC-V RVV scalable). Произведен замер скорости выполнения приложения на данной архитектуре. Результат работы плагинов был внедрен в исходный код библиотеки OpenCV, выполнена повторная сборка тестового приложения, запуск и измерение производительности.

Литература

1. Бучацкий Р.А., Чуркин Я.А., Чибисов К.А. Проверка программ на соответствие стандарту MISRA C с использованием инфраструктуры CLANG // Труды института системного программирования РАН, 2020.
2. Introduction to the Clang AST. URL: https://clang.llvm.org/docs/IntroductionToTheClangAST.html.
3. Барлит А.В. Увеличение быстродействия вычислений в полях Галуа с помощью векторных инструкций // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2020): Сборник трудов XVIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, 2020. — С. 166–169.
4. Дубров Д.В. Система построения проектов CMake: Учебник. — Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2015. — 419 с.

УДК 004.382.4

Разработка интеллектуальной системы видеоаналитики на основе платформы RISC-V с использованием SiPeed Lichee Pi 4

Некоркин Д. С., Никоноров С. А.
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24
dimnekor@mail.ru, sergionik03@gmail.com

Интеллектуальные системы видеоаналитики играют ключевую роль в современных технологиях безопасности, наблюдения и автоматизации. В работе предложена разработка системы на основе открытой платформы RISC-V для решения задачи обнаружения и отслеживания объектов на видеопотоке.
Ключевые слова: архитектура RISC-V; SiPeed Lichee Pi 4; модели Yolov7-Tiny; Haar; LBP.

SiPeed Lichee Pi 4 представляет собой одноплатный компьютер, основанный на процессоре Xuantie C910 (RV64GCV) с четырьмя вычислительными ядрами RISC-V, которые могут работать на частоте до 2,5 ГГц. Этот компьютер также включает нейропроцессорный блок (NPU) с производительностью до 4 TOPS для задач искусственного интеллекта, энергоэффективное ядро Xuantie E902, графический блок Imagination 3D с производительностью до 50 Гфлопс и DSP Xuantie C906. Таким образом, Lichee Pi 4 предлагает мощную и гибкую платформу для широкого спектра приложений, включая IoT, машинное обучение, графику и обработку сигналов.

Создаваемая система разделена на несколько ключевых компонентов: вычислительное ядро RISC-V [1], модули ввода-вывода, контроллеры периферийных устройств (камера OV5640, HDMI-дисплей). Взаимодействие между модулями и подключение к периферийным устройствам реализованы через различные интерфейсы и протоколы (GPIO, SPI, I2C, UART), обеспечивающие эффективную передачу данных между различными частями системы. Операционная система Linux [2] была установлена на платформу, используя U-Boot для инициализации периферийных устройств и загрузки ядра Linux в память DDR3.

Для обнаружения и отслеживания движущихся объектов были рассмотрены три модели: Yolov7-Tiny [3], Haar [4] и LBP. После сравнения производительности моделей на платформе была выбрана модель LBP благодаря высокой скорости обработки данных.

Для повышения эффективности системы в условиях ограниченных аппаратных ресурсов была применена технология усреднения видеопотока (video downsampling). Она позволяет значительно снизить объем обработки данных на один кадр. Это позволило сократить потребление ресурсов и повысить общую производительность системы.

Результаты исследования показали высокую эффективность системы видеоаналитики на основе платформы RISC-V с использованием SiPeed Lichee Pi 4. Модель LBP для обнаружения объектов обеспечила быструю обработку данных,

а технология видеоусреднения снизила нагрузку на ресурсы. Дальнейшие улучшения могут включать оптимизацию алгоритмов и расширение функциональности для более широкого спектра приложений в области видеоаналитики, безопасности и автоматизации.

Литература

1. Харрис С.Л. Харрис Д. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера: RISC-V / Ред. А.Ю. Романов. Перев. А.Ю. Романова, В.С. Яценкова. — М.: ДМК Пресс, 2021.
2. Мауэрер В. Профессиональная архитектура ядра Linux // Wrox, 2008.
3. YOLOv7 Анализ модели угроз и кода. — URL: https://www.trailofbits.com/documents/2023-10-yolov7-securityreview.pdf.
4. Viola P., Jones M. Быстрое обнаружение объектов с помощью усиленного каскада простых признаков // Доклады конференции IEEE Computer Society по компьютерному зрению и обработке изображений, 2001. — Т. I-511.

УДК 004.424

Оптимизация вычисления формулы Блэка — Шоулза под архитектуру RISC-V

Алпутов И. Н., Панова Е. А., Волокитин В. Д., Мееров И. Б.[1], к. т. н.
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
elena.panova@itmm.unn.ru

В работе проводится исследование производительности многоядерного процессора архитектуры RISC-V с поддержкой векторных вычислений и производится сравнение с серверным процессором Intel. В качестве бенчмарка рассматривается задача из области финансовой математики — вычисление формулы Блэка — Шоулза.

Ключевые слова: архитектура RISC-V; оптимизация программ; формула Блэка — Шоулза.

В последнее время все большее внимание привлекает область, связанная с тестированием производительности и разработкой программного обеспечения для активно развивающейся архитектуры RISC-V. В данной работе исследуются возможности архитектуры RISC-V с точки зрения производительности в сравнении с архитектурой x86 на примере известного бенчмарка из области финансовых вычислений — формулы Блэка — Шоулза [1–2].

Рассматривается задача определения справедливой цены колл-опциона европейского типа. При некоторых условиях она может быть вычислена по следующей формуле [1]:

$$C = S_0 F(d_1) - K e^{-rT} F(d_2),$$

$$d_{1,2} = \frac{\ln \frac{S_0}{K} + \left(r \pm \frac{\sigma^2}{2} \right) T}{\sigma \sqrt{T}},$$

где C — цена опциона, S_0, K, T — параметры, r, σ — характеристики финансового рынка, F — интегральная функция стандартного нормального распределения. На практике цены опционов вычисляются одновременно для большого числа параметров. Сокращение времени вычисления набора опционов является важной задачей, поскольку скорость принятия решения существенно зависит от времени финансовых расчетов. В работе в качестве бенчмарка рассматривается вычисление массива цен опционов при фиксированных параметрах r, σ и варьируемых параметрах S_0, K, T.

Тестовые запуски производились на устройстве Lichee Pi 4A (CPU TH1520 RISC-V 64GCV C910, 4 ядра, 2 ГГц, RVV 0.7.1, LPDDR4X-3733, 16 ГБ). Сравнение с архитектурой x86 производилось на основе запусков на узле суперкомпьютера с двумя серверными процессорами Intel Xeon Silver 4310T (2×10 ядер, 2,30 ГГц, AVX512, DDR4-2667, 64 ГБ). Использовались компиляторы GCC 8.4.0 для RISC-V и Intel oneAPI DPC++/C++ Compiler 2023 для x86. Основное внимание уделялось возможности вычислений в векторном и многоядерном режимах. Код бенчмарка публично доступен [3].

Показано [2], что для достижения приемлемой производительности данного бенчмарка на архитектуре x86 достаточно воспользоваться средствами OpenMP. Для рассматриваемой тестовой конфигурации ускорение от векторизации на наборе из 100 миллионов опционов составило 6,3 раз, ускорение параллельной версии относительно векторной однопоточной — 14,5 раз. Для организации параллелизма мы учитывали особенности двухпроцессорной системы с неоднородным доступом к памяти (NUMA). Дальнейшие оптимизации не приводят к ускорению, т. к. производительность ограничена возможностями кеша L3.

Для организации векторных вычислений на RISC-V мы использовали соответствующие функции-интринсики, компилирующиеся в инструкции RVV 0.7.1. Большой проблемой стало отсутствие библиотеки для векторного вычисления математических функций (аналога SVML в компиляторе Intel). В процессе работы были реализованы собственные пробные версии необходимых векторных математических функций с точностью до шести знаков после запятой для типа данных binary32 (тип float в языке C), что достаточно для данной задачи. Для сравнения также была разработана аналогичная версия кода для архитектуры x86 с использованием интринсиков AVX512. На архитектуре RISC-V удалось достигнуть ускорения 4,2 раз в векторном режиме и 4,0 раз в параллельном режиме относительно векторной однопоточной версии, что близко к теоретическому максимуму на данном процессоре. После всех оптимизаций отставание версии для RISC-V от версии x86 составило 6,3 раз при задействовании четырех физических ядер процессоров TH1520 и Intel Xeon Silver 4310T и 24,5 раз на максимальном числе ядер обоих процессоров.

В докладе будет представлен пошаговый анализ результатов экспериментов, демонстрирующий влияние разных приемов оптимизации кода на результаты производительности на процессорах архитектуры x86 и RISC-V.

Работа поддержана Минобрнауки РФ, проект № FSWR-2023-0034.

Литература

1. Black F., Scholes M. The pricing of options and corporate liabilities // Journal of political economy, 1973. Vol. 81. № 3. P. 637–654.
2. Panova E. et al. Black-Scholes Option Pricing on Intel CPUs and GPUs: Implementation on SYCL and Optimization Techniques // Russian Supercomputing Days. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 48–62.
3. Открытый исходный код бенчмарка. — URL: https://github.com/PanovaElena/BS_benchmark_riscv.

УДК 004.416.6

Оптимизация xxHash для RISC-V с использованием различных реализаций RVV

Пономарев Н. А.
Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
n.ponomarev@spbu.ru

Библиотека xxHash, реализующая быстрые функций хеширования, активно используется в Netflix и MySQL, в QEMU и btrfs. Будет представлен результат оптимизации алгоритмов библиотеки под различные реализации RVV и полученный опыт работы с различными технологиями в период активного развития платформы.
Ключевые слова: хеширование; оптимизация; RISC-V; векторизация.

RISC-V — молодая и активно развивающаяся архитектура. Для экосистемы любой архитектуры очень важно наличие широко используемых библиотек и оптимизации для них. xxHash [1] — современной библиотеки для хеширования, скорость которой обеспечивается использованием векторных инструкций процессора. Так, например, в библиотеке уже имеется поддержка наборов инструкий SSE2, AVX512 и NEON.

Однако поддержка векторного расширения для платформы RISC-V — RVV — в библиотеке отсутствует, что и стало целью исследования.

Разработка процессора от дизайна до кремния занимает продолжительное время, и доступные потребителю процессоры, к сожалению, отстают от актуальных спецификаций архитектуры, поэтому существуют две несовместимые между собой версии RVV, доступные исследователям [2]:

- RVV 1.0 — официально принятая версия. Тем не менее на данный момент нет ни одной аппаратной платформы, доступной для покупки, где она была бы реализована;
- RVV 0.7.1 — бета-версия расширения, которую можно найти в процессорах от T-Head.

В нашем распоряжении был SBC Sipeed Lichee Pi 4A с поддержкой RVV 0.7.1, на котором и проводились эксперименты.

Основная идея работы была простой: адаптировать идеи существующего кода для других наборов инструкций, добавив поддержку RVV обеих версий с использованием intrinsic-функций. Однако было встречено несколько трудностей:

- RVV 0.7.1 поддерживает только форк компилятора GCC от компании T-Head, а современные версии GCC и Clang поддерживают только RVV 1.0;
- новые версии компиляторов (GCC 13 и выше, Clang 16 и выше) используют префикс __riscv для intrinsic-функций, что при написании кода для обеих версий стандарта требует использования возможностей препроцессора;
- в RVV 0.7.1 отсутствуют некоторые инструкции, присутствующие в RVV 1.0, что увеличивает объем и сложность кода.

После реализации оптимизированных функций появилась необходимость измерить производительность написанного кода.

Для выбора набора команд — скалярного или векторного — используется препроцессор. А для тестирования производительности библиотека имеет встроенный бенчмарк. Поэтому эксперименты для сравнения оптимизаций проводить несложно.

Для тестирования работоспособности кода использовался эмулятор QEMU, поэтому первая попытка измерения производительности была произведена с его помощью, однако она не увенчалась успехом в силу того, что QEMU производит все векторные операции, используя скалярные регистры.

После этого было проведено тестирование на плате. Его результаты оказались гораздо более реалистичными, тем не менее векторизованная версия показала худшее время работы [3]. Предполагается, что причина замедления кроется в достаточно специфической операции перемещения элементов внутри векторного регистра.

Литература

1. Cyan4973/xxHash. URL: https://github.com/Cyan4973/xxHash (дата обращения: 09.07.2024).
2. Implications of widely distributed draft 0.7.1 implementation(s) · Issue #667 · riscv/riscv-v-spec. URL: https://github.com/riscv/riscv-v-spec/issues/667 (дата обращения: 09.07.2024).
3. Add RISC-V RVV implementation by WoWaster · Pull Request #898 · Cyan4973/xxHash. URL: https://github.com/Cyan4973/xxHash/pull/898 (дата обращения: 09.07.2024).

УДК 004.051

Инструмент для оценки BPU

Ефремов А. А., Слинчук Д. А.
Математико-механический факультет СПбГУ
198504, г. Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский просп., 28

Разработан инструмент для оценки эффективности модуля предсказания переходов (branch prediction unit) различных процессоров. Описаны основные компоненты инструмента и их особенности. Представлены оценки различных процессоров и моделей BPU с помощью данного инструмента.
Ключевые слова: BPU; анализ CPU; счетчики производительности; сравнение BPU; Gem5; RISC-V.

На сегодняшний день метод конвейеризации инструкций повсеместно используется для ускорения процессора, однако его эффективность страдает от инструкций перехода, вызывающих сброс конвейера. Чтобы предотвратить сброс конвейера, в процессорах используется модуль предсказания переходов (BPU). BPU уменьшает количество сбросов конвейера, предсказывая следующую выполняемую часть кода.

Различные реализации BPU обладают различной степенью эффективности [1, 2]. Изучение сценариев, при которых BPU показывает низкую эффективность, может улучшить его архитектуру.

Одним из способов выявления таких сценариев является метод фаззинга. В рамках данной работы был разработан инструмент, основанный на этом методе. Инструмент состоит из трех отдельных компонентов: *generate* (генерация случайных тестов на C), *analyze* (сбор данных о работе BPU) и *summarize* (анализ и визуализация результатов).

Компонента *generate* формирует тесты-программы на C, созданные на основе случайного абстрактного синтаксического дерева.

Компонента *analyze* отвечает за запуск тестов и получение данных о BPU, при этом используя различные способы повышения точности и повторяемости результатов. Инструмент поддерживает работу с симулятором процессоров Gem5, позволяя моделировать и тестировать BPU без создания физического процессора, а также удаленный запуск тестов на другой машине.

Компонента *summarize* визуализирует результаты на графике, отражающем долю неверно предсказанных переходов, что помогает быстро идентифицировать аномалии, чтобы позже более детально изучить все данные по этому тесту.

В ходе работы, с применением разработанного инструментария был проведен обширный анализ устройств, относящихся к трем различным архитектурным платформам — x86, ARM и RISC-V. А также в рамках этого анализа были получены результаты оценки для десяти моделей BPU, представленных в симуляторе Gem5.

Литература

1. Youssif A., Ismail N., Torkey F. Comparison of branch prediction schemes for superscalar processors iceec 2004 // Electrical, Electronic and Computer Engineering, 2004. ICEEC'04. 2004 International Conference on, 2004. P. 257–260.
2. Quadri S. A. I., Jahangir M. Z. Design, Implementation and Performance Comparison of Different Branch Predictors on Pipelined-CPU // 2017 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE). IEEE, 2017. P. 1–7.

УДК 621.3.049.77

Образовательное Linux-capable процессорное ядро RISC-V

Примаков Е. В., Силантьев А. М., Кулешов В. К., Протасова Е. А., Гуржов Н. А., Артамонов А. С., Тарасова А. Н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработано HDL-описание процессорного ядра на базе архитектуры RISC-V, включающее в себя все необходимые расширения и функциональные блоки для запуска ОС GNU/Linux. Приведены характеристики и микроархитектурные решения разработанного ядра. Показаны способы использования процессорного ядра в образовательном процессе.
Ключевые слова: RISC-V; Linux; процессор; микроархитектура; учебный процесс.

На сегодняшний день изучение устройства продвинутых процессорных ядер, умеющих исполнять программный код не только в machine-mode, с точки зрения архитектуры и микроархитектуры происходит только в рамках лекционных занятий или изучения готовых open-source-решений [1]. Такой формат подачи исключает возможность освоить информацию до ее применения в рабочих задачах. С точки зрения образовательного процесса данный лекционный материал требует создания курса лабораторных занятий, где обучающиеся могли бы интерпретировать свои знания при создании с нуля или модификации компонентов процессорного ядра. Данное предложение невозможно реализовать без наличия полностью контролируемой кодовой базы процессорного ядра, которое в первую очередь проектировалось для образовательных целей, но при этом обладало бы полным функционалом для запуска ОС GNU/Linux.

Целями данной работы являлись:

- непосредственно разработка процессорного IP-ядра и макета системы на кристалле, удовлетворяющих всем функциональным требованиям для запуска современной многозадачной многопользовательской ОС (на примере GNU/Linux);
- разработка комплекта образовательных материалов и учебных курсов, посвященных продвинутым аспектам проектирования процессорных ядер и систем на их основе. Предполагается использование данных материалов для подготовки студентов в рамках совместной программы магистратуры от МИЭТ и YADRO;
- наработка профильного опыта у сотрудников НИЛ ЭСК МИЭТ и подготовка стажеров для профильных компаний.

В рамках работы был сформирован следующий перечень требований к процессорному ядру и системе на его основе:

- ISA — RV64GC;
- режимы привилегий — Machine, Supervisor, User;
- конвейерная in-order-микроархитектура без суперскалярности, 5-6 стадий [2];
- одноуровневые частично-ассоциативные кеши инструкций и данных (write-through);

- поддержка страничной виртуальной памяти (sv39);
- одноуровневые ITLB и DTLB, программная подгрузка таблиц TLB (SPW);
- реализация механизма PMP согласно спецификации RISC-V, 16 регионов защиты памяти;
- интерфейс для системной отладки с поддержкой gdb и OpenOCD;
- простой механизм предсказания ветвлений (BTB + BHT);
- поддержка OpenSBI;
- контроллер прерываний согласно спецификации RISC-V Platform-Level Interrupt Controller Specification.

В рамках первого этапа работы было разработано RTL-описание модулей процессорного ядра и подготовлена документация с описанием внутреннего устройства, параметров, интерфейсов, регистров конфигурации, разработано верификационное окружение и проведена функциональная верификация, подготовлены тестовые программы на C для инициации и демонстрации работоспособности симуляции, разработаны скрипты для запуска симуляции для демонстрации работоспособности.

Литература

1. Heinz C. et al. A catalog and in-hardware evaluation of open-source drop-in compatible RISC-V softcore processors // 2019 International Conference on ReConFigurable Computing and FPGAs (ReConFig). IEEE, 2019. P. 1–8.
2. Абрамов Е. М. Анализ методов разрешения конфликтов конвейера по управлению на примере открытой архитектуры RISC-V // Микроэлектроника и информатика — 2018, 2018. — С. 3–10.

УДК 004.231.3

Использование открытых инструментов для Step-and-Compare-верификации RISC-V-ядер

Чусов С. А.
Научно-исследовательская лаборатория энергоэффективных систем на кристалле
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
chusserge@mail.ru

Подробно рассмотрен подход к верификации RISC-V-ядер Step-and-Compare, основанный на сравнении состояния тестируемого ядра с состоянием эталонной модели через определенные промежутки времени в ходе функциональной симуляции. Проанализирована область открытого программного обеспечения, определены инструменты, позволяющие реализовать Step-and-Compare-подход. По шагам разобрано проектирование простейшего верификационного окружения с использованием данных инструментов.

Ключевые слова: функциональная верификация; RISC-V; процессор; эталонная модель; сравнение; синхронное сравнение; открытое программное обеспечение.

В настоящее время популярность набирает архитектура набора команд (АНК) RISC-V [1]. В 2015 году был создан международный фонд архитектуры. Уже с 2018 года он работает в партнерстве с The Linux Foundation. Основная отличительная черта архитектуры RISC-V — ее открытость. Так как АНК может быть использована бесплатно, то уже сейчас вокруг RISC-V сформировалось сообщество из множества разработчиков, готовых к сотрудничеству и обмену опытом. Еще одной особенностью RISC-V является модульность. Базовый набор содержит 49 инструкций, при этом в спецификациях присутствует несколько десятков расширений для аппаратной поддержки дополнительного функционала. Также инженерам предоставлена возможность создания нестандартных команд и их интеграции в архитектуру.

Основным цифровым блоком систем на кристалле в большинстве случаев является процессор, выполняющий программную обработку цифровых данных. Сфера верификации процессорных ядер является одной из самых актуальных составляющих индустрии проектирования и верификации сложнофункциональных блоков. В ходе работы был подробно рассмотрен подход к верификации RISC-V-ядер Step-and-Compare, основанный на сравнении состояния тестируемого ядра с состоянием эталонной модели через определенные промежутки времени в ходе функциональной симуляции. В большинстве реализаций данного подхода состояния сравниваются в момент выполнения ядром инструкции.

В ходе работы было проанализировано открытое программное обеспечение, предоставляющее возможности для реализации подхода к верификации RISC-V-ядер Step-and-Compare. В качестве эталонной модели был выбран симулятор набора команд Spike [2] вместе с программной оболочкой Hammer [3], предоставляющей интерфейсы C++ и Python для получения информации о состоянии модели. В качестве симулятора был выбран активно развивающийся Verilator [4], поддерживающий множество конструкций языка описания и верификации цифровых устройств

SystemVerilog. Данный язык был выбран в качестве основного для проектирования основы верификационного окружения.

Заключительной частью являлся разбор проектирования простейшего верификационного окружения с использованием выбранных инструментов.

Литература

1. RISC-V: Open standard Instruction Set Architecture (ISA). URL: https://riscv.org/about (дата обращения: 10.07.24).
2. Симулятор АНК RISC-V Spike. — URL: https://github.com/riscv-software-src/riscv-isa-sim (дата обращения: 10.07.24).
3. Программная оболочка Hammer. — URL: https://github.com/rivosinc/hammer (дата обращения: 10.07.24).
4. Verilog/SystemVerilog симулятор Verilator. URL: https://github.com/verilator/verilator (дата обращения: 10.07.24).

УДК 621.3.049

Виртуализация NTB-соединений в QEMU

Карасев М. А., Тиняков С. А., Гаврилов А. В., Заславский М. М., к. т. н.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф

В докладе рассказывается о проблеме применения технологии NTB поверх шины PCIe. Рассматривается задача виртуализации технологии NTB в QEMU, решение которой было сведено к созданию частичной виртуализации IDT 89HPES24NT6AG2 PCI Express Switch, модификации модуля ядра Linux для поддержки решения и сборки с помощью Yocto Project. Для разработанного решения проведена серия экспериментов, показавшая ограничения производительности текущей реализации, вызванные особенностями работы QEMU.
Ключевые слова: NTB; RDMA; PCI; QEMU; СХД.

В условиях постоянного роста данных и количества вычислительных устройств возрастают и требования к скорости обработки информации. Один из ключевых элементов современных вычислительных систем — системы хранения данных (СХД) — должны уметь быстро обрабатывать поступающие запросы и обеспечивать высокую доступность данных. Такие системы работают в непрерывном режиме, для которого любой простой или задержка с выдачей данных являются критичными, поэтому, как правило, СХД характеризуются двумя показателями — скоростью доступа к данным и отказоустойчивостью. Для обеспечения требуемых значений данных характеристик применяется архитектура Symmetric Active-Active. Она заключается в использовании двух равноправных контроллеров для доступа к одним и тем же данным. Активность контроллеров позволяет убрать единую точку отказа и одновременно обрабатывать запросы. Для обеспечения такого сценария работы необходим инструмент для достижения когерентности (синхронности) состояний контроллеров. Перспективной технологией для этой цели является NTB (Non-Transparent Bridge) — технология, скрывающая два и более PCI-домена друг от друга за конечным устройством, что позволяет им взаимодействовать без конфликтов. В рамках NTB для каждого домена все остальные выглядят как конечное устройство, через которое можно осуществлять взаимодействие. Это позволяет соединить вычислительные узлы из разных PCI-доменов в одну систему. В первую очередь эта технология позволяет писать данные в DMA-память (Direct Memory Access) другого хоста (контроллера) и читать из нее без затрат процессорного времени.

Задачей данной работы является реализация NTB-соединения между двумя гостевыми виртуальными машинами. Целевой сценарий — это использование RDMA- технологий с помощью NTRDMA [1].

Решение было выполнено в виде двух виртуальных машин с настроенным NTB-соединением. Для того чтобы обеспечить воспроизводимость сборок, а также для того чтобы и QEMU, и тестовые гостевые системы собирались и разрабатывались в одном месте, используется система сборки Yocto Project. Унификация сборок была достигнута за счет Docker-контейнера, который с помощью интерфейса командной строки реализует четыре сценария исследования:

1) собирает проект (только ядро, только QEMU или все сразу);

2) запускает тестовые гостевые системы через собранный QEMU (одну или пару связанных, то есть вместе с ivshmem-server);
3) синхронизирует патчи из репозитория проекта в репозиторий с poky.

В качестве основы эмулируемого устройства в QEMU была использована спецификация устройства IDT 89HPES24NT6AG2 [2]. Для реализации нового устройства за основу была взята реализация устройства ivshmem, которое позволяет пробрасывать в виртуальную машину разделяемую память. Дополнительно данное устройство позволяет посылать прерывания другим виртуальным машинам. Для этого придуман свой API и реализован сервер (ivshmem-server) в QEMU. Данное устройство выглядит идеальным для начала разработки, так как реализует одну из больших сложностей — общение двух виртуальных машин. Фактически ivshmem-устройство было доработано для обработки операций чтения-записи по адресам из спецификации IDT. Был реализован минимум для поддержки одного окна памяти при коммуникации по NTB. Также был доработан и драйвер IDT-устройства, который реализует операции, не описанные в спецификации, но это необходимо для корректной инициализации с технологиями NTRDMA.

В результате были успешно реализованы виртуальное устройство и тестовый стенд, где можно тестировать технологию NTB. Хоть в реализации и использовалась разделяемая память, но пропускная способность оказалась крайне низкой, так как используются обращения к memory window в QEMU, которая обрабатывает данные по 4 байта, что приводит к огромным накладным расходам и к пропускной способности в 713,2 кибибайта в секунду.

Литература

1. Hubbe A. NTRDMA v0.1 — An Open Source RDMA Driver for PCIe NTB and DMA. Linux Piter 2015.
2. IDT 89HPES16T4AG2 PCI Express Switch User Manual / Integrated Device Technology, Inc. Silver Creek Valley Road, San Jose, California, 2013.

УДК 004.454

Применение DMA Engine API для разработки драйверов и эмуляция DMA-контроллеров в QEMU

Ерхов М. С.
ПАО «Сбербанк»
121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32, к. А
erkhov.ms@phystech.edu

Разработана модель, эмулирующая функциональность DMA-контроллера в QEMU, и соответствующие драйверы с применением DMA Engine API. Приведены преимущества интеграции (использования) данного API при разработке драйверов для DMA-контроллеров, а также представлен анализ написания таких драйверов. В работе описана архитектура модели и ее взаимодействие с драйвером.

Ключевые слова: DMA Engine API; драйверы; ядро Linux; QEMU; эмуляция устройств.

В ядре Linux DMA Engine API [1, 2] предоставляет высокоуровневый интерфейс для работы с операциями прямого доступа к памяти (DMA) [2, 3], который позволяет абстрагироваться от аппаратного обеспечения. В данном API используется драйверная модель client/master: master управляет конкретным DMA-контроллером, реализуя функции для выполнения операций передачи данных, а client использует функционал master [1, 2]. Это обеспечивает стандартизацию работы с DMA, а также ускоряет разработку, так как client при таком подходе не привязан к конкретному контроллеру и может быть использован для нескольких master-драйверов. Ввиду недоступности аппаратного контроллера DMA принято решение реализовать его модель в виртуальной среде QEMU[4], которая позволяет точно воспроизводить поведение устройств.

Целью данной работы является разработка модели проектируемого в проекте контроллера DMA в QEMU, а также драйверов client и master с использованием DMA Engine API для управления моделируемым устройством. Для подтверждения корректной работы драйверов и модели нужно провести их тестирование. Рассмотрим каждую из составляющих данной работы: модель устройства, драйвер master, драйвер client, тестирующую систему.

1) Драйвер master

При загрузке системы DMA master-драйвер инициализирует контроллер DMA, настраивает и регистрирует каналы DMA и предоставляет необходимый для client-драйвера интерфейс. Далее драйвер ждет инструкций от клиента. При инициализации отправки данных со стороны client, master конфигурирует контроллер DMA для выполнения этой передачи. Далее модель устройства выполняет транзакцию, генерирует прерывание и уведомляет master о завершении работы. Затем master уведомляет клиента.

2) Драйвер client

Драйвер регистрируется, создает символьное устройство для тестирующей системы и захватывает каналы DMA, созданные master. При получении данных через символьное устройство для отправки по DMA client формирует scatter/gather-таблицу, регистрирует callback-функцию для уведомления и формирует запрос

на передачу данных master-драйверу. Затем ждет окончания выполнения DMA-транзакции, ожидая, пока master вызовет callback-функцию клиента.

3) Модель устройства в QEMU.

Модель представляет собой эмуляцию PCIe устройства с двумя BAR: один из них используется под регистры устройства, другой — в качестве памяти. Программирование модели контроллера заключается в изменении состояний регистров, которые управляют его работой. В контексте модели необходимо поддержать отклик на изменение состояний регистров, как это делало бы реальное устройство. В модели это делается за счет вызова функций, предоставляемых библиотеками QEMU. При работе master-драйвера дескрипторы DMA загружаются в память модели, программируются регистры для начала работы. Моделью затем вызывается соответствующая функция, которая по адресам из дескрипторов копирует данные в память или из памяти устройства. В конце обработки генерируется прерывание MSI и уведомляется master.

Основное отличие модели от реального устройства состоит в том, что в модели устройства дескрипторы хранятся в специально отведенной области памяти устройства, а не в памяти HOST машины, но это не является существенным ограничением для разработки.

4) Тестирующая система

Тестирование каналов DMA проводилось через символьное устройство, которое предоставляет драйвер client. Сначала тестом инициируется команда записи данных в устройство, после тест формирует команду чтения данных из устройства. После завершения передачи данных в обоих направлениях проверяется корректность работы драйвера путем сравнения отправленных данных с полученными. Во время тестирования также измерялась скорость передачи данных. Однако поскольку в модели устройства выполняется передача данных память — память, то полученная скорость будет отличаться от скорости передачи реального устройства.

В результате работы реализована модель проектируемого DMA-контроллера и разработаны драйверы master и client с использованием DMA Engine API. Выполнена проверка взаимодействия драйверов и модели. Корректность работы устройства и драйверов проверена с помощью тестирующей системы.

Литература

1. Официальный сайт по ядру Linux. — URL: https://docs.kernel.org/driver-api/dmaengine/client.html.
2. John Madieu. Linux Device Driver Development. Packt, 2022.
3. Роберт Лав. Ядро Linux. Описание процесса разработки, 2014.
4. Официальный сайт по QEMU. — URL: https://www.qemu.org/docs/master/system/device-emulation.html.

УДК 004.416.6

Применение алгоритмов контекстно-свободной достижимости для задач статического анализа кода

Кутуев В. А.
Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
vladimir.kutuev@gmail.com

Разработана модификация тензорного алгоритма контекстно-свободной достижимости, к которой могут быть сведены некоторые виды статического анализа кода. Эффективность данной версии алгоритма была проверена экспериментально на данных, полученных на реальных программах.
Ключевые слова: анализ графов; контекстно-свободная достижимость; статический анализ кода; разреженные матрицы; произведение Кронекера.

Статический анализ играет важную роль в задаче поиска ошибок в коде. Многие виды статического анализа могут быть сформулированы как задача контекстно-свободной (КС) достижимости в графе. Она заключается в определении существования пути между парой вершин, задающего слово, которое принадлежит языку, описываемому КС-грамматикой. Один из примеров задачи, сводимой к КС-достижимости, — анализ псевдонимов или анализ указателей. Он позволяет обнаруживать использование освобожденной памяти, взаимные блокировки и обращение к выделенной памяти через тип с несоответствующим размером [1]. Еще один пример — анализ указателей, учитывающий поля, особенностью которого являются большие грамматики, описывающие соответствующие ограничения на пути.

Существует множество алгоритмов, решающих задачу КС-достижимости. Среди них можно выделить алгоритмы, основанные на операциях линейной алгебры: матричный [2] — основанный на умножении матриц, и тензорный [3] — основанный на произведении Кронекера, так как такие операции хорошо поддаются распараллеливанию.

При сведении задачи анализа указателей, чувствительного к полю, к задаче КС-достижимости возникают грамматики с большим числом продукций, что делает матричный алгоритм плохо применимым, так как он очень чувствителен к размеру грамматики. В тензорном алгоритме эта проблема решается заданием КС-языка не грамматикой, а рекурсивным автоматом, который можно представить в виде разреженных матриц. Однако для пересечения рекурсивного автомата и ориентированного графа необходимо считать произведение Кронекера соответствующих матриц смежности для всех меток на ребрах в графе и рекурсивном автомате.

В целях уменьшения числа операций был рассмотрен другой способ представления графа и рекурсивного автомата. Их можно представлять не набором булевых матриц для каждой метки, а одной матрицей, содержащей целые числа, кодирующие все метки на ребре. Также для корректного вычисления произведения Кронекера с таким кодированием была реализована специальная операция умножения элементов матриц.

Данная модификация [4] тензорного алгоритма показала значительно лучшее время работы в решении задачи анализа указателей, чувствительного к полям, чем обычная версия на графах и грамматиках, полученных по реальным программам.

Также на небольших графах показано наилучшее время работы среди алгоритмов, основанных на операциях линейной алгебры.

Литература

1. Palix N., Gaël T., Suman S. et al. Faults in Linux: Ten Years Later // Proceedings of the Sixteenth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. ASPLOS XVI. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2011. P. 305–318.
2. Azimov R., Grigorev S. Context-Free Path Querying by Matrix Multiplication // Proceedings of the 1st ACM SIGMOD Joint International Workshop on Graph Data Management Experiences & Systems (GRADES) and Network Data Analytics (NDA). GRADES-NDA '18. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018. 10 p.
3. Orachev E. et al. Context-free path querying by kronecker product // Advances in Databases and Information Systems. Springer International Publishing, 2020. P. 49–59.
4. Tensor algorithm modification for field-sensetive points-to analyzis. URL: https://github.com/FormalLanguageConstrainedPathQuerying/CFPQ_PyAlgo/tree/vkutuev/ot_tensor (дата обращения: 2024.07.09).

УДК 004.451.51

Процесс восстановления данных в RAID-1 на основе SPDK

Сичкар Г. К., Кононова Ю. А., Васенина А. И.
Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
georgy.sichkar@yandex.ru

Реализован процесс восстановления данных для имплементации RAID-1 внутри фреймворка SPDK, реализующего логику блочных устройств в пространстве пользователя. Реализация выполняет учет поврежденных областей RAID-1 и восстанавливает их, не прибегая к полному копированию.
Ключевые слова: хранение данных; RAID; дисковые сбои; восстановление данных; SPDK.

Одними из важнейших характеристик СХД являются надежность и отказоустойчивость. Иными словами, способность системы хранения в случае частичной поломки иметь возможность восстановить потерянные данные и продолжить функционировать в штатном режиме.

Примером технологии с подобной функциональностью является RAID-1 [1] — объединение нескольких блочных устройств, каждое из которых хранит копию одних и тех же данных. За счет избыточности RAID-1 позволяет восстановить информацию при замене поврежденного базового устройства.

На данный момент большинство RAID-массивов реализуются внутри пространства ядра, в том числе RAID-1. Однако возможен альтернативный подход, при котором вся основная логика СХД перемещается в пространство пользователя. Такой подход используется в SPDK [2] — фреймворке с открытым исходным кодом для работы с блочными устройствами, разработанном Intel Corporation. К особенностям SPDK можно отнести опрос оборудования на предмет завершения запросов ввода-вывода вместо использования прерываний, а также перемещение всех необходимых драйверов блочных устройств в пространство пользователя. Более того, опираясь на отчеты о производительности компании Intel, можно зафиксировать увеличение скорости работы СХД [3].

Фреймворк содержит внутри себя реализацию массива RAID-1. Однако эта реализация неполная и содержит ряд критических недочетов, влияющих на уровень предоставляемой отказоустойчивости:

- отсутствие функциональности частичного восстановления поврежденных данных, например, в ситуации, когда блочное устройство подключено по сети и временно теряет соединение;
- запуск нового процесса восстановления данных в отдельном потоке. Это может влиять на производительность всей системы, так как за время нахождения RAID-1 в активном режиме процесс восстановления может повторяться многократно, а значит, и новый поток под эти цели будет выделяться многократно.

Предложенная альтернативная реализация [4] процесса восстановления решает часть вышеперечисленных проблем.

- Реализована функциональность, отвечающая за контроль актуальности хранимых данных, позволяющая точечно восстанавливать поврежденные

области. Для контроля используется матрица ребилда — структура данных, представляющая собой массив из атомарных переменных. Каждая переменная отвечает за актуальность набора областей в RAID-массиве. Для изменения статуса области используется операция CAS (compare and set), что позволяет корректно обновлять матрицу при многопоточной обработке запросов.

- Для запуска нового процесса восстановления данных применяется механизм поллинга, предоставляемый фреймворком SPDK. Этот механизм работает в одном отдельном потоке на протяжении всей работы RAID-1 и в случае появления поврежденных данных запускает процесс восстановления.
- При каждом запуске создается снимок текущего состояния RAID-массива. Восстановление данных происходит согласно снимку, в момент времени восстанавливается только фиксированный набор областей, что позволяет снизить нагрузку на систему. По окончании восстановления набора областей состояние матрицы ребилда обновляется путем выполнения операции CAS с соответствующей атомарной переменной.

Литература

1. Patterson D. A., Gibson G., Katz R. H. A case for redundant arrays of inexpensive disks (RAID) // Proceedings of the 1988 ACM SIGMOD international conference on Management of data, 1988. P. 109–116.
2. Accelerating your NVMe drives with SPDK. URL: https://spdk.io/doc/about.html (дата обращения: 2024.07.05).
3. Latecki K., Chachulski J. SPDK NVMe BDEV Performance Report Release 23.09. 2023. URL: https://ci.spdk.io/download/performance-reports/SPDK_nvme_bdev_perf_report_2309.pdf (дата обращения: 2024.07.05).
4. Rebuild process. URL: https://github.com/sumr-proj/spdk/pull/11 (дата обращения: 2024.07.05).

УДК 004.4'242

Генерация модульных тестов, основанных на конфигурации Spring-приложения

Шишин К. А., Муравьев И. В., Куликов Е. К.
Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
kirill.a.shishin@gmail.com, muravjovilya@gmail.com, egor.k.kulikov@gmail.com

Разработан механизм анализа контекста Spring-приложения, позволяющий генерировать тестовые сценарии, соответствующие реальному исполнению программы. Предложенный механизм встроен в существующий инструмент автоматизации тестирования и апробирован на реальных проектах.
Ключевые слова: тестирование ПО; автоматическая генерация модульных тестов; фреймворк Spring; мокирование; UnitTestBot Java.

Последние десятилетия активно разрабатываются решения для автоматизации тестирования. Они призваны помочь существенно повысить покрытие программы тестами, многократно снизив время, потраченное на их написание. Довольно известным является эксперимент [1] под названием Coreutils, показывающий, насколько эффективной и полезной может быть автоматизация тестирования.

Среди автоматических генераторов тестов хотелось бы выделить проект с открытым исходным кодом UnitTestBot Java [2]. Это инструмент командной строки и плагин для IntelliJ IDEA, предназначенный для генерации модульных тестов для Java-приложений.

UnitTestBot Java способен создавать хорошие тесты для «чистой» Java (что подтверждается результатами соревнований генераторов тестов [3]), однако для этого языка написано множество фреймворков и библиотек, предъявляющих дополнительные требования к анализу пользовательского кода и виду генерируемых тестов. Один из самых популярных [4] фреймворков на сегодняшний день — Spring: он используется при разработке большинства промышленных проектов на Java. В связи с этим важно, чтобы UnitTestBot Java умел генерировать качественные тесты для приложений, использующих этот фреймворк.

Хотя на момент начала этого исследования UnitTestBot Java уже генерировал какие-то тесты для Spring-приложений, эти тесты сложно было назвать Spring-специфичными. В них, как и при тестировании обычных приложений на Java, мокируется поведение всех объектов, которые находятся вне тестируемого класса. Однако тестирование Spring-приложений подразумевает использование меньшего количества моков благодаря информации о реальном поведении программы, полученной в ходе анализа конфигурации приложения.

В рамках проведенной работы был разработан механизм анализа пользовательских конфигураций, а также в процессе внедрения механизма в инструмент UnitTestBot Java осуществлена модернизация символьного движка.

Суть модернизации состоит в изменении механизма выбора типов символьных объектов: если раньше выбирался произвольный тип, который определялся SMT-решателем как удовлетворяющий ограничениям символьного пути, то теперь рассматриваются только те типы, которые используются в выбранной для генерации тестов конфигурации приложения.

Spring-специфичную информацию движок получает из анализатора конфигураций пользовательского приложения. Сбор этой информации осуществляется с использованием инструментов самого Spring во время инициализации контекста Spring-приложения.

В результате в инструменте UnitTestBot Java был поддержан механизм генерации модульных тестов, основанных на конфигурации Spring-приложения, позволяющий избегать излишнего мокирования и в ряде случаев генерировать тесты, которые более точно отражают реальное поведение программы и больше похожи на те, которые могли бы быть написаны вручную.

Литература

1. Cadar Cristian, Dunbar Daniel, Engler Dawson. KLEE: Unassisted and Automatic Generation of High-Coverage Tests for Complex Systems Programs // Proceedings of the 8th USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation. OSDI'08. USA: USENIX Association, 2008. P. 209–224.
2. UnitTestBot/UTBotJava: Automated unit test generation and precise code analysis for Java. URL: https://github.com/UnitTestBot/UTBotJava (дата обращения: 2024.07.10).
3. Ivanov D. et al. UTBot at the SBFT 2023 Java Tool Competition //2023 IEEE/ACM International Workshop on Search-Based and Fuzz Testing (SBFT). IEEE, 2023. P. 68–69.
4. Java Programming — The State of Developer Ecosystem in 2023 Info-graphic. JetBrains: Developer Tools for Professionals and Teams, 2023. URL: https://www.jetbrains.com/lp/devecosystem-2023/ (дата обращения: 2024.07.10).

УДК 004.457

Анализ системы сборки Yocto Project: устройство кеширования и оптимизация

Кондратенко К. Е., Тиняков С. А., Гаврилов А. В., Заславский М. М., к. т. н.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф

Сборка дистрибутивов Linux с помощью Yocto Project является популярным способом создания дистрибутивов встраиваемых операционных систем. Yocto позволяет всесторонне настроить как процесс сборки, так и результирующий образ, однако нередко сборка занимает много времени (минимальный образ на мощной персональной рабочей станции занимает порядка двух часов реального времени) и задействует большой объем вычислительных ресурсов машины, на которой выполняется сборка. В данном докладе был проанализирован вклад основных шагов сборки в общее время выполнения сборки и в общую нагрузку на ресурсы системы. Сделаны выводы о том, что на первом этапе сборки, когда происходит скачивание исходного кода утилит и пакетов, компиляция почти не происходит, что приводит к малому использованию ресурсов центрального процессора и ОЗУ, а также стало видно, что при увеличении количества зеркал кешей состояния растет и время сверки сигнатур кеша на этих зеркалах.

Ключевые слова: Yocto Project; sstate-cache; ускорение сборки.

Целью работы является анализ сборки Linux-дистрибутива с помощью Yocto Project на предмет выявления поля для оптимизации, выделение ключевых этапов, поэтапный анализ времени процессов и количества занимаемых ресурсов системы.

Так сборка дистрибутива Linux в Yocto Project состоит из нескольких этапов:

- пользовательская настройка;
- скачивание исходного кода;
- применение патчей;
- цикл обработки рецептов (конфигурация, компиляция, установка в рабочую директорию);
- создание образа.

Описанные выше этапы, а именно скачивание исходного кода, применение патчей, цикл обработки рецептов, создание образа, происходят последовательно в рамках одного пакета, однако обработка самих пакетов происходит параллельно, иными словами, один пакет может только скачиваться, в то время как другой уже встраивается в результирующий образ. Сборщик Yocto Project, Bitbake, запускает обработку пакетов так, чтобы в процессе сборки появлялось как можно меньше блокирующих задач и зависимостей, однако все равно такие блокирующие задачи появляются, а иногда происходят ситуации неоптимального использования ресурсов системы, такие ситуации будут рассмотрены ниже.

• В начале сборки, если локально не используются ранее загруженные данные или же архивы исходного кода не размещены в локальной сети с высокой пропускной способностью, происходит скачивание исходного кода утилит и пакетов, в это же время задачи по компиляции либо совсем не выполняются, либо выполняются

в малом объеме, что приводит к тому, что ресурсы системы не используются в полной мере. Это приводит к увеличению времени всей сборки.

• Этапы применения патчей и цикл обработки рецептов нагружают систему почти полностью, что может говорить об оптимальном использовании ресурсов системы, однако на протяжении всей сборки (на протяжении двух часов) было подсчитано, что суммарно набралось порядка 5 минут, когда ресурсы ОЗУ и центрального процессора заняты не более чем на 70 процентов.

• Этап создания образа происходит по мере выполнения блокирующих задач; так, задачи этого этапа выполняются на протяжении всей сборки, однако в самом конце происходит построение системного каталога.

Рассмотрена возможность использования кеша состояний, благодаря использованию которого, в лучшем случае экспериментально, была достигнута скорость сборки 3,5 минуты вместо 120 минут в среднем и без использования sstate-cache (при этом из кеша восстанавливается 99 % задач). Проведен эксперимент, дающий представление о вариациях использования зеркал кеша состояний, в ходе которого установлено, что:

- при росте количества работающих зеркал растет время их анализа;
- при росте количества неработающих зеркал время их анализа тоже растет;
- бывают случаи, когда зеркал меньше 10, что время анализа k зеркал больше времени анализа k + 1 зеркал.

Таким образом, на данном этапе можно сказать, что во время скачивания исходного кода неэффективно используются ресурсы системы, поведение сборщика при работе со sstate-cache требует детального анализа для выявления причин значительного роста времени сверки сигнатур кеша зеркал, а также последующих оптимизаций этого процесса.

Литература

1. Официальная документация проекта Yocto Project // Yocto Project Documentation. — URL: https://docs.yoctoproject.org/index.html.
2. Официальная документация BitBake // BitBake User Manual. — URL: https://docs.yoctoproject.org/bitbake/2.8/index.html.

УДК 004.4’416:004.4’422

Автоматизированная настройка оптимизирующих компиляторных преобразований с учетом особенностей целевых аппаратных платформ

Ефанов Н. Н., к. ф.-м. н., Акимов З. Д., Отращенко А. И., Лебедев Г. К., Подлесных Д. А., Белонин В. В.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Разработан комплекс программ автоматизированной настройки оптимизирующей компиляции посредством GCC, Clang или LCC, проведены эксперименты по оптимизации программ из открытых бенчмарков для архитектур x86, ARM и «Эльбрус». Дан обзор современного состояния предметной области. Показаны варианты улучшения эффективности решения задачи с использованием разработанных инструментов.
Ключевые слова: компиляторы; оптимизация ПО; оптимизирующие проходы; GCC; LLVM; LCC.

На сегодняшний день одним из основных способов оптимизации программного обеспечения является оптимизирующая компиляция [1–4]. Современные компиляторы реализуют сотни различных оптимизирующих проходов [1, 2], тонкое управление которыми позволяет существенно улучшать качество ПО по сравнению со стандартными уровнями оптимизаций (-O2, -O3, -Osize, и др.) практически в любом «необщем» случае [3]. В силу сложности ручного управления приобрели популярность исследования и разработки, посвященные построению методов и инструментов автоматизированного поиска последовательностей оптимизирующих проходов — автонастройке [1], как правило, фокусирующейся на переключении оптимизаций, реже — на изменении последовательности применения [2]. Это задача дискретной оптимизации по пространству большой размерности, и способы решения, реализованные в современных работах, различны: эвристический поиск с применением эволюционных алгоритмов, обучение с подкреплением, классическая оптимизация и др. В подавляющем большинстве решений, применимых в промышленной разработке, можно выделить следующие общие характеристики, ограничивающие эффективность оптимизации:

- компилятор рассматривается как «черный ящик», автонастройка производится путем взаимодействия с менеджером проходов или драйвером, не предоставляющим доступа ко всем настройкам и не раскрывающим внутреннего устройства проходов;
- рассматривается последовательность оптимизаций для одной единицы трансляции, реже — оптимизаций гранулярности функций;
- цикловые оптимизации рассматриваются отдельно;
- параметры проходов, такие как фактор раскрутки циклов, интерливинг-фактор и др., оптимизируются в отдельных решениях [1, 4], специально предназначенных под один тип оптимизаций, а не под всю последовательность;

- обычно производится однокритериальная оптимизация без ограничений, реже — оптимизация с ограничениями;
- методы характеризации программ, как правило, основаны на фиксированных счетчиках инструментирования [1, 2], реже — на комбинациях методов из NLP [4] и методов эмбеддинга графов [2];
- ключевыми факторами построения эффективной системы автонастройки являются гарантии, предоставляемые компиляторной инфраструктурой, и гибкость ее настройки, что и обуславливает популярность LLVM как основы для такой системы; к примеру, для компиляторов, не основанных на LLVM, задача перестановки последовательностей решается крайне редко и ограниченно [2].

Разработанные авторами инструменты позволяют решать задачу автонастройки, частично ликвидируя вышеупомянутые недостатки за счет:

- перестановки проходов компилятора GCC версий 7.3–7.5;
- гибридной потоко-чувствительной характеризации кода на GCC GIMPLE;
- окружения для экспериментов на разных уровнях гранулярности, в том числе при инструментировании исходного кода.

Экспериментально установлено, что применение данных инструментов позволяет уменьшать размер бинарных файлов без потери производительности до 10–12% (GCC) либо до 30% (Clang) для ARMv8, производительность — до 40% в отдельных случаях (GCC), а также дает существенные результаты по подбору линеек компилятора (LCC) для «Эльбруса».

Литература

1. Ashouri A. H. et al. A Survey on Compiler Autotuning using Machine Learning // ACM Computing Surveys (CSUR), 2018. Vol. 51. Issue 5. P. 1–42.
2. Отращенко А. И., Акимов З. Д., Ефанов Н. Н. Разработка средства оптимизации встраиваемого ПО на базе автонастройки перестановкой оптимизационных проходов современного компилятора GCC // Труды МФТИ, 2024. — Т. 16. — № 1 (61). — С. 44–59.
3. Lebedev G., Efanov N. Exploring the Space of Function Level Phase Ordering for Code Size Reduction at Constant Execution Time using Random Optimization Sequences in GCC // Конференция «Инжиниринг и телекоммуникации». 22–23 ноября 2023. P. 370–377.
4. Haj-Ali A. et al. Neurovectorizer: End-to-end vectorization with deep reinforcement learning // Proceedings of the 18th ACM/IEEE International Symposium on Code Generation and Optimization, 2020. P. 242–255.

УДК 004.451.1

Исследование способов ускорения работы DMA для периферийных устройств

Шиповский В. А.[1], Устюжанина М. А.[1,2]
[1] ПАО «Сбербанк»
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1

Исследование посвящено изучению проблем и эффективности возможных оптимизаций работы DMA — технологии прямого доступа к памяти, минуя центральный процессор. В работе планируется рассмотреть механизм VFIO (virtual function input/output) для обеспечения прямого доступа к периферийным устройствам. Это позволяет проектировать драйверы устройств в пользовательском пространстве вместо пространства ядра ОС, что позволяет достичь снижения задержек на переключение контекста. Помимо этого, будет рассмотрено использование общей памяти для минимизации числа копирований при передаче больших массивов данных между процессами.
Ключевые слова: DMA; VFIO; общая память; передача данных.

На сегодняшний день одним из основных способов передачи данных между ПО хоста и периферийными PCI-устройствами является технология DMA (Direct Memory Access), механизм прямого доступа к памяти, минуя центральный процессор (ЦП). Она имеет ряд преимуществ по сравнению с прямым копированием (PIO), которое, наоборот, использует процессор как часть маршрута данных:

- увеличение производительности, получаемое за счет прямого доступа к памяти, минуя ЦП;
- более эффективное использование ресурсов процессора, так как DMA выполняет операции передачи в фоновом режиме, освобождая процессор для других задач;
- снижение задержки, что особенно проявляется при передаче больших объемов данных.

Главная проблема, ограничивающая скорость передачи данных, связана с задержками, вызванными необходимостью смены контекста исполнения процесса. Эта необходимость возникает из-за того, что буфер процесса находится в юзерспейсе, а значит, требуется вызов специальных функций драйвера устройства в ядре ОСи.

В рамках исследования по оптимизации работы DMA в целях уменьшения времени ожидания при передаче и увеличения пропускной способности были изучены: механизм общей памяти между процессом и драйвером в юзерспейсе и технология vfio, позволяющая создавать драйвера в юзерспейсе с аппаратной IOMMU-протекцией адресов.

В результате работы был спроектирован комплект ПО, состоящий из демона, реализующего работу DMA, избегая смены контекста, и тестового клиента для снятия замеров и демонстрации функциональности метода.

Литература

1. Лав Р. Ядро Linux. Описание процесса разработки, 3-е изд. — СПб.: Диалектика, 2022. — С. 364–369.
2. Матвеев М.Д. Ядро Linux. Сборка, настройка, управление. — СПб.: Наука и Техника, 2023. — С. 148–158.
3. Статья из документации Linux. — URL: https://www.kernel.org/doc/html/latest/driver-api/vfio.html.

УДК 004.72

Подходы к снижению коллизий маршрутизации в Mesh-сети в вычислительной системе на кристалле с распределенной памятью

Хайдуков Д. И.[1,2], **Алексеев А. А.**[1]
[1] *ПАО «Сбербанк»*
121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32 кА
dikhaydukov@sberbank.ru
[2] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
khajdukov.di@phystech.edu

Рассмотрены такие подходы к снижению коллизий маршрутизации в mesh-сети, как адресное чередование и гибкий алгоритм DOR. Результаты моделирования на потактовом симуляторе показывают существенный прирост пропускной способности сети как для каждого метода по отдельности, так и для их комбинации.

Ключевые слова: вычислительная система; сеть на кристалле; алгоритм маршрутизации DOR; адресное чередование.

Наиболее популярный в mesh-сетях алгоритм маршрутизации DOR (Dimension Order Routing), при котором пакеты передаются последовательно по измерениям сети [1], не обеспечивает равномерную пропускную способность всех узлов сети при высокой интенсивности трафика (рис. 1). В данных условиях актуально исследование подходов к снижению коллизий при маршрутизации. Новшеством в работе является адаптация классических методов оптимизации производительности сети на кристалле к вычислительной системе с распределенной памятью, а также исследование их совместимости.

В работе рассмотрены следующие подходы к снижению коллизий:

- метод адресного чередования [2], устраняющий коллизии запросов вертикальных узлов путем их жесткой привязки к соответствующим строкам распределенной памяти, однако требующий дополнительной аппаратуры для коммутации запросов при привязке к строке на основе адреса;
- гибкий алгоритм DOR [3], изменяющий последовательность измерений сети при передаче запросов вертикальных и угловых узлов и требующий поддержки механизма избегания взаимоблокировок в каждом маршрутизаторе;
- комбинация двух вышеперечисленных подходов.

Исследование в потактовом симуляторе для сценария с равномерной случайной нагрузкой в 100 %, при котором исполнительные устройства по периметру отправляют запросы в центральные узлы с памятью в mesh 10×10, показало существенный прирост пропускной способности относительно алгоритма DOR для каждого из подходов (рис. 2). Выбор определенного метода зависит от допустимых аппаратных затрат, учитываемых на этапе разработки архитектуры системы.

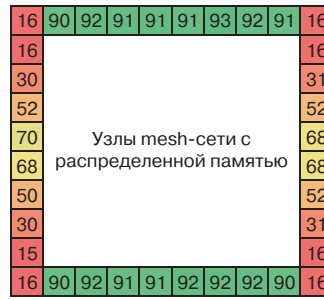


Рис. 1. Интенсивность отправки при заданной равномерной интенсивности 100 % в mesh 10×10 с алгоритмом DOR

Рис. 2. Изменение пропускной способности при заданной интенсивности 100 %

Литература

1. Kaleem M., Isnin I. F. B. A survey on network on chip routing algorithms criteria // Springer Singapore, 2021. P. 455–466.
2. Grammatikakis M. D. et al. Address interleaving for low-cost NoCs // IEEE, 2016. P. 1–8.
3. Papaphilippou P., Van Chu T. Efficient deadlock avoidance for 2D mesh NoCs that use OQ or VOQ routers // IEEE Transactions on Computers, 2024.

УДК 004.428.2

Методы оптимизации кода для архитектуры «Эльбрус» на примере некоторых функций пакета Lapack

Карпочев Б. А.[1,2], Логинов В. Е.[2], к. т. н.
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «МЦСТ»
117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108

Данный доклад описывает методы оптимизации кода для архитектуры «Эльбрус». Дан краткий обзор библиотеки EML и архитектуры e2k. Рассмотрены аппаратные особенности, используемые для оптимизации кода под архитектуру e2k, приведены конкретные примеры оптимизации функций.
Ключевые слова: оптимизация кода; Эльбрус; EML; e2k.

Оптимизация функций вычислительной линейной алгебры под архитектуру любого процессора имеет большое значение, так как эти функции являются основой для большинства алгоритмов численного анализа и высокоуровневых приложений. Пользователи могут столкнуться с потребностью в высокопроизводительных функциях вычислительной линейной алгебры в различных областях, таких как цифровая обработка сигналов, физика, машинное обучение. Оптимизация этих операций напрямую влияет на производительность многих приложений.

Многие производители современных процессоров предоставляют высокопроизводительные библиотеки, содержащие основные пакеты вычислительной линейной алгебры, такие как BLAS и Lapack. Примерами таких библиотек являются MKL и ACML. Эти библиотеки оптимизированы под архитектуру Intel и AMD соответсвенно и полностью нагружают всю доступную аппаратуру, тем самым увеличивая производительность функций. Для архитектуры «Эльбрус» также разработана подобная библиотека под названием EML (Elbrus Multimedia Library) [1].

Основная тема доклада — оптимизация функций вычислительной линейной алгебры, входящих в библиотеку EML, под архитектуру процессоров «Эльбрус». Были рассмотрены различные методы оптимизации, такие как учет количества арифметико-логических устройств, использование Array Prefetch Buffer (APB) [2], аппаратного счетчика и инструкций staa. Также рассматривается применение циклического буфера для оптимизации циклов с рекуррентностью.

В разделе «Примеры оптимизации под e2k» были рассмотрены конкретные примеры функций, таких как LARTV, AXPBY, LATM1 и GETC2. Были продемонстрированы методы оптимизации этих функций, а также оценена теоретическая и практическая производительность.

Таким образом, вышеперечисленные функции были успешно оптимизированы под архитектуру e2k, что позволило значительно повысить их производительность.

Литература

1. Ишин П.А, Логинов В.Е, Василец П.П. Ускорение вычислений с использованием высокопроизводительных математических и мультимедийных библиотек для архитектуры Эльбрус // Вестник воздушно-космической обороны. — М.: Научно-производственное объединение «Алмаз» им. акад. А.А. Расплетина, 2015. — №4 (8). — С. 64–68.
2. Галазин А.Б., Грабежной А.В. Эффективное взаимодействие микропроцессора и подсистемы памяти с использованием асинхронной предварительной подкачки данных // Информационные технологии, 2007. — № 5. — С. 26–31.

УДК 004.45

Реализация в бинарном трансляторе x86->e2k уровня системы менеджера загрузки UEFI

Худякова Е. В.
АО «МЦСТ»
117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108
mcst@mcst.ru

Для загрузки x86 ОС на платформе «Эльбрус» в режиме UEFI в бинарном трансляторе x86->e2k реализован алгоритм менеджера загрузки UEFI и поддержаны четыре протокола UEFI с использованием имеющихся в трансляторе модулей для взаимодействия с устройствами хранения данных. Произведена загрузка x86 ОС Linux на машине «Эльбрус-8С2».
Ключевые слова: «Эльбрус»; бинарный транслятор; UEFI; x86; e2k.

Частью бинарного транслятора x86->e2k для запуска x86 ОС на процессоре архитектуры «Эльбрус» является встроенное программное обеспечение BIOS. На данный момент BIOS является устаревшим и повсеместно заменяется прошивками на базе стандарта UEFI. В связи с этим было принято решение о переходе к загрузке x86 ОС на платформе «Эльбрус» в режиме UEFI.

Одним из базовых элементов UEFI является встроенный менеджер загрузки. При первичной установке ОС он формирует список блочных устройств, присутствующих в системе, и пытается произвести загрузку последовательно с каждого устройства из списка. В рамках создания UEFI-прошивки в бинарном трансляторе был реализован алгоритм работы менеджера загрузки и необходимые для его работы компоненты UEFI, в которые входят:

- компоненты, обеспечивающие доступ к блочным устройствам;
- компоненты, обеспечивающие доступ к файловой системе и файлам.

В режиме UEFI блочные устройства абстрактно представлены интерфейсами протокола Block I/O — структурами из переменных и указателей на функции. Любые внешние программы, включая менеджер загрузки, могут взаимодействовать с блочным устройством только через функции протокола Block I/O. Обычно он создается UEFI-драйвером контроллера устройства, но на этапе первичной установки ОС его должна создать прошивка.

Ранее в бинарном трансляторе для нужд BIOS были реализованы низкоуровневые драйверы нескольких типов устройств хранения данных — в виде класса x86io_StorageDev_t и его наследников. В рамках данной работы в бинарном трансляторе был создан дескриптор протокола Block I/O, хранящий адрес интерфейса протокола и указатель на соответствующее этому интерфейсу устройство, представленное объектом класса x86io_StorageDev_t. Функции протокола реализованы через методы класса с предварительным поиском устройства по переданному адресу интерфейса протокола. Также на основе Block I/O был реализован поддерживающий невыровненные обращения протокол Disk I/O. После добавления в систему интерфейсов данных протоколов для каждого распознанного бинарным транслятором устройства хранения данных менеджеру загрузки обеспечена возможность для формирования списка блочных устройств.

Для поиска на устройстве загрузчика ОС менеджер пользуется интерфейсами протоколов Simple File System и File. Используемый UEFI формат файловой системы FAT предполагает разбиение региона данных (памяти, где хранятся файлы) на кластеры. Для получения цепи кластеров, в которых расположен файл, используется таблица FAT. Необходимой для работы с файлами информацией является расположение FAT, корневой директории и региона данных, размеры кластера и сектора. Для ее хранения и дальнейшего использования в бинарном трансляторе была создана специальная структура, являющаяся частью дескриптора протокола Simple File System. Для реализации функций протокола File в бинарном трансляторе был создан класс с дублирующими функции методами, содержащий в том числе цепь кластеров файла и адрес интерфейса протокола Disk I/O, привязанного к разделу диска, содержащему файл — через его функции реализуются чтение и запись файла. Чтение директорий содержит дополнительное преобразование записи в директории FAT в специальную структуру, определяемую стандартом UEFI.

В итоге для поддержки алгоритма работы менеджера загрузки UEFI для случая установки ОС в бинарном трансляторе были реализованы четыре протокола UEFI. В результате была успешно произведена установка и загрузка x86 ОС семейства Linux (Ubuntu-23.10) на машине «Эльбрус-8С2».

Литература

1. Khudiakova E. V., Rozhin A. F. Implementation of the NVMe-controller driver in the binary compiler Elbrus-x86 // IX International Conference Engineering & Telecommunication En&T-2022. Book of Abstracts, 2022. P. 14–21.
2. UEFI Specification Version 2.0 // UEFI Forum. URL: https://uefi.org/specifications.
3. Microsoft Extencible Firmware Initiative FAT32 File System Specification. URL: https://download.microsoft.com/download/1/6/1/161ba512-40e2-4cc9-843a-923143f3456c/fatgen103.doc.

УДК 621.389

Комбинированное устройство термоиндикации на преимущественно отечественной элементной базе для систем холодовых цепей

Авдеев П. А., Татаринов Д. И.
Филиал РТУ МИРЭА в г. Фрязино
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2А

Разработано устройство на базе микроконтроллера MIK32. Приведены характеристики предлагаемого устройства. Показан вариант создания устройства термоиндикации с использованием преимущественно отечественной элементной базы.

Ключевые слова: MIK32; термоиндикация; система холодовых цепей; отечественная компонентная база.

Термоиндикация в системах холодовых цепей играет определяющую роль в обеспечении качества и безопасности продукта, требующего определенного режима температурного хранения. Она позволяет отслеживать и записывать температуру продуктов в режиме реального времени с заданным временным диапазоном на всех этапах транспортировки и хранения.

Цель данной работы — сделать вывод о возможности создания устройства термоиндикации для систем холодовых цепей преимущественно на отечественной компонентной базе, для этого был сделан анализ подобных устройств, созданных на иностранной компонентной базе. В результате анализа были выявлены свойства, которыми должно обладать конкурентоспособное устройство подобного типа:

- сверхнизкое энергопотребление;
- погрешность измерений температуры не выше 0,5 °C;
- возможность установки временного интервала измерения температуры;
- возможность извлечения информации с устройства.

Было произведено схемотехническое моделирование на основе отечественного микроконтроллера MIK32, в результате которого был получен прототип устройства. Также было создано программное обеспечение для управления данным устройством с применением алгоритмов по оптимизации энергопотребления устройства. В совокупности программного обеспечения и прототипа устройства было получено устройство термоиндикации с вышеуказанными свойствами. Был сделан вывод о возможности создания такого устройства преимущественно на отечественной компонентной базе.

Литература

1. Техническое описание MIK32 // АО «Микрон». — URL: https://mikron.ru/upload/docs/mcu/Specification_RISC-V_AMUR_MIK32.pdf (дата обращения: 10.07.2024).
2. Alshdadi A. et al. An IoT Smart System for Cold Supply Chain Storage and Transportation Management // Engineering, Technology & Applied Science Research, 2024. Vol. 14. № 2. P. 13167–13172.

УДК 621.396

Разработка модели когерентного приемника сигналов с линейной модуляцией в среде SystemVue

Марков А. С.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
markov_rt@mail.ru

Работа посвящена созданию модели когерентного приемника в среде SystemVue для сигналов с линейной модуляцией. Модель включает формирователь сигнала, приемник высокочастотного сигнала и измеритель ошибок. Приведены результаты расчета диаграммы фазовых состояний для модуляций QPSK и 8-PSK.
Ключевые слова: МИЭТ; SystemVue; QPSK; 8-PSK; диаграмма фазовых состояний; Constellation.

Введение

Современные системы связи широко используют когерентные приемники, которые обеспечивают высокую чувствительность и надежность передачи данных. Когерентная обработка сигналов, основанная на синхронизации с сигналом передатчика, позволяет эффективно подавлять шумы и помехи, что особенно важно при ограниченном уровне сигнала или в условиях сложной среды распространения радиоволн (городские условия) [1, с. 106–108].

Целью данной работы является создание модели когерентного приемника для сигналов с линейной модуляцией в среде SystemVue.

Анализ параметров когерентного приема сигналов с линейной модуляцией производится в функциональной схеме, включающей формирователь идеального высокочастотного модулированного сигнала, приемник высокочастотного модулированного сигнала и измеритель битовой ошибки приема тестового информационного сигнала [2, с. 64–68].

Формирователь модулированного сигнала формирует идеальный тестовый высокочастотный модулированный сигнал без шумов и искажений в соответствии с информационной цифровой последовательностью и принятыми параметрами модуляции.

Функциональная схема приемника высокочастотного модулированного сигнала включает компоненты, параметры которых непосредственно влияют на достоверность приема информации для принятых характеристик радиоканала.

Измеритель битовых ошибок определяет относительную битовую ошибку при помощи сравнения исходной битовой последовательности, использованной в передатчике при формировании модулированного сигнала, и битовой последовательности на выходе приемника (детектора).

В модели (рис. 1) предполагается, что среда распространения радиоволн не искажает идеальный сигнал формирователя модулированного сигнала, т. е. является широкополосной (не искажает спектр сигнала), стационарной (параметры принимаемого сигнала неизменны в течение сеанса связи), однолучевой (принимается единственная копия излученного сигнала). Вносимый шум является аддитивным белым гауссовым шумом.

Рис. 1. Расчетная модель в SystemVue

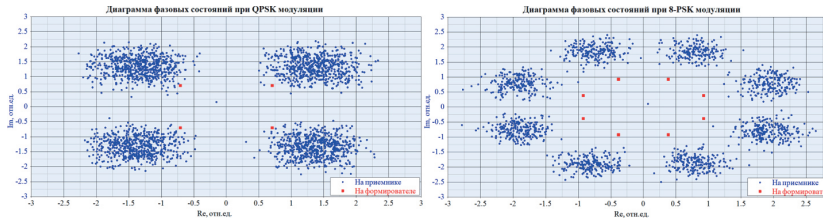


Рис. 2. Диаграмма фазовых состояний
(слева — для QPSK-модуляции, справа — для 8-PSK-модуляции)

Работа формирователя модулированного сигнала и приемника представлена фазовыми состояниями комплексной огибающей (рис. 2). Рассеяние мгновенных значений квадратурных компонентов комплексной огибающей на диаграмме фазовых состояний невелико, это свидетельствует о том, что приемник синхронизирован с формирователем модулированного сигнала.

Заключение

Разработка модели когерентного приемника в среде SystemVue предоставляет удобный инструмент для изучения и оптимизации характеристик приемников сигналов с линейной модуляцией.

Литература

1. Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь: Учебное пособие для вузов. — 3-е, изд., перераб. и доп. изд. — М.: Горячая линия — Телеком, 2023. — 518 с.
2. Галкин В. А. Приемо-передающие устройства для радиосетей передачи речи и данных: Учебное пособие для вузов. — 3-е, изд., перераб. и доп. изд. — М.: Горячая линия — Телеком, 2023. — 500 с.

УДК 621.3.049

Оптимизация сбора траекторного профиля программы методом инструментирования

Шампаров В. Е.[1,2]
[1] *АО «МЦСТ»*
117437, Москва, ул. Профсоюзная, 108
viktor.shamparov@yandex.ru
[2] *Московский физико-технический институт*
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Для микропроцессоров «Эльбрус» в составе компилятора LCC реализовано траекторное профилирование программы в целях дополнительной оптимизации программ методами PGO. В данном докладе рассмотрены методы оптимизации профилирования. Данные оптимизации позволили ускорить работу профилируемой программы в среднем в 30,7 раз на задачах бенчмарков SPEC CPU1995, 2000, 2006.

Ключевые слова: компиляторы; PGO; Эльбрус; траекторное профилирование.

Одним из методов оптимизации программ является PGO (profile-guided optimization). Профилирование для PGO обычно выполняется методом инструментирования кода компилятором. При инструментировании неизбежно возникают накладные расходы на сбор профиля, часто заметно увеличивающие время работы профилируемой программы.

Одной из вариаций профилирования является траекторное профилирование (его различные варианты описаны в работах [1–4]). В ходе данного профилирования собирается информация о том, какие траектории часто выполняются в программе. В составе компилятора LCC для микропроцессоров с архитектурами «Эльбрус» и SPARC разработана программная система траекторного профилирования, близкая к описанной в работе [4], для улучшения некоторых оптимизаций, выполняемых в составе PGO.

Инструментирование и библиотека поддержки траекторного профилирования оптимизированы для минимизации накладных расходов профилирования. Использованы следующие способы оптимизации:

- буферизация поступающих в библиотеку поддержки данных об узлах и дугах графа потока управления; данная оптимизация позволяет почти избавиться от накладных расходов на вызовы функций библиотеки поддержки;
- параллельная обработка буферов в библиотеке поддержки;
- разрежение обработки буферов с фактором N (обрабатывается только один набор буферов из N) или с растущим по простым числам фактором разрежения;
- оптимизация способа хранения собранного профиля в библиотеке поддержки, использующего трехуровневую хеш-таблицу для хранения счетчиков траекторий:
  - использование TNV-таблиц [5] вместо хеш-таблиц;
  - structure peeling в представлении TNV-таблиц;
  - оптимизация расположения данных ключей TNV-таблиц в едином буфере.

Измерение эффекта проведенных оптимизаций проводилось на компьютере с микропроцессором «Эльбрус-8СВ» на наборах бенчмарков SPEC CPU1995, SPEC CPU2000, SPEC CPU2006 [6]. Среднее геометрическое ускорение траекторного профилирования в результате перечисленных оптимизаций составило 30,7 раз.

Литература

1. Ball T., Larus J. R. Efficient Path Profiling // Proceedings of the 29th Annual ACM/IEEE International Symposium on Microarchitecture. IEEE Computer Society, 1996. P. 46–57.
2. D'Elia D. C., Demetrescu C. Ball-Larus Path Profiling across Multiple Loop Iterations // Proceedings of the 2013 ACM SIGPLAN International Conference on Object Oriented Programming Systems Languages & Applications. New York: Association for Computing Machinery, 2013. P. 373–390.
3. Marin G., Alexandrov A., Moseley T. Break Dancing: Low Overhead, Architecture Neutral Software Branch Tracing // Proceedings of the 22nd ACM SIGPLAN/SIGBED International Conference on Languages, Compiler. and Tools for Embedded Systems. New York: Association for Computing Machinery, 2021. P. 122–133.
4. Roy S., Srikant Y. N. Profiling k-Iteration Paths: A Generalization of the Ball-Larus Profiling Algorithm // Proceedings of the 7th Annual IEEE/ACM International Symposium on Code Generation and Optimization. IEEE Computer Society, 2009. P. 70–80.
5. Calder B., Feller P., Eustace A. Value Profiling and Optimization // Journal of Instruction-Level Parallelism, 1999. Vol. 1. P. 1–37.
6. Официальный сайт консорциума SPEC. — URL: https://www.spec.org/benchmarks.html#cpu (дата обращения: 02.07.2024).

УДК 537.9

Разработка запоминающих устройств нового поколения на базе сегнетоэлектриков

к. ф.-м. н. Чуприк А. А.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
chouprik.aa@mipt.ru

Представлены результаты разработки научно-технологических основ энергонезависимой памяти с недеструктивным считыванием на базе сегнетоэлектрических тонких пленок легированного оксида гафния, включая результаты инжиниринга многослойных структур элементов хранения, технологии формирования многослойной структуры элемента хранения в едином технологическом цикле, макет запоминающего устройства, физико-математических моделей для выполнения симуляции работы разрабатываемых элементов памяти и результаты экспериментальной характеризации устройств.
Ключевые слова: энергонезависимая память; сегнетоэлектрическая память; оксид гафния.

Среди концепций энергонезависимой памяти нового поколения, альтернативных флеш-памяти, сегнетоэлектрическая память представляет особенный случай, поскольку уже давно была выведена на рынок: энергонезависимая память с произвольным доступом (ferroelectric random access memory, FRAM) обладает наносекундным временем записи/чтения, очень низким энергопотреблением и почти неограниченным ресурсом перезаписи. Устройства FRAM на основе традиционных сегнетоэлектриков класса перовскитов выпускаются в мире в последние 20 лет по технологии вплоть до 90 нм. Вместе с тем проблемы с масштабированием и технологической совместимостью ограничивали область применения этих устройств нишевыми рынками. В результате исследования и разработки в направлении FRAM были прекращены в середине 2000-х гг., что положило конец буму сегнетоэлектрической памяти. Между тем, открытие в 2011 году сегнетоэлектрических свойств в легированных тонкопленочных слоях на основе HfO_2 и, в частности, сплавных пленках HfO_2-ZrO_2 возродило интерес исследователей и инженеров, поскольку эти материалы используются в современной КМОП-технологии в качестве подзатворных диэлектриков в полевых транзисторах и конденсаторах и сегнетоэлектрические материалы на их основе автоматически с ней совместимы. Поэтому разработка сегнетоэлектрической памяти на основе этого класса материалов потенциально может позволить преодолеть вышеуказанные проблемы.

Данная работа направлена на создание высокоплотной энергоэффективной энергонезависимой памяти на основе концепций памяти с недеструктивным типом считывания, которые позволят упростить архитектуру памяти, что, в свою очередь, позволит достичь высокой плотности ячеек памяти. С этой целью получили развитие следующие основные направления:

- подход, основанный на хранении данных в затворах сегнетоэлектрических полевых транзисторов FeFET;

- подход, основанный на использовании резистивных сегнетоэлектрических (FTJ) элементов для хранения данных.

Первый подход реализует концепцию, подобную флеш и позволяет реализовывать блочные накопители по NAND-схеме, что дает потенциальную возможность достижения плотностей, сравнимых с флеш, являющейся на данный момент лидером по плотности хранения данных среди твердотельных накопителей. Второй подход обеспечивает возможность создания двухтерминальных ячеек памяти с недеструктивным чтением и может быть использован для реализации энергоэффективной памяти с произвольным доступом, а также в перспективных смешанно-сигнальных схемах в качестве настраиваемых резисторов.

В статье представлены результаты разработки научно-технологических основ энергонезависимой памяти с недеструктивным считыванием на базе сегнетоэлектрических тонких пленок легированного оксида гафния. В частности, представлены результаты инжиниринга многослойных структур элементов хранения FeFET и FTJ (включая материалы слоев, их толщины и условия роста, параметры и условия отжигов) и их геометрии, направленного на достижение высоких технических характеристик. Разработаны технология формирования многослойной структуры элемента хранения в едином технологическом цикле и конструктивно-технологические решения изготовления ячеек энергонезависимой памяти, включая выбор оптимальной концепции и топологии. Разработаны физико-математические модели для выполнения симуляции работы разрабатываемых элементов памяти, а также методики высокоскоростной характеризации ячеек памяти и экстракции физических параметров из экспериментальных данных. Изготовлены макеты энергонезависимых запоминающих устройств на основе сегнетоэлектрических материалов и представлены экспериментальные результаты измерения их технических характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-03-2024-117, проект № FSMG-2022-0031).

Литература

1. Böscke T. S. et al. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films // Applied Physics Letters, 2011. Vol. 99. № 10.

УДК 621.793.06

Принципы работы и возможности технологии аэрозольной печати для создания электронных устройств

Ефимов А. А., Лабутов Д. А., Патарашвили А. Н., Масленников Д. В., Арсенов П. В., Иванов В. В.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
efimov.aa@mipt.ru

Работа демонстрирует достижения в аэрозольной печати, показывая ее способность создавать функциональные структуры с детализацией до 10 мкм на различных подложках. Технология позволяет изготавливать высокоточные устройства для применения в таких отраслях, как микроэлектроника, энергетика, биомедицина и др.

Ключевые слова: печатная электроника; аэрозольная печать; наночастицы.

В результате проведенного исследования установлено, что аэрозольная печать представляет собой инновационную технологию, основой которой является нанесение материалов на разнообразные подложки посредством аэрозольных частиц. Эта технология открывает широкие возможности для создания функциональных структур и высокоточных устройств, применимых в различных отраслях промышленности [1].

Главный принцип аэрозольной печати заключается в формировании аэрозольного потока, состоящего из мельчайших частиц материала, который затем направляется на подложку с помощью струи газа. Процесс можно условно разделить на несколько этапов. Во-первых, материал, предназначенный для нанесения, преобразуется в аэрозольное состояние. Достижение этого возможно различными способами, включая ультразвуковое, пневматическое или электроэрозионное распыление. В результате получается мелкодисперсный аэрозоль, содержащий частицы размером от нескольких нанометров до десятков микрометров. Далее созданный аэрозоль направляется к печатающей головке через специальную систему трубок, обеспечивающих стабильность потока. Печатающая головка направляет аэрозоль на подложку, где частицы постепенно оседают и формируют нужную структуру. Благодаря высокой точности контроля перемещения головки и параметров аэрозольного потока можно получить структуры с разрешением до нескольких микрометров. На финальном этапе осажденный на подложке материал закрепляется различными методами, такими как термообработка, ультрафиолетовая сушка или химическое закрепление. Это обеспечивает прочное закрепление и функциональность нанесенного слоя.

Аэрозольная печать обладает рядом уникальных возможностей и преимуществ, делающих ее востребованной в различных высокотехнологичных отраслях: технология позволяет создавать структуры с разрешением до 10 мкм и меньше, что особенно важно для микроэлектроники и микроэлектромеханических систем (МЭМС); аэрозольная печать совместима с широким спектром материалов, включая металлы, полимеры, керамику и биоматериалы. Это позволяет применять ее в различных областях от нанотехнологий до биомедицины; технология может быть

использована для нанесения материалов на подложки различной природы, включая стекло, керамику, металл, пластик и гибкие материалы. Это открывает возможности для создания гибкой электроники и других современных устройств; аэрозольная печать обеспечивает высокую степень использования материала за счет точного локального нанесения, что сокращает отходы и снижает затраты на материалы. Кроме того, отсутствует необходимость использования агрессивных химических растворителей.

Применения аэрозольной печати:

1. Электроника и микроэлектроника:
   - создание тонкопленочных транзисторов, гибких дисплеев и других компонентов;
   - производство высокочастотных устройств и антенн.
2. Биомедицинские приложения:
   - печать биосенсоров и диагностических устройств, которые могут быть использованы для мониторинга здоровья и диагностики заболеваний;
   - создание биосовместимых материалов и 3D-печать структур для тканевой инженерии и регенерационной медицины.
3. Энергетика:
   - изготовление солнечных элементов и других устройств для преобразования энергии с использованием высокоэффективных материалов.
4. Сенсорные системы и носимые устройства:
   - производство гибких сенсоров для носимых гаджетов и медицинских устройств, которые могут мониторить различные показатели в реальном времени;
   - интеграция функциональных элементов в ткани для создания умных текстильных изделий.

В заключение заметим, что аэрозольная печать — это перспективная и многообещающая технология, открывающая широкие возможности для создания высокоточных и сложных структур в различных отраслях науки и техники. Ее уникальные преимущества, такие как высокое разрешение, гибкость в выборе материалов и возможность нанесения на различные подложки, делают ее все более популярной и востребованной в современном мире.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10127, https://rscf.ru/project/22-79-10127.

Литература

1. Wilkinson N.J., Smith M.A.A., Kay R.W., Harris R.A. A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing // Advanced Manufacturing Processes, 2019. Vol. 105. P. 4599–4619. DOI: 10.1007/s00170-019-03438-2.

УДК 621.383.52

Фотосенсорика средневолнового ИК-диапазона на основе коллоидных квантовых точек

к. х. н. Попов В. С.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Проведены экспериментальные работы по созданию фотосенсоров на основе коллоидных квантовых точек, обладающих чувствительностью в средневолновом ИК-диапазоне.

Ключевые слова: фотосенсор; MWIR; коллоидные квантовые точки; ККТ.

Разработкам фоточувствительных элементов на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) в последнее время уделяется большое внимание благодаря существенным преимуществам, которые обеспечивает их применение: упрощение технологии, снижение ограничений на шаг фоточувствительных элементов вплоть до дифракционного предела, снижение стоимости изготовления [1]. Для видимого и коротковолнового ИК-диапазонов за последние несколько лет достигнуты большие успехи, в частности на основе ККТ разработаны матрицы мегапиксельного формата, а также матрицы с предельным шагом фоточувствительных элементов 1,62 мкм [2].

Фотосенсорика средневолнового ИК-диапазона на основе коллоидных квантовых точек только находится в стадии развития и пока не перешла к промышленным образцам. Основное внимание исследователей в этой области в настоящее время сфокусировано на поиске оптимального материала ККТ, разработке способов синтеза ККТ и их постсинтетической обработки поверхности, создании новых архитектур фоточувствительных элементов.

В лаборатории квантовой фотосенсорики МФТИ проводятся поисковые исследования, направленные на создание фоточувствительных структур на основе ККТ халькогенидов ртути, обладающих чувствительностью к излучению средневолнового ИК-диапазона (3–5 мкм). Проводимые работы имеют комплексный характер и затрагивают вопросы, связанные с синтезом ККТ и их постсинтетической обработкой, исследованием способов формирования фоточувствительных слоев, включая методы, пригодные для печатных технологий электроники, изучения фотосенсорных характеристик получаемых фоточувствительных структур.

В ходе проведенных работ исследованы зависимости характеристик ККТ от условий синтеза, разработаны новые методики синтеза, а также получения чернил на основе ККТ, пригодных для формирования фоточувствительных слоев методами печатной электроники, лабораторные методики формирования фоточувствительных элементов, стенд для исследования фотосенсорных характеристик в средневолновом ИК-диапазоне. В результате в настоящее время впервые в РФ получены фоточувствительные элементы на основе ККТ, обладающие чувствительностью в средневолновом ИК-диапазоне.

Литература

1. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V., Razumov V. F. Russian Chemical Reviews, 2024, 93, RCR5113.
2. Попов В. С., Пономаренко В. П., Попов С. В. Прикладная физика. — 2023, 6, 45.

УДК 538.911, 538.915

Самосборка углеводородных молекул для получения новых аллотропов графена

Катин К. П.[1,2], Березницкий И. В.[1,2], Маслов М. М.[1,2]
[1] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
[2] НИИ проблем развития научно-образовательного потенциала молодежи
119620, г. Москва, ул. Авиаторов, 14-55
KPKatin@yandex.ru

Методом молекулярной динамики исследован процесс самосборки углеводородных молекул на металлической подложке. Определена прочность, теплопроводность и проводимость полученных аллотропов.
Ключевые слова: графен; аллотропы; теория функционала плотности.

Как известно, запрещенная зона чистого графена имеет нулевую ширину, что не позволяет использовать этот материал в качестве полупроводника. С этим связан большой интерес к аллотропам графена, представляющим собой однослойные углеродные материалы с напряженной структурой, в которых углы между C-C-связями отличаются от 120° и образуют не только шестиугольники, но и другие фигуры. Компьютерный поиск показал, что существует множество аллотропов, некоторые из них по энергии отличаются от графена всего на несколько десятых электронвольта в расчете на один атом [1]. Многие из таких аллотропов являются полупроводниками [2] и могут использоваться в электронике [3]. Наиболее перспективным способом синтеза аллотропов представляется самосборка подходящих углеводородных молекул. Плоские молекулы могут быть ориентированы подходящим образом за счет притяжения к металлической подложке, что упрощает их самосборку. Таким способом уже были успешно синтезированы некоторые аллотропы.

В рамках настоящего доклада мы обсуждаем общие требования к структуре молекул, из которых может собираться 2D-материал. На основе этих требований предлагаются подходящие прекурсоры. Процесс их превращения в 2D-материал на поверхности золота, серебра и меди исследуется при помощи молекулярной динамики. Электронная структура, прочность и теплопроводность получившегося 2D-материала исследуются в рамках PBE-GGA-подхода. Показано, что его упругие константы близки к характерным значениям, полученным ранее для графинов [4].

Создание новых аллотропов графена расширит возможности для применения этого материала в электронике.

Работа поддержана РНФ (проект 23-23-00432).

Литература

1. Wang Z., Zhou X.-F., Zhang X., Zhu Q., Dong H., Zhao M., Oganov A. R. Phagraphene: A Low-Energy Graphene Allotrope Composed of 5–6–7 Carbon Rings with Distorted Dirac Cones, Nano Lett. 15 (2015) 6182–6186.
2. Maździarz M., Mrozek A., Kuś W., Burczyński T. Anisotropic-Cyclicgraphene: A New Two-Dimensional Semiconducting Carbon Allotrope, Materials 11 (2018) 432.

3. Tromer R. M., Pereira M. L. Júnior, Lima K. A. L., Fonseca A. F., da Silva L. R., Galvão D. S., Ribeiro Luiz A. Junior, Mechanical, Electroni. and Optical Properties of 8-16-4 Graphyne: A 2D Carbon Allotrope with Dirac Cones // J. Phys. Chem., 2023. C 127. 12226–12234.
4. Polyakova P. V., Murzaev R. T., Lisovenko D. S., Baimova J. A. Elastic constants of graphane, graphyn. and graphdiyne // Computational Materials Science, 2024. 244. 113171.

УДК 621.385.032; 537.533.2

Разработка масштабируемого управляемого автоэмиссионного источника электронов на основе углеродных наноматериалов

Сень В. В., к. ф.-м. н., Порохов Н. В., к. т. н., Филиппов И. А., Мумляков А. М., к. т. н., Ануфриев Ю. В., Шибалов М. В., Рыков А. С., Аниканов А. А., Красильников М. И., Шевченко А. Р.
Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук
115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А, стр. 3
kb1nic@mail.ru

Разработана технология изготовления масштабируемого управляемого автоэмиссионного источника электронов на основе углеродных наноматериалов, позволяющего получать электронный пучок произвольной формы с плотностью тока не менее 0,07 А/см^2 после вытягивающего электрода. Разработанная технология позволяет изготавливать автоэмиссионные источники электронов электровакуумных микроприборов на коммерчески доступном серийном оборудовании для производства полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: вакуумная электроника; углеродные наноматериалы; автоэмиссия; источник электронов.

Так как в частотном диапазоне более 100 ГГц у традиционных полупроводниковых приборов и интегральных схем происходит падение эффективности и уровня выходной мощности, одним из перспективных вариантов решения данной проблемы является разработка миниатюрных электровакуумных СВЧ-приборов на основе автоэмиссионных катодов. Кроме того, автоэмиссионные приборы имеют значительно более высокую стойкость к ионизирующему облучению, чем традиционные полупроводники, так как основаны на другом принципе работы и теряют работоспособность только при физическом разрушении конструкции прибора.

Применение автоэмиссионных острийных структур Спиндта ограничено необходимостью поддержания высокого уровня вакуума (10^{-7} Торр и более) для защиты катодных элементов от ионной бомбардировки, а большая величина шунтирующей емкости катодно-сеточного узла таких конструкций приводит к образованию значительных токов утечки в структуре катод — сетка, что сильно ограничивает рабочую частоту такой конструкции.

Применение конструкций с катодами на основе углеродных наноматериалов (УНМ) сдерживается отсутствием комплексных решений в части сопряжения высокотемпературных технологических процессов синтеза УНМ с изготовлением других узлов электровакуумных микроприборов.

В рамках данной работы были разработаны масштабируемые управляемые автоэмиссионные источники электронов на основе УНМ с выходной плотностью тока электронного пучка не менее 0,07 А/см^2, работающие при давлении остаточных газов $2 \cdot 10^{-6}$ Торр. Конструкция и технология изготовления катодного [1] и вытягивающего узлов данного источника электронов позволяют решить ряд ключевых проблем:

1) минимизация зазора катод — вытягивающий электрод;
2) провисание и разрушение вытягивающего электрода из-за нагрева в результате перехвата части электронного пучка;

3) неравномерное распределение токовой нагрузки по всей поверхности автокатода;
4) минимизация разрушения поверхности автоэмиссионных катодов из-за ионной бомбардировки;
5) минимизация токов утечки в структуре катод — вытягивающий электрод;
6) быстрая адаптация размеров источника электронов под требования разработчика электровакуумных приборов.

Полученный научно-технологический задел необходим для разработки и изготовления широкого спектра вакуумных микроприборов.

Литература

1. Мумляков А. М., Першина Е. А., Шибалова А. А., Шибалов М. В., Ануфриев Ю. В., Филиппов И. А., Сень В. В., Тархов М. А. Исследование гибридной структуры n-алмаза и углеродных наностенок, синтезированной методом RF-PECVD // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2023. — Т. 16. — № 3.2. — С. 211–216.

УДК 547.279.2

О результатах работы лаборатории фоточувствительных и электроактивных материалов по разработке компонентов для химически усиленных фоторезистов. От колбы до реактора

Кузнецов И. Е.[1], Заморецков Д. С.[1], Сидельцев М. Е.[1], Новиков А. С.[1], Лолаева А. В.[1], Кузнецова Н. А.[1,2], Малков Г. В.[1], Аккуратов А. В.[1]
[1] ФИЦ ПХФ и МХ РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1
akkuratow@yandex.ru
[2] АО «НИОПИК»
123001, г. Москва, ул. Большая Садовая, 1, корп. 4

В данной работе систематизированы исследования молодежной лаборатории ФИЦ ПХФ и МХ РАН, образованной в 2022 году, по разработке простых подходов к получению функциональных материалов для российских фоторезистов. Проведена отработка синтеза трифенилсульфоний трифлата, бис(трет-бутилфенил)йодоний трифлата и производных норборнендикарбоксимида в килограммовых количествах. Создан задел по синтезу адамантансодержащих мономеров для полимерной основы фоторезистов 193 нм.

Ключевые слова: трифенилсульфониевые соли; дифенилйодониевые соли; адамантан; фоторезист; фотолитография.

Введение

Производство микроэлектроники методом литографии в глубоком ультрафиолете проводится с использованием большого количества разнообразных материалов [1]. Важное место среди них занимают фоторезисты (ФР) с химическим усилением. В составе современных ФР есть фотогенератор кислоты (ФГК) и полимер, зачастую включающий звенья на основе метакрилатных производных каркасных алициклов. Лабораторные методы получения большинства ФГК, а также сложных эфиров метакриловой кислоты основаны на сложных и трудномасштабируемых синтетических методах [2, 3], что ограничивает доступность ФР и делает его стоимость чрезвычайно высокой.

Реакторный синтез перспективных ФГК и метилметакрилатов на основе адамантанов и изоборнеола

В ходе работы систематически оптимизированы условия для получения трифенилсульфоний трифлата (PAG 1), бис(трет-бутилфенил)йодоний трифлата (PAG 2), нонафторбутансульфоната норборнендикарбоксимида (PAG 3), а также 2-метиладамантан-2-ил метакрилата (рис. 1).

Преимущество предложенных подходов заключается не только в сокращении количества синтетических стадий, но и в использовании недорогих и доступных реагентов. К примеру, на финальной стадии ацилирования соединения **7** мы смогли исключить применение комбинации органического основания и катализатора (триэтиламин и *N,N*-диметиламинопиридин) и заменить их на водный раствор карбоната натрия. Синтез сульфониевых и йодониевых фотосолей предложено проводить по модернизированным схемам без низкостабильных магнийорганических реактивов и йодаренов. Важнейшим результатом стало определение оптимальных

условий для ацилирования стерически затрудненных адамантанолов. Детальное исследование более 18 различных систем позволило подобрать действенный метод воспроизводимого получения 2-метиладамантан-2-ил метакрилата. Данная методика была адаптирована для синтеза мономеров, содержащих изоборнильные, миртанильные и пиненовые каркасные фрагменты.

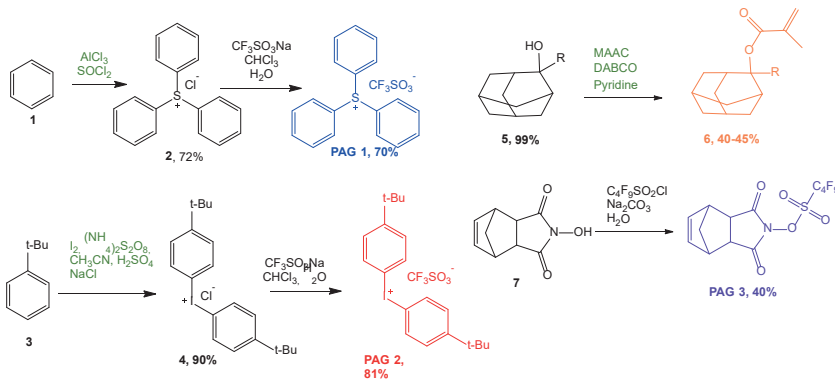


Рис. 1. Получение ФГК **PAG 1-3** и 2-метиладамантан-2-ил метакрилата в оптимизированных условиях для реакторного синтеза

Заключение

Осуществлен успешный переход от лабораторного синтеза ФГК и мономеров на основе алициклов к их реакторному производству. В случае сульфониевых и йодониевых солей выход продуктов с одного цикла достигает до 1 кг. Ожидается, что дальнейшее масштабирование синтеза данных материалов в соответствии с разработанными методиками не вызовет трудностей, что, в свою очередь, сделает фоторезисты доступными для потребителя.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (122111700041-8).

Литература

1. Quero J. M., Perdigones F., Aracil C. Microfabrication technologies used for creating smart devices for industrial applications // Smart Sensors and MEMS: Intelligent Devices and Microsystems for Industrial Applications (Sec.Ed.) Ed. by Nihtianov S. and Luque A., 2018. P. 291–311.
2. Hossain Md. D, Ikegami Y. and Kitamura T. Reaction of Arenes with Iodine in the Presence of Potassium Peroxodisulfate in Trifluoroacetic Acid. Direct and Simple Synthesis of Diaryliodonium Triflates // J. Org. Chem., 2006. Vol. 71. P. 9903–9905.
3. Патент CN 104628561 A, KHP. Resist Composition, Preparation method for 2-ethyl-2-adamantanol methacrylate / Fr Zhiwei; заявитель и патентообладатель — Shanghai Bokang Fine Chemical CO., LTD.; заявл. 11.11.2013; опубл. 20.05.2015.

УДК 615.47

Миниатюризация биомедицинской электроники

Пьянов И. В., к. ф.-м. н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Описана эволюция биомедицинской электроники на примерах систем длительной механической поддержки кровообращения, аппаратов «искусственная почка», кардиостимуляторов, миниатюризация которых способствовала повышению качества жизни пациентов.

Ключевые слова: биомедицинская электроника; искусственные органы; аппарат вспомогательного кровообращения; аппарат «искусственная почка»; электрокардиостимулятор; миниатюризация.

Медицинские устройства значительно различаются как по функционалу, так и по массогабаритным характеристикам: от элементарных диагностических инструментов до мультиспиральных компьютерных томографов и искусственных органов. Несмотря на различное назначение медицинских устройств (профилактика, диагностика, лечение или реабилитация), все они связаны с системой «медицинский работник – пациент». При разработке медицинского устройства, независимо от его сложности, важнейшими факторами являются его функционал, качество, безопасность и удобство использования как врачом, так и пациентом. Актуальной задачей при создании персонализированных, носимых и имплантируемых биомедицинских систем является их миниатюризация.

Долгое время проектирование и производство миниатюрных медицинских устройств сдерживалось ограничениями традиционного микроэлектронного производства. Уже более 50 лет разработчикам известен закон Мура, значение которого для технологического прогресса нельзя недооценить. Его влияние затрагивает вычислительную мощность, скорость и миниатюризацию устройств, включая и биомедицинскую электронику. В прошлом остались громоздкие печатные платы, сильно влиявшие на размеры изделия. Современные биомедицинские электронные устройства проектируются так, чтобы отвечать требованиям безопасности, функциональности, эргономики, в т. ч. исходя из удобства пользования.

Производители медицинских устройств широко применяют методы и процессы миниатюризации как для повышения эффективности существующих продуктов, так и для разработки новых устройств. Если описать концепт разработки и дизайна современной носимой биомедицинской электроники, то можно отметить оптимизацию размера, веса и мощности, а также стоимости конечного продукта.

Современные технологии позволяют создавать миниатюрные имплантируемые устройства. Хорошо зарекомендовал себя самый маленький в мире электрокардиостимулятор Medtronic Micra длиной всего 24 миллиметра [1].

Особенно следует отметить эволюцию биомедицинской электроники на примерах систем длительной механической поддержки кровообращения, которые за последние 40 лет прошли путь от частично имплантируемых насосов весом свыше 1 килограмма и массивным блоком электронного управления, для перемещения которого была необходима посторонняя помощь, до современных аппаратов вспомогательного кровообращения левого желудочка сердца весом менее 100 граммов

с компактным блоком управления, располагающимся на поясе или в наплечной сумке. А разработанная в России уменьшенная модель аппарата вспомогательного кровообращения АВК-Н «Спутник», успешно применяемого в России с 2012 года для взрослых, дает возможность имплантировать его даже самым маленьким пациентам [2]. Миниатюризация системы кровообращения позволяет снизить инвазивность процедуры имплантации и расширяет возможности ее применения для пациентов с меньшими габаритами тела, чем у людей с ростом от 160 сантиметров и массой тела от 50 килограммов.

Разработка носимых аппаратов «искусственная почка» позволяет пациентам с хронической почечной недостаточностью проводить диализ «на ходу», преодолевая проблему долгих часов терапевтической процедуры и необходимости подключения к крупногабаритным стационарным аппаратам гемодиализа [3].

Миниатюризация не только положительно повлияла на имплантируемые устройства, но и повысила качество и эффективность других медицинских устройств, включая портативные и мобильные системы визуализации, хирургическую робототехнику и диагностику in vitro.

Вместе с тем, следует отметить, что миниатюризация биомедицинской электроники имеет и ряд проблем, в частности актуальными становятся вопросы рассеяния тепла и потребления энергии. Учёными и инженерами разрабатываются новые аккумуляторные технологии, ведутся работы по созданию систем беспроводной передачи энергии для питания имплантируемых медицинских устройств.

Таким образом, миниатюризация носимой биомедицинской электроники является актуальной задачей биомедицинской инженерии, от решения которой зависит успешность исхода лечения, а также комфорт врачей и пациентов.

Литература

1. Ritter P., Duray G. Z., Zhang S. et al. The rationale and design of the Micra Transcatheter Pacing Study: safety and efficacy of a novel miniaturized pacemaker / Europace, 2015. May; 17(5): 807-13. DOI: 10.1093/europace/euv026.
2. Гринвальд В. М., Кузьмин Г. С., Маслобоев Ю. П. и др. Первый отечественный аппарат вспомогательного кровообращения АВК-Н «СПУТНИК» на основе имплантируемого насоса крови // Известия вузов. Электроника, 2015. — № 5. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/pervyy-otechestvennyy-apparat-vspomogatelnogo-krovoobrascheniya-avk-n-sputnik-na-osnove-implantiruemogo-nasosa-krovi (дата обращения: 09.09.2024).
3. Базаев Н. А. Особенности построения автономной носимой аппаратуры искусственного очищения крови // Известия вузов. Электроника, 2020. — № 3. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-postroeniya-avtonomnoy-nosimoy-apparatury-iskusstvennogo-ochischeniya-krovi (дата обращения: 09.09.2024).