



НЕВСКАЯ ФОТОНИКА-2025

Всероссийская научная конференция
с международным участием
Сборник научных трудов

13-18 октября 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НЕВСКАЯ ФОТОНИКА-2025
ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

13-18 октября 2025 г.

ИТМО



**НЕВСКАЯ
ФОТОНИКА**

Санкт-Петербург
2025

УДК 004.8, 004.93, 53.04, 53.08, 53.09, 57.08, 61, 530.145, 535, 537.87, 538.95, 620.22, 620.3, 681.7

ББК 22.34, 28.70, 32.813, 32.86, 53.4

Невская фотоника-2025. Всероссийская научная конференция с международным участием. Сборник научных трудов (13-18 октября 2025 г.) / под ред. д.ф.-м.н. Цыпкина А.Н. – СПб.: Университет ИТМО, 2025. – 382 с.

Издание содержит материалы лекций заслуженных ученых и результаты научных работ молодых ученых, доложенные на Всероссийской научной конференции с международным участием "Невская фотоника-2025", проходившей с 13 по 18 октября 2025 года, по тематикам: артфотоника, биофотоника, ИИ в фотонике, промышленная фотоника, квантовая оптика и квантовые технологии, лазерная и силовая оптика, нанофотоника, оптические материалы фотоники, сверхбыстрая фотоника и когерентная оптика, управление параметрами лазерного излучения.

ISBN 978-5-7577-0737-2

ИТМО

Университет ИТМО (Санкт-Петербург) – национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: IT и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication. Лидер федеральной программы «**Приоритет-2030**», в рамках которой реализуется программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития — научно-образовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента.

ИТМО пять лет подряд – в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере IT. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

© Университет ИТМО, 2025

© Авторы, 2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

по направлениям артфотоника, биофотоника, ИИ в фотонике, индустриальная фотоника, квантовая оптика и квантовые технологии, лазерная и силовая оптика, нанофотоника, оптические материалы фотоники, сверхбыстрая фотоника и когерентная оптика, управление параметрами лазерного излучения.

Председатель редколлегии:

доцент, д.ф.-м.н. Цыпкин Антон Николаевич

Члены редколлегии:

доцент, к.ф.-м.н. Жукова Мария Олеговна

доцент, д.ф.-м.н. Киселев Алексей Дониславович

профессор, д.ф.-м.н. Козлов Сергей Аркадьевич

доцент, к.ф.-м.н. Козубов Антон Владимирович

доцент, к.ф.-м.н. Мельник Максим Владимирович

профессор, д.т.н. Никифоров Владимир Олегович

профессор, д.ф.-м.н. Никоноров Николай Валентинович

доцент, к.ф.-м.н. Смолянская Ольга Алексеевна

доцент, д.ф.-м.н. Цыпкин Антон Николаевич

с.н.с., к.ф.-м.н. Черных Алексей Викторович

ВВЕДЕНИЕ

Издание содержит материалы лекций заслуженных ученых и результаты научных работ молодых ученых, доложенные на Всероссийской научной конференции с международным участием "Невская фотоника- 2025", проходившей с 13 по 18 октября 2025 года, по тематикам: артфотоника, биофотоника, ИИ в фотонике, промышленная фотоника, квантовая оптика и квантовые технологии, лазерная и силовая оптика, нанофотоника, оптические материалы фотоники, сверхбыстрая фотоника и когерентная оптика, управление параметрами лазерного излучения.

Конференция проводится в целях представления последних результатов исследования, обмена опытом и взаимодействия заслуженных, молодых ученых и обучающихся в области фотоники, а именно лазерных систем, квантовой информатики, нелинейной оптики, оптического материаловедения, биофотоники, агробιοфотоники, телекоммуникаций, системах экологического мониторинга, безопасности, аэрокосмической промышленности и сфере искусства.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
АРТФОТОНИКА.....	33
НАУЧНАЯ РЕСТАВРАЦИЯ ПРЕДМЕТОВ ИЗ МЕТАЛЛА С РЕЛЬЕФНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЕМ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВОСПОЛНЕНИЯ УТРАТ Котельников П.Н., Кураков С.В., Богданов А.В.	34
АНАЛИЗ ПРОИСХОЖДЕНИЯ УЛЬТРАМАРИНОВЫХ ПИГМЕНТОВ МЕТОДОМ БИК-СПЕКТРОСКОПИИ И ХЕМОМЕТРИКИ Бойченко Е.С., Андреев И.И., Хайдукова М.М., Сирро С.В., Кирсанов Д.О.....	35
АЭРОЗОЛЬНАЯ ПЕЧАТЬ НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА ДЛЯ ПОСЛОЙНОГО АНАЛИЗА КРАСОЧНЫХ СЛОЕВ МЕТОДОМ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ Лизунова А.А., Корнюшин Д.В., Федоткина А.П., Надточенко В.А.....	36
ИДЕНТИФИКАЦИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПИГМЕНТОВ ВО ФРАГМЕНТАХ ДРЕВНЕРУССКОЙ ФРЕСКОВОЙ ЖИВОПИСИ ХРАМОВ ВЕЛИКОГО НОВГОРОДА МЕТОДОМ МИКРОСПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ Кочетков М.И., Кононова Е.М., Анисимова Т.И., Брандт Н.Н., Балахнина И.А., Чикишев А.Ю.	37
БИОФОТОНИКА.....	38
ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КРОВИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОНКОЛОГИИ Черкасова О.П.....	39
МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЕ НОСИМЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО-ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА: МЕДИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ В ДИАГНОСТИКЕ Дунаев А.В., Жарких Е.В., Локтионова Ю.И., Янушин В.С., Сидоров В.В.	40
КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОЛНОЙ СВЕТОКУЛЬТУРЫ РАСТЕНИЙ Тихомиров А.А.	41
ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛИТОТРИПСИИ Корнева Н.В.	42
ОПТИЧЕСКОЕ ПРОСВЕТЛЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ В ЦЕЛЯХ ДИАГНОСТИКИ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ Тимошина П.А., Лазарева Е.Н., Сурков Ю.И., Тучин В.В.....	43
СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛЕТОК КРОВИ И ЭНДОТЕЛИЯ СОСУДОВ: ИЗМЕРЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ПИНЦЕТА Приезжев А.В., Максимов М.К., Ермолинский П.Б., Луговцов А.Е.	44

ДВУХВОЛНОВОЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ ИМИДЖИНГ В ЗАДАЧАХ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ Кириллин М.Ю., Шахова М.А., Фокеев В.А., Куракина Д.А., Пшеницына Д.С., Савельев А.С., Миронычева А.М., Гамаюнов С.В., Турчин И.В., Сергеева Е.А.	45
МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО-ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА КОСМОНАВТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ МОДЕЛИРУЕМЫХ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА Локтионова Ю.И., Жарких Е.В., Янушин В.С., Сидоров В.В., Луцевич Д.Н., Киреев К.С., Дунаев А.В.	46
ОСОБЕННОСТИ МИКРОГЕМОДИНАМИКИ КОЖИ У ПАЦИЕНТОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ НАРУШЕНИЙ УГЛЕВОДНОГО ОБМЕНА И ХРОНИЧЕСКОЙ ИШЕМИЕЙ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ Красулина К.А., Глазков А.А., Глазкова П.А., Селиванова Д.С., Загаров С.С., Рогаткин Д.А., Ларьков Р.Н.	47
СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЦЕРЕБРАЛЬНОГО И КОЖНОГО КРОВОТОКА У ЛАБОРАТОРНЫХ КРЫС Голубова Н.В., Рыжков И.А., Лапин К.Н., Калабушев С.Н., Приземин В.Н., Дрёмин В.В., Потапова Е.В.	48
ПРОЦЕССЫ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА НА ОСНОВЕ TAGETES RATULA L. ПРИ ПОВЫШЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА Землякова Е.С., Цибульников А.В., Слежкин В.А., Кострина А.А., Артамонов Д.А., Самусев И.Г., Брюханов В.В.	49
ВЛИЯНИЕ БЕЛКОВОГО ОКРУЖЕНИЯ ЛЮМИНОФОРА НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ С АНОМАЛЬНО БОЛЬШИМ СТОКСОВЫМ СДВИГОМ Слюсарева Е.А., Парфёнова Е.В., Слюсаренко Н.В., Мочалов М.О.	50
ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ФОТОХИМИЯ БИОАКТИВНЫХ ХРОМОФОРОВ МОДЕЛИРОВАННАЯ НЕАДИАБАТИЧЕСКОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКОЙ Помогаев В.А., Чайковская О.Н.	51
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОНФОРМАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕМОГЛОБИНА В ЦИТОПЛАЗМЕ ЭРИТРОЦИТА Слатинская О.В., Максимов Г.В.	52
СВЕТОДИОДНЫЙ МОДУЛЬ ФИТОСВЕТИЛЬНИКА ПОЛНОГО СПЕКТРА Андреева М.В., Афонин К.Н., Ермолаев А.В., Кремзуков Ю.А., Солдаткин В.С., Туев В.И.	53
АНАЛИЗ ДАННЫХ ОБЪЕМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ МЕТОДАМИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИММУННО-ОПОСРЕДОВАННЫХ КОЖНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ Павлов О.О., Потапов А.Л., Якимов Б.П., Сироткина М.А., Кузнецова И.А., Ширшин Е.А., Гладкова Н.Д.	54
ПЕРСПЕКТИВЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В СВЕТОКУЛЬТУРЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКИМИ СВЕТОВЫМИ ПОЛЯМИ Корепанов В.И., Терещенко Н.Н., Туев В.И., Петикарь П.В., Былков Д.В.	55

НОВЫЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ МЕТКИ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОЙ ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ТРОМБОЦИТОВ Науменко М.Б., Панфилов М.А., Воробьев А.Ю., Москаленский А.Е.	56
ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЛЕКУЛЫ БАКТЕРИОХЛОРОФИЛЛА НА ПОЛОЖЕНИЕ МАКСИМУМОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В Q-ОБЛАСТИ СПЕКТРА Ковалева Е.А., Ларионов Е.А., Коршунов М.М.	57
УПРАВЛЕНИЕ КОГНИТИВНОЙ АКТИВНОСТЬЮ С ПОМОЩЬЮ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ Туранов С.Б., Коржнева Т.Г., Толкачева К.П., Шачнева П.В.	58
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПОРИСТЫХ МИШЕНЕЙ, ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ БИОФОТОНИКИ Заботнов С.В., Нестеров В.Ю., Шулейко Д.В., Соколовская О.И., Гурбатов С.О., Кучмижак А.А., Турчин И.В., Сергеева Е.А., Кириллин М.Ю.	59
ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕРАГЕРЦОВОЙ БИОФОТОНИКИ Гавдуш А.А., Черномырдин Н.В., Катыба Г.М., Зайцев К.И.	60
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА АКТИВАЦИИ ФОТОПРОТЕИНОВ ОБЕЛИНА И АКВОРИНА Рогова А.В., Щугорева И.А., Томилин Ф.Н., Маликова Н.П., Еремеева Е.В., Высоцкий Е.С.	61
ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ЛЕЧЕНИЮ ГНОЙНЫХ АБСЦЕССОВ: АНТИМИКРОБНАЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕРАПИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРАСНОГО И ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ОПТИЧЕСКОГО ПРОСВЕТЛЕНИЯ БИОТКАНЕЙ Мусаелян А.Г., Грицай У.О., Напшева А.М., Тучина Е.С., Тучин В.В., Алипов В.В.	62
КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СУСПЕНЗИИ ВНЕКЛЕТОЧНЫХ ВЕЗИКУЛ Окотруб К.А., Омельченко А.Н., Суровцева М.А., Суровцев Н.В.	63
ЛАЗЕРНОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ДЛЯ МАГНИТНОЙ БИОСЕНСОРИКИ Джунь И.О., Шулейко Д.В., Назаров А.В., Преснов Д.Е., Перова Н.Н., Нестеров В.Ю., Ромашкина И.Л., Козин М.Г., Чеченин Н.Г., Заботнов С.В.	64
ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРОСВЕТЛЕНИЯ НА ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ КАПИЛЛЯРОСКОПИИ Луговцов А.Е., Мольдон П.А., Максимов М.К., Гурфинкель Ю.И., Тимошина П.А., Тучин В.В., Приезжев А.В.	65
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОТКАНЕЙ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ САХАРНОГО ДИАБЕТА Лазарева Е.Н., Бучарская А.Б., Тучин В.В.	66
ЛИНЗОВАННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА ДЛЯ ЗАДАЧ БИОФОТОНИКИ Пономарев Р.С., Жуков Л.О., Паньков А.С.	67

СВЕТ ДЛЯ ЦВЕТА: ОБЛУЧЕНИЕ UV-B ПЕРЕД УБОРКОЙ УСИЛИВАЕТ КРАСНЫЙ ОТТЕНОК САЛАТА НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФЕРМЕ Тимофеев И.А., Пашковский П.П., Верещагин М.В., Слепцов Н.Н., Малышева В.В., Драничникова Е.А.	68
ИИ В ФОТЕНИКЕ	69
БИНАРНЫЕ НЕЙРОМОРФНЫЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИТОННЫХ РЕШЁТОК Седов Е.С., Кавокин А.В.	70
АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ Соколов М.С., Краснов Д.И., Хуссейн А.	71
ОСОБЕННОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ШАХТАХ, ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ВИДЕОАНАЛИТИКИ Зайцева Е.В.	72
ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФАЗ МИНЕРАЛОВ ВО ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ ПО СПЕКТРАМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ Мясникова А.С., Шендрик Р.Ю.	73
РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ С ГОЛОГРАММ 3D-СЦЕН С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНОЙ НЕЙРОСЕТИ Кирий С.А., Свистунов А.С., Рымов Д.А., Черёмхин П.А.	74
РАСПОЗНАВАНИЕ ФАЗОВЫХ РАЗЛИЧИЙ КОЛЬЦЕВЫХ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПУЧКОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ИНТЕНСИВНОСТИ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ Богач Е.А., Адамов Е.В., Дудоров В.В., Колосов В.В.	75
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ И КВАНТОВОГО ВЫХОДА ГЕНЕРАЦИИ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА ДЛЯ WODIRY С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ Чеботаев П.П., Буглак А.А., Шихан Э., Филатов М.А.	76
СКРИННИНГ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ Молокеев М.С.	77
ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АУГМЕНТАЦИИ ДЕРМАТОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЛОКАЧЕСТВЕННОЙ МЕЛАНОМЫ Захаров Н.К., Матвеева И.А.	78
ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ БИОХИМИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ: ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА НА МИКРОРЕЗОНАТОРНЫХ СЕНСОРАХ Саечников И.В., Чернявская Э.А., Саечников А.В.	79
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПО ТУРБУЛЕНТНОМУ УШИРЕНИЮ ГАУССОВОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ Филимонов Г.А., Куликов В.А.	80

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ В БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССАХ Кузьмин Н.А.	81
ИНДУСТРИАЛЬНАЯ ФОТОНИКА	82
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ВЕЛИЧИН В ЭНЕРГЕТИКЕ Коротаев В.В., Тимофеев А.Н., Васильев А.С., Рыжова В.А., Родикова Л.С.....	83
МАШИННОЕ ЗРЕНИЕ В ЗАДАЧАХ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ Афонюшкин А.А.	84
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ ЗАПОМИНАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО С ОПТИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ И СПЕКТРАЛЬНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ Янукович Т.П., Юдыцкая К.С., Поляков А.В.	85
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАЗЕМНОГО ТЕРМИНАЛА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВЯЗИ Лозов Р.К., Мурашкин В.В., Петушков С.В., Лексина Р.А., Кузьмин И.В., Григорьев В.Н., Третьякова Л.В., Неткачев В.В.....	86
ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ МЕТОДОМ ПРОТОННОГО ОБМЕНА Гордеева А.И., Петухов И.В., Корнилицын А.Р., Мясникова Е.В., Масалкин Д.Н.	87
ВЛИЯНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ НА ПОГРЕШНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НА ОБОЛОЧЕЧНЫХ МОДАХ Полтарак М.Б., Башкова В.С., Шевцов Д.И.	88
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ Четвериков А.С., Шишкин С.А.	89
КВАНТОВАЯ ОПТИКА И КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	90
МЕТОД НЕЛИНЕЙНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОЙ МЕТРОЛОГИИ Сабанин А.С., Кривицкий Л.А, Кулик С.П., Патерова А.В.....	91
РЕЗОНАНСНАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ АТОМОВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ КВАНТОВЫМ СВЕТОМ Захаров Р.В., Васильев А.Н., Тихонова О.В.	92
УПРАВЛЕНИЕ КВАНТОВЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ В АДИАБАТИЧЕСКОМ КВАНТОВОМ ПАРАМЕТРОНЕ Бастракова М.В., Пашин Д.С., Пикунов П.В., Щеголев А.Е.	93
ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ МУЛЬТИМОДОВОГО СЖАТОГО СВЕТА В ПРОЦЕССАХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ Кузнецов К.А., Калашников Д.А., Чудаков А.С., Северин В.В., Пошевкина А.А., Шарапова П.Р.....	94

АНАЛИЗ ПЕРЕПУТАННОСТИ В РАМКАХ МНОГОФОТОННОЙ ТРЕХКУБИТНОЙ МОДЕЛИ ТАВИСА-КАММИНГСА Багров А.Р., Башкиров Е.К.	95
ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ Наседкин Б.А., Исмагилов А.О., Опарин Е.Н., Соломатин О.Е., Чистяков В.В., Гайдаш А.А., Цыпкин А.Н., Егоров В.И., Козубов А.Н.	96
ЭФФЕКТ ХАНЛЕ В ОСНОВНОМ СОСТОЯНИИ АТОМОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ В ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННОЙ СВЕТОВОЙ ВОЛНЕ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ К КВАНТОВОЙ МАГНИТОМЕТРИИ Козлова К.С., Макаров А.О., Бражников Д.В., Гончаров А.Н.	97
ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ АТОМА НА ФОРМИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ ВИХРЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИОНИЗАЦИИ ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ Ларионов Н.В., Молчановский В.М.	98
ПРОГРАММИРОВАНИЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНО ЗАПУТАННОГО ТРЕХФОТОННОГО КВАНТОВОГО СОСТОЯНИЯ Кондратьев И.В., Урсова К.Н., Аргенчиев А.С., Бирюков Ю.А., Скрябин Н.Н., Дьяконов И.В., Страупе С.С., Кулик С.П.	99
УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЗОНАНСОВ ФАНО К ДЕКОГЕРЕНЦИИ ПРИ КВАНТОВОМ ТРАНСПОРТЕ В ЛЕСТНИЧНОЙ СТРУКТУРЕ Мураев П.С., Максимов Д.Н., Коловский А.Р.	100
ЭФФЕКТИВНАЯ УСТОЙЧИВАЯ К ШУМАМ ТОМОГРАФИЯ МНОГОМОДОВЫХ ЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ОДИНОЧНЫМИ ФОТОНАМИ Бирюков Ю.А., Морозов Р.Д., Дьяконов И.В., Страупе С.С., Кулик С.П.	101
ЛАЗЕРНАЯ И СИЛОВАЯ ОПТИКА	102
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ И КОНТРОЛЯ ОБЪЕМНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СУБВОЛНОВЫХ СТРУКТУР В ПРОЦЕССЕ ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ В ОБЪЕМЕ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ Богацкая А.В., Волкова Е.А., Гулина Ю.С., Рупасов А.Е., Попов А.М.	103
ВЫСОКОМОЩНАЯ ВОЛОКОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА МОЩНОСТЬЮ 30 кВт Летов Д.А., Колегов А.А., Круликовский Д.А., Дорох А.В., Казимов Т.Р., Немочкин А.С., Иванов В.А.	104
ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ОКИСДА ЦИНКА С СЕРЕБРЯНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ, ИНИЦИИРОВАННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЕРИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ Поляков Д.С., Гресько В.Р., Сергеев М.М.	105
ГЕНЕРАЦИЯ ПЕРЕХОДНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНО УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ НА ГРАНИЦЕ ВАКУУМ-ГАЗОКЛАСТЕРНАЯ СРЕДА Щеглов П.А., Чашин М.В., Таусенев А.А., Семенов Т.А., Назаров М.М.	106

НАНОФОТОНИКА	107
ЭКСИТОННЫЙ ЛАНДШАФТ В ДВУМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ Баймуратов А.С.	108
DNA ORIGAMI: THE NANOFABRICATION TOOLBOX WITH MOLECULAR PRECISION Martynenko I.M.	109
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА С НАНОКРИСТАЛЛАМИ CuCl Родина А.В.	110
ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИЕ КВАНТОВЫЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ В СЕНСОРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ Орлова А.О.	111
ВТОРОЙ ПОРОГ ГЕНЕРАЦИИ СВЕРХИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ Кочаровская Е.Р., Кочаровский В.В.	112
ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ХРОМОФОРОВ TAGETES RATULA L. ПРИ КИСЛОРОДОНАСЫЩЕНИИ В ПРИСУТСТВИИ Yb ³⁺ Артамонов Д.А., Цибульникова А.В., Землякова Е.С., Кострина А.А., Брюханов В.В., Самусев И.Г.	113
НАНОЧАСТИЦЫ YF ₃ -CeF ₃ :Tb ³⁺ И ИХ КОНЪЮГАТЫ С НАНОЧАСТИЦАМИ Au И ХЛОРИНОМ e-6 В КАЧЕСТВЕ ПЛАТФОРМ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СЕНСОРОВ И ФДТ Низамутдинов А.С., Миннебаев Т.М., Астраханцева А.В., Ахметзянова К.Э., Шамсутдинов Н.И., Зеленихин П.В., Лукинова Е.В., Избасарова Э.А., Газизов А.И., Буров А.М., Хлебцов Н.Г., Пудовкин М.С.	114
РЕЗОНАНСНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ЭКСИТОННОГО РЕЗОНАНСА Капитонов Ю.В.	115
ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ МАГНИТОПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ Лактионов А.А., Попов А.А., Климентов С.М.	116
СПЕКТРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ НЕНАПРЯЖЕННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК GaAs/AlGaAs Башегурова Е.А.	117
ВЛИЯНИЕ ИОНОВ НИКЕЛЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag ₂ S, ПАССИВИРОВАННЫХ МОЛЕКУЛАМИ ТИОГЛИКОЛЕВОЙ КИСЛОТЫ Кондратенко Т.С., Чевычелова Т.А., Гревцева И.Г., Овчинников О.В., Зябкина М.М., Смольянов Г.А.	118
ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА С ЛАЗЕРНЫМ НАПЛАВЛЕНИЕМ ОСТРОВКОВОЙ ПЛЕНКИ ЗОЛОТА Кострина А.А., Цибульникова А.В., Лятун И.И., Артамонов Д.А., Самусев И.Г.	119
ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС В ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА Рубаник Д.С., Срабионян В.В., Дурыманов В.А., Викленко И.А., Авакян Л.А., Бугаев Л.А.	120

ОПТОМЕХАНИЧЕСКАЯ СОРТИРОВКА МИ-РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТИЦ ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СРЕД	
Бородулин С.С., Петров М.П., Костина Н.А.	121
ЛИТОГРАФИЧЕСКИ-КОНТРОЛИРУЕМОЕ ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАССИВОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОКОЛОНН С ВЫСОКИМ АСПЕКТНЫМ ОТНОШЕНИЕМ НА КРЕМНИИ	
Марков Д.П., Павлов С.И., Ермина А.А., Большаков В.О., Пригода К.В., Жарова Ю.А.	122
ЛОКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ИОНОВ Na^{3+} И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦИНК-ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИЙ ИОНОВ В СОСТАВЕ МАТЕРИАЛА	
Срабионян В.В., Дурыманов В.А., Ветчинников М.П., Викленко И.А., Зинина Е.М., Игнатьева Е.С., Рунина К.И., Панкин И.А., Рубаник Д.С., Авакян Л.А., Шахгильдян Г.Ю., Сигаев В.Н., Бугаев Л.А.	123
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ	
Керечанина М.Ф., Лизунова А.А., Вершинина О.В., Иванов В.В.	124
ВЫСОКОДИСПЕРСИОННАЯ ЛИНИЯ ЗАДЕРЖКИ НА ОСНОВЕ МИКРОЦИЛИНДРА ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ ДИСПЕРСИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ	
Апрелов Н.А., Колесникова А.Ю., Макарова Н.А., Редюк А.А., Ватник И.Д.	125
ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ПОСТРОЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНО ЗАДАННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ОТКЛИКА ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА	
Свяховский С.Е., Емельянец П.С., Пышков Н.И.	126
ВЛИЯНИЕ ИНДУЦИРОВАННОЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ИЗОТРОПИЗАЦИИ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В НЕМ	
Дериков Я.И., Шандрюк Г.А., Карпов О.Н., Мерекалов А.С., Ежов А.А., Нестеров В.Ю., Преснов Н.Д., Соколовская О.И., Головань Л.А.	127
РЕШЁТКА ИНВЕРСИИ НАСЕЛЁННОСТЕЙ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ В ЛАЗЕРАХ С НИЗКО- И ВЫСОКОДОБРОТНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ	
Кочаровский Вл.В., Кочаровская Е.Р.	128
МУЛЬТИФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАНОАЛМАЗНЫЕ АГЕНТЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ФОТОТЕРМАЛЬНОЙ ТЕРАПИИ	
Богданов К.В., Грудинкин С.А., Калия И.Е., Баранов А.В.	129
СПИН—ЗАВИСИМАЯ ДИНАМИКА ЭКСИТОНОВ В ДУГООБРАЗНО РАСТЯНУТЫХ МОНОСЛОЯХ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ	
Шубник А.А., Шахназарян В.А., Шелых И.А., Ростами Х.	130
ИНТЕГРАЦИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ МИКРОЧАСТИЦ В ПЛАНАРНЫЕ КРЕМНИЙ-НИТРИДНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОМ ДИАПАЗОНЕ	
Обыденнов Д.В., Ашарчук И.М., Мумляков А.М., Шибалов М.В., Вовк Н.А., Филиппов И.А., Волкова Л.С., Тархов М.А.	131

ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ФОТОНИКИ	132
ЕДИНИЧНЫЕ КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ АНСАМБЛИ, ОБРАЗУЕМЫЕ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕДАХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ И ЖЁСТКОЙ РАДИАЦИЕЙ Мартынович Е.Ф., Дресвянский В.П.	133
ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА МЕТОДОМ Na-Ag ИОННОГО ОБМЕНА ДЛЯ ХЕМО- И БИОСЕНСОРОВ Сгибнев Е.М., Докукин М.Е., Шелаев А.В., Иноземцев В.А., Шведов М.А., Кандрашина С.С., Шерстюкова Е.А., Никоноров Н.В., Сергунова В.А., Барышев А.В.	134
ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА (g -C ₃ N ₄) РАЗНОЙ РАЗМЕРНОСТИ (1D, 2D, 3D) И МОДИФИЦИРОВАННОГО ИОНАМИ МЕТАЛЛОВ Cu ²⁺ , Co ²⁺ , Ni ²⁺ , Pt ⁴⁺ , Au ⁺ , НАХОДЯЩИХСЯ В СОСТОЯНИИ «SINGLE АТОМ» Шурухина А.В., Рудакова А.В., Жаровов Д.А., Емелин А.В., Орешонков А.С., Немцев И.В.	135
КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ПЕРОВСКИТОВ CsPbBr ₃ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ Миронов Л.Ю., Харисова Р.Д., Лютикова О.А., Сгибнев Е.М., Ратова А.Д., Шеремет В.Г., Зырянова К.С., Барышев А.В.	136
ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЁВ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА ИЗ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ Пятнов М.В., Соколов М.М., Волкова И.Р., Бузин Д.С., Рыжков И.И., Ветров С.Я., Тимофеев И.В.	137
СТРУКТУРНЫЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ MgAl ₂ O ₄ :Mn Валиев Д.Т., Шарафеев Ш.М., Степанов С.А., Шеховцов В.В.	138
ОСОБЕННОСТИ ДИФфуЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ МЕДЬЮ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ Анисимов Р.И., Колмаков А.А., Комов Э., Кистенёва М.Г., Акрестина А.С., Шандаров С.М.	139
СВОЙСТВА ПЛАЗМОНОВ С ПЕРЕНОСОМ ЗАРЯДА НА ГРАФЕНЕ Еремкин Е.В., Фёдоров А.С.	140
СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ ПЕРОВСКИТА CsPbX ₃ (X=Cl, Br, I) Колобкова Е.В.	141
СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМОН-ЭКСИТОННЫХ СТРУКТУР СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ХАЛЬКОГЕНИДОВ МЕТАЛЛОВ Гревцева И.Г., Овчинников О.В., Смирнов М.С., Кондратенко Т.С., Дерепко В.Н.	142
ФОТОУПРАВЛЯЕМАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРЫ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ Долганов П.В., Максимов Е.А., Долганов В.К., Баленко Н.В.	143

ДНК-ОРИГАМИ ДЛЯ НАНОФОТОНИКИ: МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОМ АСМ Аржанов А.И., Степанов М.Е., Егорова Т.В., Магарян К.А., Акасов Р.А., Хайдуков Е.В., Наумов А.В.	144
БРЭГГОВСКАЯ ДИФРАКЦИЯ ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ НА РЕГУЛЯРНЫХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУРАХ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ Шандаров С.М., Савченков Е.Н., Бельская Д.Е., Дубиков А.В., Буримов Н.И., Ахматханов А.Р., Чувакова М.А., Шур В.Я.	145
МЕХАНИЗМ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ БИНАРНЫХ АССОЦИАТОВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag ₂ S И PbS Возгорькова Е.А., Овчинников О.В., Смирнов М.С.	146
СИНТЕЗ И ПРИМЕНЕНИЕ СОПОЛИФЛУОРЕНОВ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ И ХЕМОСЕНСОРИКЕ Чулкова Т.Г., Якиманский А.А., Ильина К.И., Митрошин А.М., Жукова Е.В., Мильцов С.А., Жданов А.П., Лыпенко Д.А., Тамеев А.Р., Якиманский А.В.	147
ОПТИЧЕСКИЙ СЕНСОР МЕТАНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ Салихов Х.М., Малинин Ю.Г., Буляков Б.Р., Ахметова Э.М., Шарафетдинов Д.И., Тагиров Л.Р., Салахов М.Х., Стоянов Н.Д., Молчанов С.С.	148
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА БОРА НА ВОЗДУХЕ Акашев Л.А., Попов Н.А., Шевченко В.Г., Конюкова А.В.	149
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ И СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ, ИНДУЦИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ МИКРОКРИСТАЛЛОВ И РАДИАЦИОННОЙ НАНОКЕРАМИКИ Ga ₂ O ₃ Полисадова Е.Ф., Карнаухова А.А., Лисицын В.М.	150
ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОДНЫХ РОДАМИНА 6Ж ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИОНОВ Ni И Pd В ВОДНЫХ СРЕДАХ Леонов А.А., Сергеев А.А., Мироненко А.Ю.	151
ОПТИЧЕСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК Cd _x Hg _{1-x} Te Мынбаев К.Д., Дорогов М.В., Коротаев А.Г., Войцеховский А.В., Варавин В.С., Ремесник В.Г., Якушев М.В.	152
УЗКОПОЛОСНЫЕ ИНФРАКРАСНЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ NDIR-СЕНСОРОВ Тропин А.Н.	153
ДИНАМИЧЕСКИЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПИНЦЕТ БИК-ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН Севостьянов О.Г., Чиркова И.М., Баснин П.П., Вершинина А.И.	154
ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СПЕКЛ-ЭКРАНОВ В ФТР-СТЕКЛЕ: АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ Гавриш М.В., Прохорова У.В., Сердобинцев П.Ю., Розанов П.К., Сементин В.В., Погода А.П., Никоноров Н.В.	155

ФАЗООБРАЗОВАНИЕ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНОКРИСТАЛЛОВ И НАНОЧАСТИЦ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $ZrO_2-Eu_2O_3$ Рябочкина П.А., Алексеева А.С., Букарев С.А., Волкова Т.В., Ломонова Е.Е., Мызина В.А., Табачкова Н.Ю.	156
ПОЛЯРИТОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ДВУМЕРНЫХ ГАЛОГЕНИДНЫХ ПЕРОВСКИТАХ $BA_2MA_2Pb_3I_{10}$ Мурзин А.О., Пасхос И., Капитонов Ю.В., Саввидис П.	157
ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПРОТОНООБМЕННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СЛОЕВ ПОСЛЕ МОДИФИКАЦИИ КИЛОРОДНОЙ ПЛАЗМОЙ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ Сосунов А.В., Петухов И.В., Козлов А.А., Масалкин Д.Н., Корнилицын А.Р., Шеремет А.Г., Кунева М.	158
ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА ПОВОРОТА ПО МНОГОКАНАЛЬНОМУ ОПТИЧЕСКОМУ ОТКЛИКУ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ Венедиктов В.Ю., Ефремова Е.А., Зинчик А.А., Крылов И.Р., Прохорова У.В., Шалымов Е.В., Шоев В.И.	159
ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР С ОПТИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК АМОРФНОГО КРЕМНИЯ Шулейко Д.В., Соколовская О.И., Мартышов М.Н., Сердобинцев А.А., Волковойнова Л.Д., Вениг С.Б., Пахольчук П.П., Кузьмин Е.В., Заботнов С.В., Кашкаров П.К.	160
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТОЧКИ КОЛЛАПСА РЕЗОНАНСОВ ФАНО В СПЕКТРЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЯРИТОНОВ МАГНЕТИКОВ С ЦЕНТРОМ АНТИИНВЕРСИИ Сухорукова О.С., Тарасенко А.С., Тарасенко С.В., Шавров В.Г.	161
РАЗРАБОТКА НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ДОЗИМЕТРИИ, ДВА МЕХАНИЗМА УСИЛЕНИЯ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ Калинкин М.О., Акулов Д.А., Келлерман Д.Г., Зубков В.Г., Абашев Р.М., Медведева Н.И., Сюрдо А.И.	162
ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРЕКУРСОРОВ НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ $CsPbBr_3$ В СТЕКЛЕ Харисова Р.Д., Кузьменко Н.К., Зырянова К.С., Шеремет В.Г., Ратова А.Д., Миронов Л.Ю.	163
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ХИРАЛЬНЫХ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖК С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ Резцов Т.В., Черных А.В., Орлова Т., Петров Н.В., Езерский А.С.	164
СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА СВИНЦОВО- ГЕРМАНО-ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ МАРГАНЦА Асеев В.А., Федоров Ю.К., Севастьянова И.М., Леонидова А.А., Гаврилова К.А., Готби М.	165

РАДИАЦИОННОЕ НАКОПЛЕНИЕ, ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ, ОПТИЧЕСКОЕ И ТЕРМИЧЕСКОЕ ВЫСВЕЧИВАНИЕ И СВОЙСТВА ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ В KCl-Tl ₂ SO ₄ Фролова А.С., Мартынович Е.Ф.	166
СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПРОЗРАЧНЫХ ЛИТИЕВОАЛЮМОСИЛИКАТНЫХ СТЕКЛОКЕРАМИК, СОДЕРЖАЩИХ НАНОКРИСТАЛЛЫ (Y,Yb)NbO ₄ Дымшиц О.С., Алексеева И.П., Волокитина А.А., Богданов К.В., Скопцов Н.А., Юмашев К.В., Жилин А.А.	167
ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ ИТО ДЛЯ УСТРОЙСТВ ФОТОНИКИ Жидик Ю.С.	168
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОНИЖЕНИЯ СИММЕТРИИ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОЛОТЫХ НАНОПОЛУМЕСЯЦЕВ Лобанова Е.М., Боченков В.Е., Бахратов И.А.	169
ФОСФОРЕСЦЕНТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ МЕДИ(І) ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СЕНСОРОВ Критченков И.С., Критченкова А.Х.	170
СВЕРХБЫСТРАЯ ФОТОНИКА И КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИКА	171
ФОТОНИКА НАНОСТРУКТУР ПРИ СВЕРХБЫСТРОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ: ОСНОВЫ ПЕТАГЕРЦОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ Груздев В.Е.	172
ЛИНЕЙНЫЙ ЭФФЕКТ ШТАРКА КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР ГЕНЕРАЦИИ ГАРМОНИК ПРИ МНОГОФОТОННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ АТОМОВ СИЛЬНЫМ КОРОТКОВОЛНОВЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПОЛЕМ Антонов В.А., Хайрулин И.Р., Емелин М.Ю., Рябикин М.Ю.	173
ОПТИЧЕСКИЕ СОЛИТОНЫ: ОТ НАНО- ДО ФЕМТОСЕКУНД Сазонов С.В.	174
ЭФФЕКТЫ КВАЗИФАЗОВОГО СОГЛАСОВАНИЯ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Стремоухов С.Ю.	175
КВАДРАТИЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ФИЛАМЕНТАЦИИ Шипило Д.Е., Николаева И.А., Панов Н.А., Косарева О.Г.	176
ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФАЗОВО-ИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МОЛЕКУЛЯРНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕД Шкуринов А.П.	177
ГЕНЕРАЦИЯ ТГЦ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ГАЗОВО-КЛАСТЕРНОЙ СТРУИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ СУБРЕЛЯТИВИСТСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ Балакин А.В., Кузечкин Н.А., Солянкин П.М., Шкуринов А.П.	178
ТРАНСПОРТ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ СВЕТА В ФОТОННОЙ РЕШЕТКЕ ДЕНДРИТНОГО ТИПА Коровай О.В.	179

УНИПОЛЯРНЫЕ СУБЦИКЛОВЫЕ ИМПУЛЬСЫ СВЕТА: СПОСОБЫ ГЕНЕРАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ В СВЕРХБЫСТРОЙ ОПТИКЕ Архипов Р.М., Дьячкова О.О., Архипов М.В., Пахомов А.В., Розанов Н.Н.	180
СИЛЬНО ОДНОНАПРАВЛЕННЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПУЧКИ И ПАКЕТЫ Киселев А.П., Плаченков А.Б., Со И.А.	181
PLASMA FORMATION UNDER INTENSE CHIRPED PULSES Hilal S., Shtumpf S.A., Ismagilov A.O., Tsyarkin A.N., Melnik M.V.	182
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ОБЪЕМЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СРЕДЫ Дресвянский В.П., Мартынович Е.Ф.	183
СТАБИЛИЗАЦИЯ АТОМОВ В СИЛЬНОМ ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЛАЗЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В СРЕДНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ Богацкая А.В., Попов А.М.	184
ТРЁХЦВЕТНЫЕ СОЛИТОНЫ С КРАТНЫМИ ЧАСТОТАМИ Харитонов Д.М., Трофимов В.А.	185
ВОЗБУЖДЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ И КОНВЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ Оладышкин И.В., Фадеев Д.А.	186
ДИФРАКЦИЯ ФРЕНЕЛЯ НА БИНАРНОЙ РЕШЕТКЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ ЛИНЕЙНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ МАССИВ ДИСЛОКАЦИЙ Иконников Д.А., Дармаев Е.Ч., Мысливец С.А., Архипкин В.Г., Вьюнышев А.М.	187
ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИЙ УОЛША ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ ШАБЛОНОВ МОДУЛЯЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ОДНОПИКСЕЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ Лаппо-Данилевская А.К., Исмагилов А.О., Шумигай В.С., Цыпкин А.Н.	188
РЕЗОНАНСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПОДПОРОГОВЫХ ГАРМОНИК С ВЫСОКОЙ ЭЛЛИПТИЧНОСТЬЮ АТОМАМИ ГЕЛИЯ, ВОЗБУЖДАЕМЫМИ УМЕРЕННО ИНТЕНСИВНЫМ ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПОЛЕМ Емелин М.Ю., Рябикин М.Ю.	189
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОДНОПИКСЕЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СО СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ В КОРОТКОВОЛНОВОМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ Шумигай В.С., Исмагилов А.О., Опарин Е.Н., Лаппо-Данилевская А.К., Цыпкин А.Н.	190
ВОЗБУЖДЕНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИЙ РАДИ ДВУХУРОВНЕВОГО АТОМА ВО ВНЕШНЕМ ПЕРЕМЕННОМ ПОЛЕ Попов Е.Н., Селеменчук А.С., Воскобойников С.П.	191
ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ МНОГОФОТОННОМ ПОГЛОЩЕНИИ НАКАЧКИ В КРИСТАЛЛАХ LiTaO_3 И LiNbO_3 Сарафанова М.В., Бодров С.Б., Шугуров А.И., Бакунов М.И.	192

ХРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ В ТЁМНЫХ ЭКСИТОНАХ С ПОМОЩЬЮ СПИН-ЗАВИСИМОГО ТРЕХИМПУЛЬСНОГО ФОТОННОГО ЭХА Назаров Р.С., Соловьёв И.А., Капитонов Ю.В.	193
ПРИМЕНЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ТОКА В GAAS ЛАВИННЫХ ДИОДАХ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ Рожков А.В., Родин П.Б.	194
УПРАВЛЕНИЕ РАСПАДОМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ ПУТЕМ ЧИРПИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ Новиков В.Б.	195
ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ АТТОСЕКУНДНОЙ ИНТЕРОФЕРОМЕТРИИ ПРИ СМЕШИВАНИИ СОСТОЯНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ЧЕТНОСТИ Грызлова Е.В., Попова М.М., Юдин С.Н., Грум-Гржимайло А.Н.	196
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ И ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ РАЗРЯДОМ Левусь М.В., Ризаев Г.Э., Селезнев Л.В.	197
КОМПАКТНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОЙ МЕЗОСКОПИИ ЖИВЫХ ОБЪЕКТОВ Кунгуров К.А., Солотенков М.А., Фетодов А.Б., Ланин А.А.	198
НАБЛЮДЕНИЕ СВЕРХБЫСТРОЙ ДИНАМИКИ АССОЦИАТИВНОГО СОСТОЯНИЯ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ ГИДРОКСИДА Краснов П.О.	199
ЧАСТОТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИМПУЛЬСА НА ФРОНТЕ ИОНИЗАЦИИ В КРИСТАЛЛЕ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ Курников М.А., Бакунов М.И.	200
ПОПЕРЕЧНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СОЛИТОНОВ В РЕЖИМЕ СИЛЬНОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ СВЕТОМ И ВЕЩЕСТВОМ Зезюлин Д.А.	201
ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Львов К.В., Стремоухов С.Ю.	202
УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	203
КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ ДЛЯ АТМОСФЕРНОЙ СВЯЗИ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ Решетников Д.Д., Малютина Е.В., Король Т.К., Голубева Т.Ю., Петров В.М.	204
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИЕ ПРОЕКТЫ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО TV И 3D ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ Шойдин С.А.	205
ФАНТОМНАЯ МИКРОСКОПИЯ НА ОСНОВЕ КЛАССИЧЕСКИХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ Вьюнышев А.М., Давлетшин Н.Н., Чиркин А.С.	206

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОЕ САМОСЖАТИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНА В КРИСТАЛЛАХ KDP Арсентьев С.С., Гачева Е.И., Глушков К.А., Мухин И.Б., Соловьев А.А., Миронов С.Ю.	207
НАЧАЛЬНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ СЕГМЕНТИРОВАННОГО ЗЕРКАЛА НА ОСНОВЕ Z – СКАНИРОВАНИЯ Росчихмарова Ю.Д., Буйко С.А.	208
УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ И СПЕКТРАЛЬНО СИНГУЛЯРНЫХ МОД В РТ-СИММЕТРИЧНОЙ СРЕДЕ Бушуев В.А., Манцызов Б.И.	209
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СУБПУЧКОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЗАДАННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ И ПОЛЯРИЗАЦИИ СИНТЕЗИРОВАННОГО ПУЧКА Адамов Е.В., Богач Е.А., Дудоров В.В., Колосов В.В.	210
РАЗРАБОТКА МУЛЬТИПУЧКОВОЙ СИСТЕМЫ КОГЕРЕНТНОГО СЛОЖЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ГЛАВНОМ ФОКУСЕ ДЛЯ ПРОЕКТА XCELS Бурдонов К.Ф., Соловьев А.А., Земсков Р.С., Золотавин М.А., Кузнецов И.И., Мухин И.Б., Пестов А.Е., Сиднев А.А., Шайкин А.А., Стародубцев М.В., Хазанов Е.А.	211
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПО ДВУМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМ ФЛЮЕНСА В ОКРЕСТНОСТИ ПЕРЕТЯЖКИ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ Котов А.В., Соловьев А.А.	212
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	213
АРТФОТОНИКА	213
КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СМАЛЬТ ИЗ ПАМЯТНИКОВ ДОМОНГОЛЬСКОЙ РУСИ Гусева В.А., Асеев В.А., Ходасевич М.А., Смолянская О.А., Гаврилова К.А., Леонидова А.А.	214
ИССЛЕДОВАНИЕ ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ПИГМЕНТОВ ИКОНЫ «СПАС ВСЕДЕРЖИТЕЛЬ» МЕТОДОМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА IN SITU: ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДА Волкова Т.В., Магнитская Е.Р., Гладкова Е.С., Андреев И.И., Басманов М.Д., Смолянская О.А.	215
БИОФОТОНИКА	216
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСМОТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЛИФЕРАЦИЮ КЛЕТОК МЕЛАНОМЫ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АНСАМБЛЯ РАКОВЫХ КЛЕТОК Крапивина Н.А., Тучин В.В., Семенова Н.И.	217
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ Вьюнышева С.А., Давлетшин Н.Н., Мысливец С.А., Вьюнышев А.М.	218

ПОЛЯРИЗОВАННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ЛЮМИНОФОРОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ С БИОМАКРОМОЛЕКУЛАМИ Парфёнова Е.В., Слюсаренко Н.В., Мочалов М.О., Слюсарева Е.А.	219
МОДЕЛЬ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО БИОСЕНСОРА НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ АГРЕГАТОВ ПЛАЗМОН-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ НАНОЧАСТИЦ Au-CeYbF ₃ Избасарова Э.А., Газизов А.Р.	220
ЛАПАРОСКОПИЧЕСКАЯ СПЕКЛ-КОНТРАСТНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АБДОМИНАЛЬНОЙ ИШЕМИИ У ЖИВОТНЫХ Приземин В.Н., Голубова Н.В., Серёгина Е.С., Дрёмин В.В., Потапова Е.В.	221
МЕТОД ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИНТРАОПЕРАЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ИШЕМИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ КИШЕЧНОЙ СТЕНКИ Горюнов И.А., Шуплецов В.В., Адаменков Н.А., Мамошин А.В., Потапова Е.В., Дрёмин В.В.	222
СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ТИХОХОДОК Омельченко А.Н., Окотруб К.А., Суровцев Н.В.	223
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ СИСТЕМ Лактионова А.В., Зыкова В.А., Суровцев Н.В.	224
BIOMIMETIC HYDROXYAPATITE-SILVER NANOCOMPOSITES FOR CONTROLLED ANTIBIOTIC DELIVERY VIA PHOTOTHERMALSTIMULATION Olumakinde O.C.	225
МНОГОУГЛОВОЕ СТАТИЧЕСКОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В РАСТВОРАХ, СОДЕРЖАЩИХ ИНСУЛИН Гибизова В.В., Ибрагимова Ф.В.	226
ДИАГНОСТИКА ХРОНИЧЕСКОЙ СЕРДЕЧНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СЫВОРОТКИ КРОВИ Пименова И.А., Матвеева И.А.	227
ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА КАК МОДУЛЯТОР ВИЗУАЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ ЕДЫ Черкашина А.А., Коржнева Т.Г., Туранов С.Б., Толкачева К.П.	228
ИЗГОТОВЛЕНИЕ КРЕМНИЙ-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ ДЛЯ БИОФОТОНИКИ Нестеров В.Ю., Шулейко Д.В., Заботнов С.В., Преснов Д.Е.	229
ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАМАНОВСКИХ СПЕКТРОВ КОЖИ Томникова К.Е., Матвеева И.А.	230

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ АПТАМЕРОВ С ХЕЛАТНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ Томилин Ф.Н., Рогова А.В., Щугорева И.А., Кичкайло А.С., Коловская О.С.....	231
ОПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ТЕТРАПИРРОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ТАКСОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МИКРООРГАНИЗМОВ Багрянская У.Ю., Якимов Б.П., Рубекина А.А., Ширшин Е.А.....	232
ОПИСАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА Золоторенко Д.А., Адищев С.В., Лактионова А.В., Добрынина Е.А., Суровцев Н.В.....	233
АНТИМИКОТИЧЕСКОЕ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ СИНЕГО (405-450 НМ) СПЕКТРА НА ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ <i>TRICHORHYNCHON RUBRUM</i> Молчанова К.А., Нестерова Т.Б., Нечаева О.В., Тучина Е.С., Тучин В.В., Шнайдер Д.А.	234
ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЖИ ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ В ХОДЕ АНТИМИКРОБНОГО ФОТОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ <i>EX VIVO</i> И <i>IN VIVO</i> Шарабарина Т.В., Сурков Ю.И., Серебрякова И.А., Генин В.Д., Тучина Е.С., Тучин В.В.....	235
СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО ФИОЛЕТОВОГО (405 НМ) И СИНЕГО (428 НМ) ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ АНТИМИКРОБНОМ ФОТОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ <i>IN VIVO</i> Аванесян А.А., Шарабарина Т.В., Грицай У.О., Мусаелян А.Г., Напшева А.М., Тучина Е.С., Алипов В.В., Тучин В.В.....	236
НАНОКОНТЕЙНЕРЫ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ-ЗОЛОТА ДЛЯ ТЕРАНОСТИКИ ОНКОЗАБОЛЕВАНИЙ Васильева М.И., Назаровская Д.А., Тюрин-Кузьмин П.А., Осминкина Л.А.	237
МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛА ФОТОПЛЕТИЗМОГРАММЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДАВЛЕНИЯ ТОНОМЕТРОМ С МАНЖЕТОЙ Рогаткин Д.А., Тарасов А.П.....	238
ИИ В ФОТЕНИКЕ.....	239
ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ АНАЛИЗЕ ВИДЕОДАНЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИНАХ Яковлев А.В.	240
НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОБРАБОТКА КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНВАРИАНТНЫХ ФИЛЬТРОВ С ФОРМИРУЮЩИМИ ФУНКЦИЯМИ И МИНИМИЗАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ Павленко Д.В., Стариков Р.С.....	241
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ Романовский Я.О., Рожко М.В., Митрофанов А.В.....	242

ГИБРИДНЫЕ МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ВОЛНОМЕРА НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРОВ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ Саечников И.В., Чернявская Э.А., Саечников А.В.	243
ИНДУСТРИАЛЬНАЯ ФОТОНИКА	244
ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОГЛОЩЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ КАЛОРИМЕТРИИ Ватник С.М.	245
АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО АБСОРБЦИОННОГО ЛИДАРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАНА Верхошенцева С.Л., Ципотан А.С., Непомнящий О.В.	246
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ В ФОТОННЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО НИОБАТА ЛИТИЯ Корягин В.А., Шабалин Р.Р., Москалев Д.Н., Криштоп В.В.	247
КОМПАКТНАЯ СИСТЕМА ЛАЗЕРНОЙ ЧИСТКИ НА ОСНОВЕ 500ВТ ПЯТИКАНАЛЬНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА Юревич В.И., Цыпкин А.Н., Цветков А.Р.	248
ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ НА НЕВЕ (ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ) Бутузов В.В., Малахов М.А., Анисимов В.И., Жуков В.В.	249
ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛИРОВАННОЙ PUMP-PROBE СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ И СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ БИОЛОГИЧЕСКИ ВАЖНЫХ МОЛЕКУЛ Белашов М.В., Сасин М.Э., Волков Д.А., Горбунова И.А., Васютинский О.С.	250
ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОГО СЕНСОРА N ₂ O Антоненко Я.В., Шерстов И.В.	251
СПЕЦИФИКА ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ПОЛЯРНЫХ СРЕЗАХ КРИСТАЛЛА α -LiIO ₃ Корчагин А.В., Умылин В.Е., Козлова Н.С., Забелина Е.В., Петраков В.С., Овсянников Д.А.	252
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ ПИЛООБРАЗНОГО ТИПА Соловьев В.С., Тимошенко С.П., Тимошенко А.С.	253
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И УСТРОЙСТВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ Гончаров Ф.М., Киселев Ф.Д., Самсонов Э.О.	254
УПРАВЛЯЕМАЯ СВЕТОДИОДНАЯ МАТРИЦА ДЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ ОДНОПИКСЕЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГАЗОВ Опарин Е.Н., Шумигой В.С., Лаппо-Данилевская А.К., Исмагилов А.О., Цыпкин А.Н.	255

КВАНТОВАЯ ОПТИКА И КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	256
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КВАНТОВОГО КАНАЛА В УСЛОВИЯХ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПО МЕТЕОДАНЫМ Каргина Д.А., Гончаров Р.К.	257
СОЗДАНИЕ И МАНИПУЛЯЦИЯ СОСТОЯНИЯМИ КОТА ШРЕДИНГЕРА НА ОСНОВЕ ПОЛУКЛАССИЧЕСКИХ ПРЕДСКАЗАНИЙ Гончаров Р.К., Веселкова Н.Г., Киселев А.Д.	258
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОЙ ФАЗЫ В РЕЗОНАТОРАХ В ФОРМЕ КОЛЬЦА И ЛЕНТЫ МЁБИУСА Лытаев А.А., Совершеннов И.Д., Попов И.Ю.	259
МЕРА ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ АТАКЕ С ПЕРЕИЗЛУЧЕНИЕМ ФОТОНОВ ДЛЯ СИСТЕМ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ С ОДНИМ ДЕТЕКТОРОМ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ Геллерт М.Е., Наседкин Б.А., Чистяков В.В., Гайдаш А.А., Козубов А.В.	260
КВАНТОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ РАДИО-МОДАМИ В МОДЕЛИ ОДНОАТОМНОГО МАЗЕРА С ДВУМЯ РЕЗОНАТОРАМИ Попов Е.Н., Трифанов А.И.	261
АТОМНЫЙ МАГНИТОМЕТР С МОДУЛИРОВАННОЙ ПО ПОЛЯРИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ Радченко М.Д., Юдин В.И., Басалаев М.Ю., Тайченачев А.В.	262
СПИНОВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ В ИНТЕРФЕЙСАХ НА ОСНОВЕ ДВУХСЛОЙНОГО ГРАФЕНА, ЛЕГИРОВАННОГО ЕВРОПИЕМ Мельчакова Ю.А.	263
КВАНТОВОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ АЛГОРИТМА ХЕШИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЦЕССОРА НА БАЗЕ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ Хорсова И.В., Бетеров И.И.	264
КВАНТОВЫЕ КОГЕРЕНТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В МАТЕРИАЛЕ С СЕТЕВОЙ ТОПОЛОГИЕЙ В РЕЖИМЕ СВЕРХСИЛЬНОЙ СВЯЗИ Захаренко П.В., Алоджанц А.П., Царёв Д.В.	265
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА СВЕРХПЛОТНОГО КОДИРОВАНИЯ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРНЫЙ КАНАЛ Тузиков Ф.Н.	266
КОНТРОЛЬ СТЕПЕНИ ЗАПУТАННОСТИ БИФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ ЗА СЧЕТ ЭФФЕКТА АНТИГРУППИРОВКИ Гусельников М.С., Киселев А.Д., Гайдаш А.А., Мирошниченко Г.П., Козубов А.В.	267
ЭФФЕКТЫ АСИММЕТРИИ В СХЕМАХ ГОМОДИННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ Наумчик А.С., Гончаров Р.К., Киселев А.Д.	268
КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ И ИХ РОЛЬ В РАЗВИТИИ СОВРЕМЕННОЙ СЕНСОРИКИ Синельников А.О., Кузнецов П.С., Кузнецова А.А.	269

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ Дрязгов М.А., Хрипач Н.М., Скрябин Н.Н., Дьяконов И.В., Корнеев А.А., Страупе С.С., Кулик С.П.....	270
МОМЕНТЫ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ И СУБПУАССОНОВЫЙ ИЗЛУЧЕНИЕ В АТМОСФЕРНОМ КАНАЛЕ Степанов И.Г., Гончаров Р.К., Киселев А.Д.....	271
РАСЧЕТ ОПТИКИ ДЛЯ РАБОТЫ КВАНТОВОГО КАНАЛА СИСТЕМЫ АТМОСФЕРНОГО КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ В ДНЕВНОЕ ВРЕМЯ Вахрушева В.М., Климов А.Н.	272
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БАЛАНСНОГО ДЕТЕКТОРА Шишков А.В., Наседкин Б.А., Филипов И.М., Чистяков В.В.	273
АНАЛИЗ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ОПТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ Анпилов В.С., Шайдуллин Р.И., Тезадов Я.А., Голубев М.А.....	274
ДИНАМИКА ЛОКАЛИЗОВАННОГО АТОМНОГО АНСАМБЛЯ В ПОЛЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО СЖАТОГО СВЕТА Трубилко А.И., Башаров А.М.	275
ВЛИЯНИЕ КЛАССИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ НА КВАНТОВЫЙ, ПРИ ОДНОВРЕМЕННОЙ ПЕРЕДАЧЕ В МНОГОСЕРДЦЕВИННОМ ВОЛОКНЕ Тимошенко А.С., Колесников О.В.	276
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ БЛОХОВСКИХ ВОЛН В ОДНОМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ Семусhev К.В., Мункуева Ж.Э., Достовалов А.В., Бабин С.А., Маслова Е.Э., Рыбин М.В.	277
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХКУБИТОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ ДЛЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ Козенко К.В.....	278
ЛАЗЕРНАЯ ДИОДНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ Герасимова М.П., Садовников С.А., Яковлев С.В., Крючков А.В.	279
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ В СИСТЕМАХ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ Соломатин О.А., Наседкин Б.А., Морозова П.А., Чистяков В.В.....	280
ЦИФРОВАЯ ПОДПИСЬ НА КВАНТОВО-ЗАЩИЩЕННЫХ КЛЮЧАХ Грабовой М.Н., Торопова Д.И., Кузьмин С.В., Егоров В.И.....	281
ДЕКОДИРОВАНИЕ КОДОВ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ Багаев Д.С.	282
ЛАЗЕРНАЯ И СИЛОВАЯ ОПТИКА	283
МЕХАНИЗМЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НАНО И МИКРОЧАСТИЦ $\text{YF}_3: \text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ Шошева Е.И., Пудовкин М.С.....	284

СПЕКТРАЛЬНО- КИНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУР $\text{CeO}_2/\text{CeF}_3: \text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕНСОРИКИ Докудовская А.К., Рахматуллин Р.М., Кораблева С.Л., Морозов О.А., Родионов А.А., Пудовкин М.С.....	285
ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ НА ОСНОВЕ ТЕЛЛУРИТОВОГО ВОЛОКНА, ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ ЭРБИЯ Макарова Н.А., Ватник И.Д.	286
ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ФОТОИОНИЗАЦИИ ГАЗОВЫХ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СРЕД ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ЛИНЕЙНОЙ И ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ Вертелецкая М.П., Богацкая А.В., Попов А.М.	287
СВЕТОРАССЕЯНИЯ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ГЕМОГЛОБИНА Майков Э.В., Федорова К.В., Гибизова В.В.....	288
СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ VCSELS ПРИ НАЛИЧИИ ДВУХ ТОЧЕК ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ Лобацевич П.М., Буров Л.И.	289
НАНОФОТОНИКА	290
ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ ДИФфуЗИЯ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ ПЕРОВСКИТОВ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ Бородин Л.Н., Татаринов Д.А., Маргарян И.В., Аннас К.И., Борисов В.Н., Вениаминов А.В.	291
СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И НАНОПЛАСТИН CdSe Ридер М.А., Болтенко А.В., Домарев С.Н., Захаров В.В., Орлова А.О.....	292
ТЕРАГЕРЦЕВАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В СПИНТРОННЫХ ЭМИТТЕРАХ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ Pt/Co/Si С «МАГНИТОМЕРТВЫМ» СЛОЕМ Co Авдеев П.Ю., Лебедева Е.Д., Алферьев А.Л., Кузнецов К.Г., Караштин Е.А., Сапожников М.В., Буряков А.М.....	293
ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag_2S НА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ НАНОКОМПОЗИТОВ $\text{TiO}_2/\text{Ag}_2\text{S}$ Корнеева А.А., Кондратенко Т.С., Асланов С.В., Овчинников О.В., Коновалова А.....	294
КВАЗИНОРМАЛЬНЫЕ МОДЫ КАК ОСНОВА ДЛЯ ТЕОРИИ РЕЗОНАНСОВ ФАНО В РАССЕЯНИИ СВЕТА НАНОЧАСТИЦАМИ Бочкарев М.Э., Солодовченко Н.С.	295
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ МОД С ПОМОЩЬЮ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДА СУРЬМЫ Кабак Е.В., Колосов Г.А., Шорохов А.С., Федянин А.А.	296
ОСОБЕННОСТИ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ENZ МЕТАМАТЕРИАЛАХ С НЕЛОКАЛЬНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ОТКЛИКОМ Доценко А.А., Новиков В.Б., Давиденко Н.К., Сотничук С.В., Напольский К.С., Мурзина Т.В.....	297

ПЛАНАРНАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ НА БАЗЕ БЛОХОВСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН Парахина П.В., Попкова А.А., Федянин А.А.	298
СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДВУМЕРНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ PbSe/PbS Клименко Д.И., Черевков С.А., Мирущенко М.Д., Скурлов И.Д.	299
РАЗРАБОТКА ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА МЕТОДОМ ДВУХФОТОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛИТОГРАФИИ В ОБЪЕМЕ ПОРИСТОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ Печкурова Д.И., Балуюн Т.Г., Свяховский С.Е., Федянин А.А.	300
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ МОД В ДВУМЕРНОМ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКЕ CrSBr ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ Калантаевский И.Э., Горелкина Т.Д., Чернов А.И., Кравцов В.А.	301
ГЕНЕРАЦИЯ ТРЕТЬЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ НЕЛИНЕЙНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ В АСИММЕТРИЧНЫХ КРЕМНИЕВЫХ НАНОДИСКАХ Назаренко А.А., Мусорин А.И., Попкова А.А., Шорохов А.С., Федянин А.А.	302
МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОДИНОЧНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ЩЕЛЕВЫХ МОДАМИ ГЕТЕРОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО НАНОДИМЕРА Газизов А.Р., Избасарова Э.А.	303
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СФЕРИЧЕСКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ InP/ZnSe Русских К.И., Головатенко А.А., Родина А.В.	304
ВЛИЯНИЕ БЛИЖАЙШЕГО ОКРУЖЕНИЯ КВАНТОВЫХ НАНОПЛАСТИН CdSe НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИИ Болтенко А.В., Ридер М.А., Орлова А.О.	305
СОЗДАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕГРАТОРОВ И ДИФФЕРЕНЦИАТОРОВ ОГИБАЮЩЕЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ СИГНАЛОВ С ШИРОКИМ РАБОЧИМ ДИАПАЗОНОМ НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ Емельянцева П.С., Свяховский С.Е.	306
ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag ₂ S В ПРИСУТСТВИИ МОЛЕКУЛ ТЕТРАЦИКЛИНОВОЙ ГРУППЫ Зябкина М.М., Кондратенко Т.С., Чевычелова Т.А., Лачинов Д.А., Овчинников О.В.	307
ОПТИЧЕСКАЯ МОДУЛЯЦИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИХАЛЬКОГЕНИДАХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ WSe ₂ , WS ₂ И MOSe ₂ Лебедева Е.Д., Авдеев П.Ю., Алферьев А.Л., Кузнецов К.Г., Булавинцева Е.А., Буряков А.М., Мишина Е.Д.	308

ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ФОТОНИКИ.....	309
ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$, ЛЕГИРОВАННЫХ ИНДИЕМ Ружевич М.С., Мынбаев К.Д., Баженов Н.Л., Дорогов М.В., Балашов В.С., Варавин В.С., Ремесник В.Г., Ужаков И.Н., Михайлов Н.Н.....	310
ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ ЛЮМИНОФОРА С АНОМАЛЬНО БОЛЬШИМ СТОКСОВЫМ СДВИГОМ Парфёнова Е.В., Слюсаренко Н.В., Раджарамакришна Р., Слюсарева Е.А.	311
ПРОТОНООБМЕННЫЕ СЛОИ В СМЕШАННЫХ КРИСТАЛЛАХ ТВЕРДОГО РАСТВОРА НИОБАТА-ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ Сосунов А.В., Петухов И.В., Мясникова Е.В., Масалкин Д.Н.....	312
СПЕКТРЫ ЭКСИТОНОПОДОБНЫХ И ПОЛЯРИТОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В НАНОРЕШЕТКАХ МИКРОПОР С ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ Безус Ю.А., Федоров С.А.....	313
АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ – ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДНК-ОРИГАМИ НАНОСТРУКТУР Магарян К.А., Аржанов А.И., Егорова Т.В., Степанов М.Е., Наумов А.В., Хохрякова У.А.	314
РЕЗОНАНСНОЕ РАМАНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ В НАНОТРУБКАХ НА ОСНОВЕ MoS_2 Казанов Д.Р., Пошакинский А.В.	315
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БОРОГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОКРИСТАЛЛЫ СВИНЦОВО-ГАЛОГЕНИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ Шеремет В.Г, Харисова Р.Д., Зырянова К.С., Миронов Л.Ю.....	316
ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ТЯЖЕЛЫХ СВИНЦОВО-ГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ Леонидова А.А., Асеев В.А., Никоноров Н.В.....	317
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПИРАМИДАЛЬНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ОСТРОВКОВ С РАЗЛИЧНЫМ КОНТАКТНЫМ УГЛОМ ДЛЯ АНТИОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ Лозовой К.А., Дирко В.В., Кукунов О.И., Коханенко А.П., Войцеховский А.В.....	318
РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ФТОРФОСФАТНЫМ СТЕКЛОМ, СОДЕРЖАЩИМ ИОНЫ ЦЕЗИЯ, СВИНЦА И БРОМА Кузьменко Н.К., Колобкова Е.В., Сергеев М.М., Никоноров Н.В.	319
АПКОНВЕРСИЯ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ Y_2O_3 , АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er И Yb Кулинкин А.Б., Коровин А.М., Кузин Д.С., Ван И., Хуан Л., Соколов Н.С.....	320
СИНТЕЗ ОДИНОЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТА CsPbBr_3 НА ОМНИФОБНЫХ ПОДЛОЖКАХ Семынин М.С., Карцев Д.Д., Щербинин Д.П.....	321

ФОТОДЕТЕКТОРЫ КОРОТКОВОЛНОВОГО ИК-ДИАПАЗОНА С $\lambda_{\text{cutoff}} = 2,6$ МКМ НА ОСНОВЕ МЕТАМОРФНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР InGaAs/InP	
Баранцев О.В., Василькова Е.И., Пирогов Е.В., Воропаев К.О., Васильев А.А., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Соболев М.С.	322
ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ	
Кострицкий С.М., Яценко А.В., Федоров В.А.	323
ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЁНОК САМАРИЯ	
Попов Н.А., Акашев Л.А., Шевченко В.Г., Конюкова А.В.	324
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИСПЕРСИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛЕ ГАЛОГЕНИДНОГО ПЕРОВСКИТА MABrI_3	
Самсонова А.Ю., Селиванов Н.И., Капитонов Ю.В.	325
ОБРАТИМАЯ ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ ИЗОМЕРИЗАЦИЯ 1,3,5-ТРИФЕНИЛФОРМАЗАНА В ПЛЕНКАХ ПВБ, Ф-32Л И Ф-42	
Серебров Е.И., Белов Д.В., Беляев С.Н., Сороколетова Н.А.	326
КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ДОМЕНОВ И ДОМЕННЫХ СТЕНОК В МОНОКРИСТАЛЛАХ ГАЛОГЕНИДНОГО ПЕРОВСКИТА MABrCl_3	
Шевага Н.И., Капитонов Ю.В.	327
ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ЦЕРИЕМ НА ОПТИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ	
Александрова Е., Асеев В., Никоноров Н., Раджарамакришна Р.	328
ПОРИСТАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ЛАЗЕРНО МОДИФИЦИРОВАННОГО ТИТАНА ДЛЯ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ	
Курицкий М.С., Цибульников А.В., Лятун И.И., Зюбин А.Ю., Самусев И.Г.	329
УСИЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ МШГ-РЕЗОНАТОРОВ ПРИ МОДИФИКАЦИИ АКТИВНОГО СЛОЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА	
Ткач А.П., Соловьева Е.О., Стрелкова К.В., Богданов К.В.	330
ДИФФУЗИОННОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ ТЕМНОВОГО ТОКА В MWIR МЛЭ HgCdTe nB(SL)n ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ	
Войцеховский А.В., Дзядах С.М., Горн Д.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Сидоров Г.Ю., Якушев М.В., Средин В.Г.	331
ФОТОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИСТАЛЛАХ BaY_2F_8 ПРИ ДВОЙНОЙ АКТИВАЦИИ ИОНАМИ Tb^{3+} - Yb^{3+}	
Зубарева А.М., Шавельев А.А., Шакиров А.А., Миннебаев Т.М., Олейникова Е.И., Сидоров И.Д., Гинкель А.К., Низамутдинов А.С.	332
ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НИКЕЛЕВЫХ ВОЛОКОН НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПРОЗРАЧНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПЛЁНОК ZNO/NiFs	
Кузнецова В.В., Низамеева Г.Р., Лебедева Э.М., Низамеев И.Р.	333
ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МОЛИБДАТЕ ЛИТИЯ-НАТРИЯ В УСЛОВИЯХ SSF-СИНХРОНИЗМА	
Денисов Д.А., Демушкин Д.Ю., Коняшкин А.В.	334

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ СЛОЕВ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ InAs/(InAsSb)/InAsSbP МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ Кириленко Я.Д., Ружевич М.С., Дорогов М.В., Романов В.В., Моисеев К.Д., Мынбаев К.Д., Чуманов И.В., Фирсов Д.Д., Комков О.С.	335
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ГОМОЭПИТАКСИАЛЬНОМ РОСТЕ НА ПОВЕРХНОСТИ SI(001) Коханенко А.П., Кукенов О.И., Дирко В.В., Лозовой К.А.	336
МОДЕЛИРОВАНИЕ GFF ФИЛЬТРА ПО ЗАДАННОМУ СПЕКТРУ ПРОПУСКАНИЯ НА ОСНОВЕ ВБР Корнеев С.Г., Мирошниченко Г.П., Аржаненкова А.Н.	337
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИОННЫЙ ОБМЕН NA-AG И NA-K В ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОМ СТЕКЛЕ Попова В.А., Никоноров Н.В., Песняков В.В.	338
ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ КРИСТАЛЛА ЛИТИЙ-НАТРИЕВОГО МОЛИБДАТА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1070 НМ Демушкин Д.Ю., Денисов Д.А., Коняшкин А.В.	339
ЗАПИСЬ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В KCl-TiNO ₃ Григоров Я.И., Тютрин А.А., Мартынович Е.Ф.	340
СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ПЕРОВСКИТОВ CsPbI ₃ Капустин Г.А., Колобкова Е.В.	341
ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ СЕНСОРИКА НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ CeF ₃ -TbF ₃ -YF ₃ Калиниченко С.И., Пудовкин М.С., Низамутдинов А.С.	342
ДИНАМИКА СОСТОЯНИЙ ³ F ₄ → ³ H ₆ И ⁵ I ₇ → ⁵ I ₈ ИОНОВ Tm ³⁺ И Ho ³⁺ В СМЕШАННЫХ КРИСТАЛЛАХ LiY _{0,3} Lu _{0,7} F ₄ Миннебаев Т.М., Низамутдинов А.С., Шавельев А.А., Семашко В.В.	343
УСИЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМОННЫХ АНТЕННАХ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР {InGaAs/InAlAs} Ковалева П.М., Кузнецов К.А., Климов Е.А., Клочков А.Н., Пушкарев С.С.	344
АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ФОТОЭЛЕКТРОНОВ В Al _x Ga _{1-x} As/GaAs P-I-N ДИОДЕ Фань С., Трухин В.Н.	345
СИНТЕЗ И ОПТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЁНОК МОЛИБДАТОВ ЕВРОПИЯ Кузин Д.С., Большаков В.О., Кулинкин А.Б., Селькин А.В., Соколов Н.С.	346
СВЕРХБЫСТРАЯ ФОТОНИКА И КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИКА	347
АКСИАЛЬНЫЕ СОЛИТОНЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ Колесникова А.Ю., Апрелов Н.А., Ватник И.Д., Стурман Б.И., Подивиллов Е.В.	348

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВОЙ СРЕДЕ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ НЕСКОЛЬКИХ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ МОД ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА Кузьмин И.В.	349
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА НА СМЕЩЕНИЕ ЕГО ЧАСТОТЫ В ПРОЦЕССЕ ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО САМОРАССЕЯНИЯ Халяпин В.А.	350
АТТОСЕКУНДНОЕ СВЕРХИЗЛУЧЕНИЕ ТРЁХУРОВНЕВЫХ ИОНОВ Tm^{3+} СИНТЕЗИРУЕМЫЕ КАК МАКСИМАЛЬНО РАЗМЕРНЫЕ В ПЕРОВСКИТОВЫЕ СВЕРХТОНКИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ОБРАЗОВАНИЯ Рыжов И.В., Воронов Я.В., Иванов Г.А., Буршанова А.А.	351
ДИНАМИКА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ОТКЛИКА КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ПРИРОДЫ В ПОЛЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ Казаков И.И., Гордеев Д.М., Гусельников М.С., Козлов С.А.	352
ДИНАМИЧЕСКИЕ МИКРОРЕЗОНАТОРЫ, НАВОДИМЫЕ В СРЕДЕ ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИМИ ИМПУЛЬСАМИ Дьячкова О.О., Архипов Р.М., Архипов М.В., Пахомов А.В., Розанов Н.Н.	353
АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ФАЗОВЫХ СИНГУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКИ ФРЕНЕЛЯ Пантелеева Е.П., Мельникова Е.А., Горбач Д.В., Толстик А.Л., Слюсаренко С.С., Карабчевская А.	354
СПЕКТАЛЬНАЯ И ПОЛЕВАЯ СТРУКТУРА ВИДЕОИМПУЛЬСОВ Бубенщиков И.В., Титяпкин А.А., Залипаев В.В., Киселев А.Д., Козлов С.А.	355
ГЕНЕРАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ ГРЕБЕНКИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ Новиков А.Д., Ватник И.Д.	356
ДИСПЕРСИОННЫЙ ВКЛАД В РАСПРОСТРАНЕНИЕ МАЛОПЕРИОДНЫХ СИНУСОПОДОБНЫХ ИМПУЛЬСОВ Арцер И.Р., Мельник М.В., Цыпкин А.Н., Козлов С.А.	357
ОПТИМИЗИЦИЯ ПРОТЯЖЁННОЙ СОЛИТОННОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ ПУТЁМ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА Патрин Г.А., Чеховской И.С., Штырина О.В., Сидельников О.С., Федорук М.П.	358
АНИЗОТРОПИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В КРИСТАЛЛАХ ФТОРИДА МАГНИЯ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ Кузьмин В.С., Мартынович Е.Ф., Мурзин С.В., Дресвянский В.П.	359
ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СЛАБЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ Циплакова Е.Г., Петров Н.В.	360

МЕТОД РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОСТЕЙ СО СТРУКТУРНО СЛОЖНЫМИ МОЛЕКУЛАМИ В ТГц ДИАПАЗОНЕ Набилкова А.О., Гусельников М.С., Исмагилов А.О., Мельник М.В., Козлов С.А., Цыпкин А.Н.	361
ДИФРАКЦИЯ ВИДЕОИМПУЛЬСОВ Титяпкин А.А., Бубенщиков И.В., Залипаев В.В., Киселев А.Д., Козлов С.А.	362
УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	363
ПОДАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ТУРБУЛЕНТНОСТИ МЕТОДАМИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ ПРИ СОПРЯЖЕНИИ ВОЛОКНА В АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ Топоровский В.В., Галактионов И.В., Казанцев С.Ю.	364
ДЕФОРМИРУЕМОЕ ЗЕРКАЛО С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПЬЕЗОАКТЮАТОРОВ Кузьмицкий П.М., Федорино Д.А.	365
ГЕНЕРАЦИЯ ИГОЛЬЧАТОГО ПУЧКА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ КОНИЧЕСКИ РЕФРАГИРОВАВШЕГО ПУЧКА ЧЕРЕЗ АКСИКОН Абдулразак С.Х., Дерягин Н.Г., Соколовский Г.С.	366
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АППРОКСИМАЦИИ ГРАДИЕНТОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПОЛИНОМАМИ ЦЕРНИКЕ И БИ-СПЛАЙНАМИ Галактионов И.В., Топоровский В.В.	367
ШЕСТИВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С УДВОЕННЫМ ОБРАЩЕНИЕМ ВОЛНОВОГО ФРОНТА В МНОГОМОДОВЫХ ВОЛНОВОДАХ С ТЕПЛОВОЙ И РЕЗОНАНСНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ Шмойлова С.С., Ивахник В.В.	368
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПОДВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТРАССАХ Чижин Д.Д., Козлов Т.А., Захаров Э.А.	369
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ НЕМАТИКО-ХОЛЕСТЕРИЧЕСКОЙ СМЕСИ Нурмухаметов Д.И., Гордеева А.И., Паньков А.С., Пономарёв Р.С.	370
АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ ФАНТОМНОГО И ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДОВ МИКРОСКОПИИ Давлетшин Н.Н., Вьюнышев А.М., Чиркин А.С.	371
МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЗЕРКАЛ Гончаров В.Д., Леонов Е.В., Ким Я.И., Соловьева А.В., Шанин Ю.И., Щипалкин В.И.	372
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА ИНТЕРФЕРОГРАММ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ТАЛЬБОТА Елифанов А.Ю., Сойфер Ф.И., Чижин Д.Д.	373
ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО К АКУСТИЧЕСКИМ КОЛЕБАНИЯМ Макарин С.С., Гацко Д.А., Прохорова У.В., Погода А.П.	374

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ С ДИФРАКЦИОННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ МОДУЛЯТОРАМИ СВЕТА С ФУНКЦИЯМИ ПРОПУСКАНИЯ, ЗАДАННЫМИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ Чугунов С.С., Спиридонов С.И., Щербаков А.А.	375
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН, СОСРЕДОТОЧЕННЫХ У ВОГНУТОЙ ГРАНИЦЫ Халиков А.Р., Попов И.Ю.	376
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ДИОКСИДОВ ТИТАНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА Хмелевский В.А., Карлагина Ю.Ю., Романова Г.В.	377
ИЗМЕРЕНИЕ СТРУКТУРЫ ОПТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ МНОГОПУЧКОВОЙ ФОКУСИРОВКЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Золотавин М.А., Бурдонов К.Ф., Соловьев А.А.	378
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ В ПУЧКЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ДАЛЬНОМЕРА Гацко Д.А., Макарин С.С., Гавриш М.В., Прохорова У.В., Розанов П.К., Сементин В.В., Борейшо А.С., Погода А.П.	379
ПРИМЕНЕНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛУТОНОВЫХ И БИНАРНЫХ ГОЛОГРАММ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СПЕКЛ-ПОЛЕЙ Радюк А.А., Давлетшин Н.Н., Иконников Д.А., Мысливец С.А., Вьюнышев А.М., Чиркин А.С.	380
СИСТЕМА ДЛЯ ЦИФРОВОЙ И АНАЛОГОВОЙ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ Каменев В.Г., Клеопова Н.А., Арапов Ю.Д.	381

АРТФОТОНИКА

**НАУЧНАЯ РЕСТАВРАЦИЯ ПРЕДМЕТОВ ИЗ МЕТАЛЛА С РЕЛЬЕФНЫМ
ИЗОБРАЖЕНИЕМ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВОСПОЛНЕНИЯ УТРАТ**

Котельников П.Н.¹, Кураков С.В.², Богданов А.В.²

¹Государственный научно-исследовательский институт реставрации, Москва, Россия

²МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

113metal@gmail.com

Изучение и исследование новых физико-химических процессов в металловедении, аддитивных технологиях, наплавлении металлов и гальванических покрытиях открыло новые возможности для применения этих методов в научной реставрации произведений искусства из металла музейного уровня.

Ключевые слова: рельефное изображение, импульсное лазерное напыление.

В докладе представлен уникальный опыт совместного труда инженерных специалистов и художников-реставраторов, направленный на восстановление отсутствующих рельефных элементов на поверхности золотой медали Всемирной выставки в Париже 1900 года, для экспозиции музея МГТУ им. Н. Э. Баумана. Основной задачей стало восстановление именной награды директора ИМТУ Ивана Аристова, при этом сама медаль была утрачена в период исторических революционных событий 1917 года в России. Для осуществления поставленной задачи были использованы современные аддитивные технологии, включая печать тонкой полимерной рельефной плёнки, которая точно воспроизводила утраченный текст. Далее методом импульсного лазерного напыления на поверхность выращенного образца был нанесён слой меди, что позволило создать прочную основу для последующей обработки. Завершающим этапом стало гальваническое золочение фрагмента, которое не только восстановило эстетический вид медали, но и обеспечило долговечность восстановленного участка. Данный проект демонстрирует, как сочетание современных технологий и традиционных методов реставрации позволяет сохранять и восстанавливать объекты культурного наследия. Применение аддитивных технологий и металлизации открывает новые перспективы для реставрации сложных металлических изделий, где требуется высокая точность, сохранение исторической достоверности и соблюдение принципов музейной реставрации [1]. В работе подчеркивается важность междисциплинарного подхода, объединяющего усилия инженеров, материаловедов и реставраторов, для решения сложных задач в области сохранения культурного наследия. Результаты исследования могут быть использованы для восстановления других музейных экспонатов, а также для разработки новых стандартов в научной реставрации.

Обращаясь к теме реставрации утраченных элементов рельефного изображения, например, оклада иконы или настольной медали, следует отметить, что выбор методов восстановления довольно ограничен и предопределен [2]. Все деформирующие способы обработки металлов давлением изменяют внутреннюю структуру объекта реставрации и малоприменимы или невозможны. По этой же причине следует отказываться от высокотемпературного и энергоёмкого вмешательства при прямом (типа direct) управляемом процессе наплавления металла. Не всегда возможна и уместна пайка и лазерная точечная сварка, например, на археологических металлических предметах [3]. Остаются только обратимые клеевые способы соединения с применением органических полимерных смол, лаков и красок с последующими тонировками, выполняемыми художником-реставратором. При этом качество работы, точность восстановленного художественного образа экспоната и последующее бытование объекта в музее целиком и полностью зависит от квалификации мастера, который должен сделать так, чтобы, назовем это - пластмасса выглядела как металлическая поверхность объекта, и разница в применяемых материалах была незаметна зрителю.

В этом и заключается различие подходов к восстановлению утрат в музейной реставрации и в реновации объектов из различных областей машиностроения, где на первом месте стоит задача по восстановлению функциональных и эксплуатационных характеристик, а не сохранение историко-культурной информации. Реставратор не может производить работы, затрагивающие глубокие и необратимые изменения формы, образа и внутренней структуры материала реставрируемого музейного предмета [4].

[1] Шемаханская М.С., М.: «Индрик», (2015).

[2] Равич И.Г. и др., *Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение*, №3(7), (2023).

[3] Нацкий М.В., Равич И.Г., *Культурологический журнал*, № 4(46), (2021).

[4] Котельников П.Н. и др., *Художественное наследие. Исследования. Реставрация. Хранение*, №3(7), 37-45, (2023).

**АНАЛИЗ ПРОИСХОЖДЕНИЯ УЛЬТРАМАРИНОВЫХ ПИГМЕНТОВ
МЕТОДОМ БИК-СПЕКТРОСКОПИИ И ХЕМОМЕТРИКИ**

Бойченко Е.С.¹, Андреев И.И.^{1,2}, Хайдукова М.М.^{3,4}, Сирро С.В.², Кирсанов Д.О.⁴

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Государственный Русский музей, Санкт-Петербург, Россия

³ФГУП «НИИ гигиены, профпатологии и экологии человека ФМБА России», Санкт-Петербург, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет

ekaterina.boichenko@inbox.ru

Представлены результаты применения ближней инфракрасной спектроскопии (БИК) в сочетании с машинным обучением для неразрушающего анализа ультрамариновых пигментов. Метод позволяет классифицировать природные и синтетические красители, а также определять тип связующего.

Ключевые слова: ультрамарин, БИК-спектроскопия, машинное обучение.

Ультрамарин — ярко-синий пигмент с общей химической формулой $\text{Na}_{8-x}[\text{SiAlO}_4]_6^*[\text{S}_2, \text{S}_3, \text{SO}_4, \text{Cl}]$, применяемый в изобразительном искусстве с VI века. Натуральный пигмент, добываемый из природных минералов, был доступен лишь признанным мастерам живописи из-за его высокой стоимости. Промышленное производство синтетического ультрамарина, начавшееся в 1830-е годы, сделало использование этого пигмента более массовым. Поэтому определение происхождения ультрамарина позволяет выявлять поздние недокументированные реставрации и, что особенно важно, обнаруживать подделки, выполненные с использованием анахроничных красителей. Существующие методы анализа ультрамариновых пигментов — рентгенофазовый анализ [1], поляризационная микроскопия или ИК-спектроскопия в средней области — предполагают взятие небольших проб красок с поверхности живописи.

Безусловно, использование неразрушающих методов анализа более предпочтительно из-за уникальности и ценности исследуемых объектов искусства. Таким методом является, например, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, но ее применение ограничено определением элементного состава образца, при этом чувствительности метода недостаточно для классификации природных и синтетических красителей, поскольку различия в их составе незначительны [2].

Ближняя инфракрасная спектроскопия (БИК) в сочетании с алгоритмами машинного обучения представляет собой перспективный подход, позволяющий использовать оптоволоконные выносные зонды для неразрушающего анализа без этапа пробоподготовки. Таким образом, объекты искусства могут быть изучены *in situ*, без необходимости перемещения в лабораторию. Этот неdestructивный и экспрессный метод уже показал хорошие результаты для схожих аналитических задач: например, для выявления контрафактной продукции [3].

В данном исследовании представлены результаты классификации различных ультрамариновых пигментов на основе их БИК-спектров, измеренных для 14 образцов (9 природных и 5 синтетических). Для каждого образца пигмента, смешанного с одним из классических связующих (яичная эмульсия, желток и льняное масло), измерялись по три спектра в разных точках выкраски. Измерения БИК-спектров в диапазоне 939–1799 нм проводились с помощью оптоволоконного зонда диаметром 1,8 мм (НТЦ волоконно-оптических устройств, Россия), подключенного к портативному БИК-спектрометру (Avantes, Нидерланды). Предложенная методика была апробирована на нескольких реальных объектах искусства разных эпох (фрески, икона, живопись на холсте). Результаты многомерного анализа спектральных данных подтверждают, что данный подход позволяет классифицировать краски как по типу связующего, так и по происхождению ультрамаринового пигмента.

[1] Wang H. et al., *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, №10, 10910-10924, (2020).

[2] Bacci M., Cucci C., Del Federico E., Ienco A., Jerschow A., Newman J.M., Picollo M., *Vib. Spec.*, **49**(1), 80-83, (2009).

[3] Rodionova O.Y., Titova A.V., Demkin N.A., Balyklova K.S., Pomerantsev A.L., *Talanta*, **195**, 662-667, (2019).

**АЭРОЗОЛЬНАЯ ПЕЧАТЬ НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА
ДЛЯ ПОСЛОЙНОГО АНАЛИЗА КРАСОЧНЫХ СЛОЕВ МЕТОДОМ
РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Лизунова А.А., Корнюшин Д.В., Федоткина А.П., Надточенко В.А.

Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, Россия

lizunova.aa@mipt.ru

Предложен неразрушающий метод локального нанесения наночастиц серебра, синтезированных в газовом разряде, для послойного анализа произведений живописи методом гигантского комбинационного рассеяния света.

Ключевые слова: SERS, аэрозольная печать, наночастицы серебра.

Эффект гигантского комбинационного рассеяния или SERS (Surface-enhanced Raman spectroscopy) в последнее десятилетие все чаще используется для идентификации органических и неорганических красителей в произведениях искусства. Вблизи поверхности атомно-шероховатых металлических плазмонных наночастиц, SERS дает сильный и четко разрешенный спектр связующих и пигментов, что позволяет легко проводить их идентификацию в красочных слоях [1] и дать ответы на многочисленные вопросы искусствоведов, связанные, как с атрибуцией и датировкой произведений, так и с реставрацией сложных по составу и строению живописных систем. Обычно SERS требует отбора проб с произведений искусства, что создает ряд ограничений в применении метода. Поэтому разработка неразрушающих и высокочувствительных методов послойной идентификации красочных слоев непосредственно на произведениях живописи без отбора проб является ключевой задачей для сохранения культурного наследия страны. В МФТИ разработан метод аэрозольной печати для формирования структур из частиц различных материалов на твердых и гибких подложках [2], позволяющий прецизионно наносить наночастицы благородных металлов, синтезированных в газовом разряде.

Задачей данной работы является разработка методов осаждения частиц на поверхность красочных слоев со слабой адгезией к поверхности краски, исследование влияния поверхностной плотности и размера наночастиц серебра на SERS сигнал, а также выработка критерия послойной идентификации нижних слоев в модельной двухслойной красочной структуре.

На рисунке представлена фотография плазмонных структур на основе частиц серебра со средним размером 65 нм в виде 5 линий с различной плотностью частиц, напечатанных на поверхности красочной структуры с верхним коричневым слоем и нижним слоем из цинковых белил. Толщина серебряных линий варьировалась от 0,2 до 0,8 мкм. Исследованы SERS спектры от толщины красочных слоев и плазмонных линий. Оптимизированы параметры печати линий для идентификации пигментов в двухслойных красочных слоях.

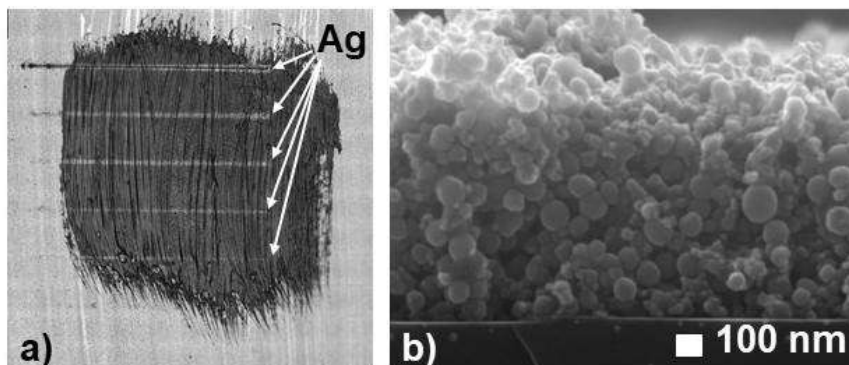


Рисунок. Плазмонные структуры из наночастиц серебра на поверхности красочных слоев:

- (а) фото линий из наночастиц серебра с различной поверхностной плотностью,
(б) РЭМ изображение скола структуры

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-78-20011, <https://rscf.ru/project/25-78-20011/>.

[1] Shabunya-Klyachkovskaya E.V., Kulakov O.S., Gaponenko S.V., *Spectrochim Acta - Part A Mol Biomol Spectrosc*, **222**, 117235, (2019).

[2] Ivanov V., Lizunova A., Rodionova O. et.al., *Nanomaterials*, **12**(3), 448, (2022).

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПИГМЕНТОВ ВО
ФРАГМЕНТАХ ДРЕВНЕРУССКОЙ ФРЕСКОВОЙ ЖИВОПИСИ ХРАМОВ
ВЕЛИКОГО НОВГОРОДА МЕТОДОМ МИКРОСПЕКТРОСКОПИИ
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

**Кочетков М.И.¹, Кононова Е.М.², Анисимова Т.И.², Брандт Н.Н.¹,
Балахнина И.А.¹, Чикишев А.Ю.¹**

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²Центр реставрации монументальной живописи, Новгородский государственный
объединённый музей-заповедник, Великий Новгород, Россия
kochetkovmi@my.msu.ru

В работе с помощью КР микроспектроскопии исследуется пигментный состав 95 фрагментов
настенной живописи из шести церквей Великого Новгорода XII–XIV века.

Ключевые слова: КР спектроскопия, пигмент, настенная живопись.

Древняя фресковая живопись хорошо сохраняется до наших дней. Это обусловлено тем, что пигмент наносится на влажную известковую штукатурку до её высыхания. Процесс высыхания штукатурки связан с взаимодействием гашеной извести (гидроксид кальция) с углекислым газом из воздуха, что приводит к карбонизации извести с образованием кальцита, который является основным компонентом фрески. При этом красочный слой встраивается в поверхность стены и остается устойчив к различным воздействиям времени и окружающей среды.

Великий Новгород – один из центров древнерусского монументального зодчества XI–XV веков. Настенная живопись древненовгородских храмов представляет большой интерес для археологов, реставраторов и историков. Целью работы являлась идентификация пигментов, использованных в фресковой живописи пяти разных церквей XII–XIV веков, и сравнение палитр их пигментов между собой.

Измерения КР спектров проводилось с помощью конфокального микроспектрометра DXR Raman Microspectrometer с длинами волн возбуждения 720, 535, 633 нм с объективом LMPlanFL N 50x. Мощность излучения составляла от 1 мВт до 24 мВт, размер лазерного пятна на образце составлял 2 мкм, время накопления одного спектра варьировалось от 2 до 30 минут. Всего было исследовано 95 фрагментов разного цвета из 6 наборов фрагментов настенной живописи из пяти церквей. Фрагменты представляли собой куски штукатурки, средней толщиной 15 мм, площадью от 3 см² до 70 см², каждый из которых был покрыт красочным слоем с одной стороны. Поверхность неоднородная, поэтому для каждого фрагмента измерение проводилось как минимум в 8 точках. После измерения спектры группировались по сходным линиям и соотносились со спектрами из базы данных RRUFF [1] и литературы.

В результате исследования был определен следующий набор веществ/пигментов общих для всех четырёх церквей: гематит, гётит, киноварь, уголь, анатаз, кварц и кальцит. Графит был обнаружен только в образцах XII века. В качестве зелёного цвета в основном использовалась зелёная земля, кроме одного образца из церкви на Волотовом Поле, где были обнаружены следы малахита. Особенностью фрагмента из церкви Благовещения на Городище XII века [2] стал свинцовый сурик, отсутствующий в остальных образцах. Были идентифицированы два разных пигмента синего цвета – лазурит и азурит. Азурит присутствует лишь во фрагментах XIV века, что соответствует данным литературы [3]. Обнаружение во фрагментах церкви Спаса на Ковалёве небольшого количества лепидокрокита может указывать на особое происхождение использованной в росписи желтой охры. Спектры визуально чёрного гематита отличаются от спектров визуально красного гематита интенсивностью линий в диапазоне 200–450 см⁻¹. В КР спектрах “зелёной земли” (саладонита) обнаружено больше сходства между спектрами, измеренными в одном и том же фрагменте, чем между спектрами из разных комплектов фрагментов. В диапазоне от 100–200 см⁻¹ (колебания октаэдрического слоя саладонита [4]) линия на 175 см⁻¹ характерна для фрагментов XIV века.

[1] База данных спектров комбинационного рассеяния RRUFF: [Электронный ресурс]. URL: <https://rruff.info> (дата обращения: 22.06.2025).

[2] Balakhnina I., Anisimova T., Mankova A., Chikishev A., Brandt N., *Eur. Phys. J. Plus*, **136**, №6, 610, (2021).

[3] Гренберг Ю.И., Наука служит искусству. Технологические исследования произведений живописи. Статьи разных лет., Москва, 384с, (2018).

[4] Ospitali F., Bersani D., Lonardo G. Di, Lottici P.P., *J. Raman Spect.*, **39**, 1066-1073, (2008).

БИОФОТОНИКА

ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КРОВИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОНКОЛОГИИ

Черкасова О.П.^{1,2}

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

o.p.cherkasova@gmail.com

Ранняя диагностика онкологических заболеваний имеет большое значение для своевременной терапии и улучшает прогноз выздоровления. В докладе будут обсуждены возможности методов оптической спектроскопии крови в диагностике и контроле лечения разных типов онкологии.

Ключевые слова: спектроскопия крови, онкология.

Онкологические заболевания занимают второе место среди причин смертности населения России и относятся к социально значимым. В 2020 году показатель активного выявления злокачественных образований в России составил чуть более 24%, что свидетельствует о низкой эффективности используемых на практике методов и средств диагностики злокачественных опухолей [1]. Основная проблема заключается в поздней постановке диагноза, когда прогноз излечения неблагоприятен [2]. Актуальным является выявление злокачественной опухоли на раннем этапе. Однако применяемые в настоящее время методы диагностики не могут распознать болезнь на ранних стадиях [3]. Традиционные методы визуализации не неэффективны при малом размере опухоли и не могут быть использованы в скрининговых исследованиях [4]. Вместе с тем, при возникновении и развитии злокачественной опухоли, значительно изменяется молекулярный состав жидкостей организма, в том числе сыворотки и плазмы крови [5]. Методы оптической спектроскопии просты в реализации, требуют небольшого объема образца и имеют большой потенциал в ранней диагностике [6].

В докладе будет проведен сравнительный анализ особенностей и возможностей инфракрасной (ИК) [6], терагерцовой (ТГц) [7-10], флуоресцентной спектроскопии [11] и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) [12] в диагностике онкологии по анализу сыворотки или плазмы крови. Применение методов машинного обучения к анализу спектральных данных позволяет получить показатели чувствительности, специфичности и точности более 90% [12-14]. Показано, что в экспериментах на животных регистрируемые изменения в ТГц и КРС спектрах сыворотки крови наблюдаются уже при размере опухоли (глиобластомы) менее, чем 0,09 см³, что значительно ниже, чем при использовании ИК спектроскопии [15].

Исследование выполнено частично при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИАиЭ СО РАН (FWNG-2024-0025) и НИЦ «Курчатовский институт» (в части ТГц спектроскопии).

- [1] Здравоохранение в России. 2021: Стат.сб./Росстат. М., 171 с., (2021).
- [2] Ferlay J., Colombet M., Soerjomataram I. et al., *Int. J. Cancer*, **149**(4), 778-789, (2021).
- [3] Cherkasova O., Peng Y., Konnikova M., et al., *Photonics*, **8**(1), 22, (2021).
- [4] Carrete L.R., Young J.S., Cha S., *Front. Neurosci.*, **16**, 787755, (2022).
- [5] Lone S.N., Nisar S., Masoodi T. et al., *Mol. Cancer*, **21**, 79, (2022).
- [6] Cameron J.M., Sala A., Antoniou G. et al., *British Journal of Cancer*, **129**, 1658-1666, (2023).
- [7] Cherkasova O. et al, *Appl. Sci.*, **13**, 5434, (2023).
- [8] Cherkasova O.P. et al., *JBPE*, **9**(3), 030308, (2023).
- [9] Konnikova M.R. et al., *Biomed. Opt. Express*, **12**(2), 1020-1035, (2021).
- [10] Nazarov M.M. et al., *Optics and Spectroscopy*, **126**(6), 721-729, (2019).
- [11] Нургалиева П.К., Черкасова О.П., Якимов Б.П. и др., *Оптика и спектроскопия*, **133**(5), (2025).
- [12] Vrazhnov D., Mankova A., Stupak E. et al., *Pharmaceutics*, **15**, 203, (2023).
- [13] Vrazhnov D. et al., *Appl. Sci.*, **12**, 10533, (2022).
- [14] Vrazhnov D. et al., *Appl. Sci.*, **14**, 2872, (2024).
- [15] Theakstone A.G., Brennan P.M., Jenkinson M.D. et al., *Cancers*, **13**, 3851, (2021).

**МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЕ НОСИМЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ
МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО-ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА:
МЕДИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ
В ДИАГНОСТИКЕ**

Дунаев А.В., Жарких Е.В., Локтионова Ю.И., Янушин В.С., Сидоров В.В.

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Россия

²ООО НПП «ЛАЗМА», Москва, Россия

dunaev@bmecenter.ru

В работе приведены обоснованные медико-технические требования к мультимодальным носимым анализаторам, а также примеры их успешного применения при анализе состояния микроциркуляторно-тканевых систем при решении различных диагностических задач.

Ключевые слова: носимые анализаторы, медико-технические требования, микроциркуляторно-тканевые системы.

В последнее десятилетие исследователи во всём мире всё больше фокусируются на изучении функционирования микроциркуляторно-тканевых систем (МТС) организма человека из-за их вовлеченности во многих жизненно важных процессах организма человека, а значит возможности обнаружения на более ранних стадиях различных патологических состояний. Одними из основных методов изучения МТС являются лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) и флуоресцентная спектроскопия (ФС). Однако ряд факторов препятствует более широкому внедрению данных технологий в клинику, основными из которых являются размеры оборудования и использование оптических волокон, что повышает их чувствительность к артефактам движения [1]. Решением данной проблемы является миниатюризация устройств диагностики в виде создания анализаторов МТС в носимом варианте. Одной из первых отечественных разработок подобных устройств являются устройства «ЛАЗМА ПФ» (ООО «ЛАЗМА», Россия), позволяющие изучать микроциркуляторное русло и окислительный метаболизм биологических тканей. Целью данной работы является демонстрация конструктивных особенностей мультимодальных носимых анализаторов с обоснованием предъявляемых к ним медико-технических требований (МТТ) и примеров их успешного применения в различных диагностических задачах.

Разработаны специализированные МТТ к мультимодальным носимым анализаторам, а именно обоснованы следующие параметры для ЛДФ-канала: длина волны источника – 850 нм, диаметр источника излучения – 35 мкм, диаметр приёмника излучения – 500 мкм, расстояние источник-приёмник (база измерения) – 1200 мкм. При данных МТТ параметры диагностируемой биоткани для нормального кровенаполнения биоткани и кожи европеоида могут достигать: глубина зондирования > 2 мм (глубокое сосудистое сплетение), диагностический объем > 6 мм³. Обоснованные МТТ для ФС-канала: длина волны источника возбуждения флуоресценции НАДН (в диапазоне 450-460 нм) – 365 нм, расстояние источник-приёмник (база измерения) – 2000 мкм. Конструктивные особенности анализаторов позволяют регистрировать показатель микроциркуляции крови (перфузию) и интенсивность флуоресценции НАДН с меньшей чувствительностью к артефактам движения, большим диагностическим объемом и примерно одинаковой вариабельностью результатов измерений по сравнению со стационарными приборами [2, 3].

Продемонстрированы примеры успешного применения данных анализаторов в виде распределённой системы (из 2 или 4 приборов), закрепляемой на верхних и нижних конечностях пациента, в различных областях медицины – эндокринологии [4], кардиологии (артериальная гипертензия), реабилитации (длительный ковид), физиотерапии (дыхательные упражнения хатха-йоги, интервальные гипоксические тренировки), спортивной и космической [5] медицине.

Таким образом, данные о состоянии МТС, полученные с помощью мультимодальных носимых анализаторов, позволяют более комплексно и достоверно оценить взаимосвязь и динамику потребления кислорода тканями, а сами анализаторы являются информативными приборами при решении различных диагностических задач.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации № 075-15-2025-011.

[1] Дунаев А.В., Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека: монография / А. В. Дунаев. - Старый Оскол: ТНТ, 2022. - 440 с.

[2] Dunaev A., *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*, **9**, №2, 1-10, (2023).

[3] Loktionova Yu.I., Zharkikh E.V., Parshakova V.E., Sidorov V.V., Dunaev A.V., *J. Biophotonics*, **18**, №6, e202400527, (2025).

[4] Жарких Е.В., Дунаев А.В., *Медицинская техника*, **343**, №1, 1-4, (2024).

[5] Дунаев А.В., Локтионова Ю.И., Жарких Е.В., Федорович А.А., Сидоров В.В., Васин А.В., Дубинин В.И., *Авиакосмическая и экологическая медицина*, **58**, №1, (2024).

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОЛНОЙ СВЕТОКУЛЬТУРЫ РАСТЕНИЙ

Тихомиров А.А.

ФИЦ КНЦ СО РАН Институт биофизики, г. Красноярск, Россия

alex-tikhomirov@yandex.ru

Рассматриваются концептуальные подходы к выбору спектра излучения для светокультуры. Анализируются преимущества и недостатки подходов, связанных с «белым светом», кривой спектра действия фотосинтеза листа и видоспецифичности реакций растений на спектр излучения.

Ключевые слова: спектр излучения, светокультура.

Анализируются современные подходы к выбору спектральной эффективности излучения для условий полной светокультуры растений. В основе анализа рассмотрены три основных подхода для выбора спектрального состава фотосинтетически активной радиации (ФАР) [1]. Первая концепция основана на наибольшей эффективности спектра излучения естественного («белого») света. Вторая концепция предполагает взятие за основу наиболее эффективного спектра излучения кривой спектра действия фотосинтеза зеленого листа. Третья концепция предполагает наличие видовой специфики реакции растений к спектру излучения, ввиду чего растения могут быть классифицированы на несколько групп по выбору наиболее эффективного спектра излучения. Анализируются преимущества и недостатки каждого из рассматриваемых подходов. На основании изложенного предлагаются физиологически обоснованные подходы к созданию растениеводческих ламп для современной тепличной индустрии. Отмечается некорректность использования рассматриваемого анализа для условий культивирования растений в тепличных условиях, когда используется досветка естественным светом. Отмечаются преимущества применения полной светокультуры для северных территорий и в условиях культивирования растений на многостеллажных установках.

[1] Tikhomirov A.A., Ushakova S.A., Shikhov V.N., Shklavtsova E.S., *Light & Engineering*. 27, Special Issue, 24-30, (2019).

**ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ
АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛИТОТРИПСИИ**

Корнева Н.В.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

nadezlobina@yandex.ru

Разработан алгоритм, позволяющий по спектрам отражения определять тип ткани (камень или мягкая ткань) перед оптоволоком во время проведения лазерной литотрипсии.

Ключевые слова: спектроскопия диффузного отражения, лазерная литотрипсия, мочекаменная болезнь.

Заболеваемость мочекаменной болезнью за последние 30 лет во всем мире возросла почти на 50% [1]. Эффективными методами ее лечения является операция по литотрипсии, которая может проводиться дистанционно либо трансуретрально с помощью эндоскопа. По данным последних эпидемиологических исследований, за последние 10 лет распространенность эндоскопических вмешательств при лечении мочекаменной болезни выросла более чем в 2 раза, постепенно вытесняя дистанционную литотрипсию [2].

Основным источником энергии, используемым при выполнении трансуретральной литотрипсии является лазерная энергия. Тем не менее, при лазерном дроблении возможен уход камня из области облучения, доступной рабочему волокну, из-за чего возникает вероятность повреждения слизистой оболочки [3]. Такие ситуации могут вызывать осложнения, например, в виде гематурии, стриктуры мочеточника [4].

Таким образом, актуальной задачей является разработка метода, позволяющего автоматически определять тип ткани перед волоком непосредственно во время лазерной литотрипсии. С помощью данного подхода можно будет автоматически отключать лазер при наведении волокна на мягкую ткань, тем самым предотвращая повреждение ткани. Для данной цели можно использовать оптические методы, которые могут быть совмещены с волоконным зондом. Данные методы в дальнейшем могут быть интегрированы в лазерный аппарат для предоставления хирургу необходимой обратной связи, что поспособствует повышению безопасности и эффективности процедур по удалению камней.

В данной работе была разработана система, основанная на методе спектроскопии диффузного отражения. Были проведены *in vivo* эксперименты, в которых производился сбор спектров диффузного отражения во время лазерной литотрипсии. На основе собранного массива данных были разработаны классификационные модели для детекции мягких тканей и конкрементов, а также оценена их эффективность в условиях, максимально приближенных к клинической практике. Разработанная система продемонстрировала высокую диагностическую эффективность: чувствительность в идентификации мягких тканей составила 93%, а специфичность в обнаружении камней — 93%. Такое различие в реальном времени позволяет минимизировать непреднамеренное воздействие лазера на окружающие ткани.

Разработанная система оптического наведения для хирургии, обеспечивая обратную связь в реальном времени, повысит безопасность и точность лазерной литотрипсии, снижая риск непреднамеренного повреждения тканей. Данная технология позволит улучшить результаты малоинвазивных урологических лазерных процедур.

[1] Qian X., Wan J., Xu J., et al., *Int. J. Clin. Pract.*, **2022**, 6807203, (2022).

[2] Kaplan-Marans E., Jivanji D., Vazquez-Rivera K., et al., *Urology*, **174**, 48-51, (2023).

[3] Wilson C.R., Hardy L.A., Irby P.B., Fried N.M., *Lasers Surg. Med.*, **47**, 403-410, (2015).

[4] Zheng J., Wang Y., Chen B., et al., *Videosurgery Other Miniinvasive Tech.*, **15**, 185-191, (2020).

ОПТИЧЕСКОЕ ПРОСВЕТЛЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ В ЦЕЛЯХ ДИАГНОСТИКИ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Тимошина П.А.^{1,2}, Лазарева Е.Н.^{1,2}, Сурков Ю.И.^{1,2}, Тучин В.В.^{1,2,3,4}

¹Институт физики, СГУ имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия,

²Научный медицинский центр, СГУ имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

³ТГУ, г. Томск, Россия

⁴ИПТМУ РАН, г. Саратов, Россия

timoshina2906@mail.ru

В настоящем исследовании изучалась возможность дифференциации тканей здоровых крыс от тканей крыс с диабетом на основе характера динамических и структурных изменений, которые происходят при местном применении оптических просветляющих агентов.

Ключевые слова: оптическое просветление, спекл-визуализация, томография.

Достижения в области совершенствования существующих неинвазивных оптических методов диагностики и разработки новых критериев оценки влияния различных патологий на тканевую и сосудистую системы крайне востребованы [1-3]. В настоящем исследовании рассматривалась возможность использования характера воздействия и диффузионных свойств различных биологически совместимых просветляющих агентов в нормальных и патологических тканях с использованием комбинации диагностических методов, включая лазерную спекл-визуализацию [4] и оптическую когерентную томографию (ОКТ) [5], в качестве маркера развития патологических процессов в биологических тканях.

В настоящем исследовании изучалась возможность дифференциации тканей здоровых крыс от тканей крыс с диабетом на основе характера динамических и структурных изменений, которые происходят при местном применении оптических просветляющих агентов (рисунок).

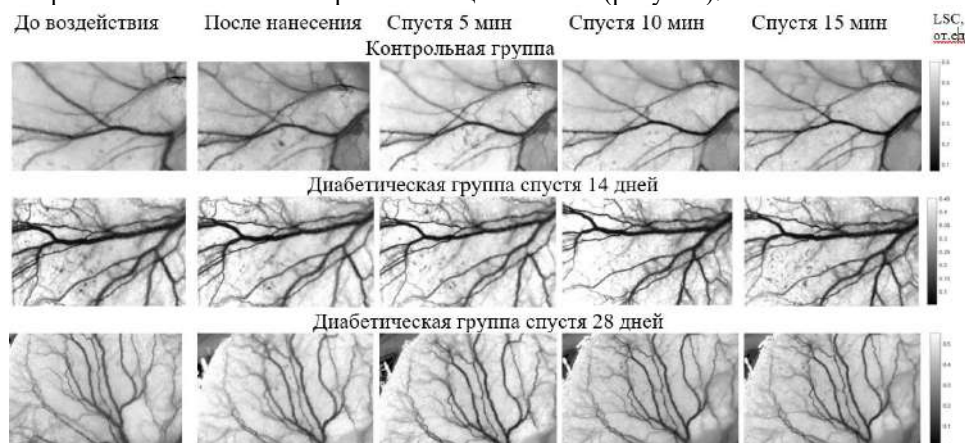


Рисунок. Обработанные спекл-контрастные изображения сосудов исследуемой области уха лабораторных крыс до воздействия и после нанесения на исследуемую область ПЭГ-300 в течение 15 минут

Проведенные исследования поддержаны грантом Российского Научного Фонда № 23-14-00287.

[1] Oliveira L.R., Pinheiro M.R., Tuchina D.K., Timoshina P.A., Carvalho M.I., Oliveira L.M., *Adv Drug Deliv Rev.*, **212**, 115420, (2024).

[2] Zhu J., Li D., Yu T., Zhu D., *J. Innov. Opt. Health Sci.*, **15**, 2230002, (2022).

[3] Dyachenko P.A., Abdurashitov A.S., Semyachkina-Glushkovskaya O.V., Tuchin V.V., *Handbook of Tissue Optical Clearing: New Prospects in Optical Imaging*, 393-407, (2022).

[4] Surkov Y., Timoshina P., Serebryakova I., et al., *Front Optoelectron*, **18**, №1, 1, (2025).

[5] Liu J., Ding N., Yu Y., et al., *J Biomed Opt.*, **24**, №3, 1-11, (2019).

**СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛЕТОК КРОВИ И ЭНДОТЕЛИЯ СОСУДОВ:
ИЗМЕРЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ПИНЦЕТА**

Приезжев А.В., Максимов М.К., Ермолинский П.Б., Луговцов А.Е.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

avp@biomedphotonics.ru

Обсуждаются устройство и возможности использования лазерных пинцетов для исследования взаимодействия клеток крови и эндотелия сосудов в микрофлюидных каналах, моделирующих кровеносные сосуды. Измеряются силы взаимодействия от долей до единиц пиконьютонов.

Ключевые слова: лазерный пинцет, клетки крови, клетки эндотелия.

Микроциркуляция крови во многом определяется параметрами микрореологии её эритроцитов, в частности – их деформируемостью и способностью к агрегации. Микроциркуляция существенно связана с вязкостью крови, которая кроме эритроцитов определяется также тромбоцитами и эндотелиоцитами - клетками, покрывающими сосуды изнутри. Изменения параметров этих клеток при заболеваниях приводят к ухудшению насыщения тканей кислородом, усилению тромбообразования и ряду других отрицательных последствий. В частности, может усиливаться адгезия эритроцитов к клеткам эндотелия, а также агрегация собственно эритроцитов, т. е. их адгезия друг к другу. Взаимодействие клеток не ограничивается непосредственным механическим контактом между ними. Оно также включает в себя межклеточную сигнализацию, т. е. передачу сигналов посредством молекул газотрансмиттеров таких, как оксид азота, сульфид водорода, оксид углерода [1]. При этом эндотелиоциты и эритроциты являются основными источниками газотрансмиттеров в сосудах. Установлено, что оксид азота играет наибольшую роль в нормализации деформируемости эритроцитов и снижении их способности к агрегации.

Лазерный пинцет позволяет с помощью остро сфокусированного пучка лазера захватывать живые клетки без механического контакта и манипулировать ими *in vitro*. Он также позволяет измерять неинвазивно силы межклеточного взаимодействия. В настоящей работе мы использовали двухканальный лазерный пинцет на основе неодимового лазера с длиной волны 1064 нм, лежащей в окне прозрачности исследуемых клеток, что препятствует их нагреванию и разрушению. Измерялись силы обратимой агрегации и дезагрегации пар одиночных эритроцитов, а также силы взаимодействия одного эритроцита и монослоя эндотелиальных клеток (и то, и другое в аутологичной плазме). Диапазон измеряемых сил в зависимости от условий эксперимента составлял от долей до единиц пиконьютонов.

Полученные нами результаты свидетельствуют о том, что в присутствии эндотелия, предварительно проинкубированного с субстратом фермента синтазы оксида азота, присутствующего в эндотелии - L-Аргинина, силы агрегации и дезагрегации эритроцитов снижаются. Действительно, добавление этого вещества к эндотелию стимулирует увеличение выработки оксида азота и, как следствие, снижение агрегации эритроцитов. Этот вывод подтверждается фактом исчезновения эффекта после предварительной инкубации эндотелия с ингибитором этого фермента под названием L-NAME. Величина эффекта зависит от концентрации L-Аргинина, причем эта зависимость имеет форму колокола: сила агрегации максимально снижается при концентрации 100 мкМ. Дальнейший рост концентрации приводит к росту силы вплоть до возвращения значений к контрольному значению при 1000 мкМ. Такая зависимость имеет место по причине ингибирования синтазы оксида азота своим продуктом при высоких концентрациях. В нативных (физиологических) условиях это обстоятельство предотвращает токсический эффект этого газотрансмиттера при его высоких концентрациях. Наши результаты также показали, что силы взаимодействия между одиночным эритроцитом и эндотелием, т. е. монослоем эндотелиальных клеток, монотонно возрастают с повышением концентрации фибриногена в окружающей среде. При этом они сопоставимы по величине с силами взаимодействия между отдельными эритроцитами.

Исследование поддержано грантом РФФИ № 25-15-00172.

[1] Maksimov M.K., Ermolinskiy P.B., Scheglovitova O.N., Sklyankina N.N., Muravyov A.V., Lugovtsov A.E., and Priezzhev A.V., *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 17, №5, 2440001, (2024).

**ДВУХВОЛНОВОЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ ИМИДЖИНГ
В ЗАДАЧАХ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ**

**Кириллин М.Ю.¹, Шахова М.А.^{1,2}, Фокеев В.А.^{1,2}, Куракина Д.А.¹,
Пшеницына Д.С.³, Савельев А.С.^{1,3}, Миронычева А.М.^{1,2}, Гамаюнов С.В.^{1,4},
Турчин И.В.¹, Сергеева Е.А.¹**

¹ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия

²ПИМУ, Нижний Новгород, Россия

³ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

⁴НОКОД, Нижний Новгород, Россия

mkirillin@ipfran.ru

Флуоресцентный имиджинг является неинвазивным инструментом для мониторинга распределения и выгорания фотосенсибилизатора при проведении процедур фотодинамической терапии.

Ключевые слова: флуоресцентный имиджинг, фотодинамическая терапия, фотосенсибилизаторы хлоринового ряда.

Фотодинамическая терапия (ФДТ) представляет собой метод лечения различных патологий, основанный на локальной генерации синглетного кислорода с помощью фотоактивации фотосенсибилизатора (ФС). В зависимости от конкретного клинического приложения введение ФС осуществляется либо внутривенно, либо местно. Внутривенное введение обычно используется в онкологии, тогда как местное применение используется при лечении хронических воспалительных процессов и грибковых заболеваний. Флуоресцентные свойства фотосенсибилизаторов, используемых в клинической практике, обеспечивают возможности для неинвазивного контроля проведения процедуры ФДТ. В частности, флуоресцентный имиджинг позволяет картировать распределение ФС внутри биоткани, что особенно актуально при внутривенном введении, когда перед процедурой необходимо убедиться в накоплении ФС в целевой области. Другим важным индикатором для оценки эффективности процедуры ФДТ является фотовыгорание, представляющее собой затухание сигнала из целевой области в процессе проведения процедуры ФДТ.

Одним из наиболее распространенных классов ФС в клинической практике в Российской Федерации являются ФС хлоринового ряда. Их особенностью является наличие двух ярко выраженных пиков поглощения (и возбуждения флуоресценции) в синей (402 нм) и красной (662 нм) областях видимого спектра. Поскольку оптические свойства большинства биотканей, обусловленные спектрами поглощения крови и меланина, существенно отличаются в этих диапазонах, глубина проникновения излучения этих диапазонов в биоткань существенно различается. Это дает возможность разрабатывать протоколы ФДТ с использованием двух длин волн из этих диапазонов, сочетая поверхностное и более глубокое воздействие [1-3]. Эта особенность может быть также использована при разработке подходов к протоколам сопровождения ФДТ с помощью флуоресцентного имиджинга. Реализация двухволнового флуоресцентного имиджинга (ДВФИ) позволяет получать сопряженные флуоресцентные изображения на двух длинах волн возбуждения (405 и 660 нм), несущих информацию о приповерхностной флуоресценции (405 нм) и флуоресценции с более глубоких слоев (660 нм). Одновременное получение таких изображений может дать дополнительную информацию о глубине локализации флуорофора [3, 4].

В настоящей работе представлены результаты использования ДВФИ при мониторинге ФДТ рака кожи в клинике. Получены типичные флуоресцентные траектории процедуры ФДТ и периода наблюдения до двух суток после проведения процедуры. Отмечены характерные особенности, связанные с фотовыгоранием и увеличением сигнала флуоресценции после процедуры, связанные предположительно с временной активацией локальной микроциркуляции. Также приводятся результаты пилотных исследований по применению ДВФИ в ЛОР-практике при лечении хронических фарингитов с помощью ФДТ. В этом случае ДВФИ позволяет контролировать доставку ФС к задней стенке гортани.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-15-00175, <https://rscf.ru/project/24-15-00175>.

- [1] Kurakina D., Khilov A., Shakhova M., Orlinskaya N., Sergeeva E., Meller A., Turchin I., and Kirillin M., *Journal of Biomedical Optics*, **25**, 063804, (2019).
- [2] Kirillin M., Kurakina D., Khilov A., Orlova A., Shakhova M., Orlinskaya N., and Sergeeva E., *Biomed. Opt. Express*, **12**(2), 872-892, (2021).
- [3] Kurakina D., Sergeeva E., Khilov A., Kirillin M., *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*, **10**, 040318, (2024).
- [4] Kirillin M., Khilov A., Kurakina D., Orlova A., Perekatova V., Shishkova V., Malygina A., Mironycheva A., Shlivko I., Gamayunov S., Turchin I., Sergeeva E., *Cancers*, **13**, 5807, (2021).

**МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ
МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО-ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА
КОСМОНАВТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ МОДЕЛИРУЕМЫХ
ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА**

**Локтионова Ю.И.¹, Жарких Е.В.¹, Янушин В.С.¹, Сидоров В.В.²,
Луцевич Д.Н.³, Киреев К.С.^{1,3}, Дунаев А.В.¹**

¹ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия

²ООО НПП «ЛАЗМА», Москва, Россия

³ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», Звёздный городок, Россия

julya-loktionova@mail.ru

В работе показана возможность оценки состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма космонавтов при воздействии отдельных моделируемых факторов космического полета с помощью распределённой системы портативных мультимодальных анализаторов периферического кровотока и окислительного метаболизма биотканей.

Ключевые слова: микроциркуляторно-тканевые системы, факторы космического полета, носимые анализаторы.

Факторы космического полета (ФКП) оказывают комплексное влияние на организм человека и систему кровообращения, а именно на ее конечное звено – микроциркуляторно-тканевую систему (МТС), которая обеспечивает трофику тканей и запуск каскада адаптационных реакций. В связи с чем оценка периферического кровотока и окислительного метаболизма биотканей при воздействии моделируемых ФКП во время подготовки космонавтов является перспективным направлением для индивидуализации тренировочного процесса и повышения его безопасности, что и явилось целью данной работы.

Для неинвазивной оценки состояния МТС наиболее широкое распространение получили оптические методы диагностики, а именно лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) и флуоресцентная спектроскопия (ФС) [1]. Оба метода одновременно реализованы в носимых мультимодальных устройствах с беспроводной передачей данных «ЛАЗМА ПФ» (ООО НПП «ЛАЗМА»). Благодаря дополнительному каналу термометрии и встроенному акселерометру анализаторы позволяют отслеживать влияние артефактов движений и изменения температуры. Возможность объединения нескольких устройств в распределённую систему позволяет выполнять регистрацию параметров МТС с учетом регионарных особенностей при высокой воспроизводимости регистрируемых данных [2].

Разработаны адаптированные для применения в процессе подготовки космонавтов протоколы регистрации параметров МТС при воздействии моделируемых ФКП – перегрузок, гипоксии, вестибулярных и ортостатических воздействий. Параметры МТС регистрировались в четырех точках: бассейнах надглазничных артерий (НГА) и внутренней поверхности голени при ортостатических воздействиях и перегрузках, а также в области бассейнов НГА, тыльной поверхности запястья и ладонной поверхности третьего пальца левой руки при вестибулярных воздействиях и гипоксии. Регистрация параметров МТС выполнялась в течение 8 минут до, после и во время воздействия ФКП. В исследовании приняли участие действующие космонавты Роскосмоса.

На рисунке продемонстрирован пример чувствительности методов ЛДФ и ФС во время вестибулярных воздействий (вращение вокруг своей оси с наклонами головы в положении сидя), а также регионарные особенности реакции МТС, отражающие адаптационное перераспределение кровотока и изменение метаболической активности (увеличение интенсивности метаболизма в коже пальца руки).

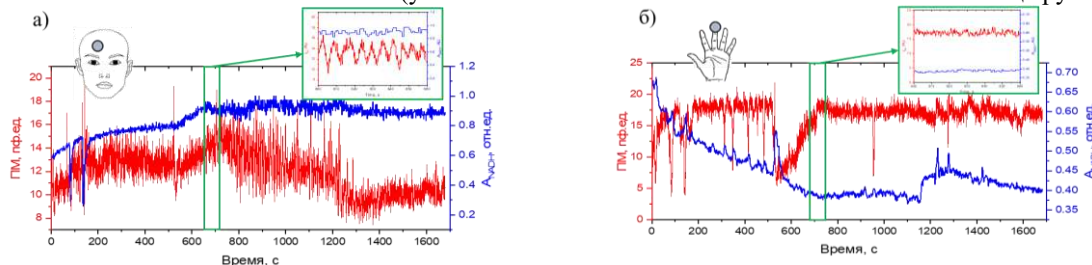


Рисунок. Пример параметров МТС при вестибулярных воздействиях в области лба (а) и пальца руки (б)

Регистрация параметров МТС во время воздействия отдельных моделируемых ФКП позволяет в режиме реального времени оценивать индивидуальную реакцию организма каждого космонавта, а также формировать персонализированное представление о его функциональных резервах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-25-00546).

[1] Дунаев А.В., *Старый Оскол: ТНТ*, **440**, (2022).

[2] Loktionova Yu.I., Zharkikh E.V., Parshakova V.E., Sidorov V.V., Dunaev A.V., *Journal of Biophotonics*, **18**, 1-19, (2025).

**ОСОБЕННОСТИ МИКРОГЕМОДИНАМИКИ КОЖИ У ПАЦИЕНТОВ
С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ НАРУШЕНИЙ УГЛЕВОДНОГО ОБМЕНА
И ХРОНИЧЕСКОЙ ИШЕМИЕЙ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ**

Красулина К.А., Глазков А.А., Глазкова П.А., Селиванова Д.С.,

Загаров С.С., Рогаткин Д.А., Ларьков Р.Н.

ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского, Москва, Россия

krasulinaka@gmail.com

Исследование показало прогрессирующее ухудшение кожной микрогемодинамики, оцененной методом некогерентной оптической флукуационной флоуметрии, при сочетании заболеваний артерий нижних конечностей и нарушений углеводного обмена, что важно для ранней диагностики сосудистых осложнений.

Ключевые слова: кожная микроциркуляция, заболевания артерий нижних конечностей, нарушения углеводного обмена.

Нарушения микрогемодинамики являются ключевым звеном патогенеза сердечно-сосудистых осложнений у пациентов с метаболическими расстройствами и заболеваниями артерий нижних конечностей (ЗАНК) [1]. Несмотря на активное изучение микроциркуляции при изолированных состояниях, коморбидные формы, включающие сочетание нарушений углеводного обмена и ишемии, остаются малоисследованными. Цель работы – выявить специфические особенности микрогемодинамики, ассоциированные с сахарным диабетом (СД) 2 типа и комбинацией нарушений углеводного обмена и ЗАНК.

В исследовании участвовали 118 человек, которые были поделены на 5 групп: 1) здоровые добровольцы (n=17); 2) СД 2 типа (n=19); 3) ЗАНК без нарушений углеводного обмена (n=27); 4) ЗАНК и нарушение гликемии натощак (n=25); 5) ЗАНК и СД 2 типа (n=27). Проводилась регистрация кожной микрогемодинамики методом некогерентной оптической флукуационной флоуметрии (НОФФ) в области тыла и подошвенной поверхности первого пальца стопы в состоянии покоя и во время проведения тепловой пробы путем нагрева до 42°C [2, 3]. Оценивались следующие параметры: 1) базовая перфузия в состоянии покоя на тыле (BP2) и пальце стопы (BP3); 2) максимальный уровень перфузии в ответ на стимул на обеих зонах измерения (LTH2 и LTH3); 3) медиана перфузии за первые 200 с от начала нагрева (LTH_2_200 и LTH_3_200); 4) абсолютный прирост перфузии – разница между LTH и BP (LTH2-BP2, LTH3-BP3); 5) относительный прирост перфузии, выраженный в процентах (LTH2-BP2%, LTH3-BP3%).

Наиболее выраженные различия выявлены в значении параметра LTH_3_200, который по сравнению со здоровыми добровольцами при СД снижался на 14,1%, при ЗАНК без нарушений углеводного обмена – на 67,7%, при ЗАНК и предиабете – на 77,2%, а при сочетании ЗАНК и СД – на 79,6%. Кроме того, наблюдалось уменьшение LTH3: в группе 1 он составил 19,85 (17,92; 23,8), в группе 2 – 16,87 (14,01; 21,83), в группе 3 – 6,42 (2,63; 12,01), в группе 4 – 4,38 (1,27; 12,07), в группе 5 – 4,21 (1,5; 6,35) перфузионных единиц (ПЕ) [p<0,001]. Аналогично, LTH3-BP3 в этой локализации оказался 12,97 (9,51; 16,08) ПЕ в группе 1; 7,57 (4,1; 10,23) ПЕ в группе 2; 2,9 (1,21; 5,54) ПЕ в группе 3; 2,13 (0,56; 4,99) ПЕ в группе 4 и 1,31 (0,54; 3,39) ПЕ в группе 5 [p<0,001]. LTH3-BP3% значимо выше у здоровых лиц по сравнению с другими обследуемыми 177,87 (94,43; 392,41)%, в то время, как при СД он составил 66,27 (39,67; 148,62)%, при изолированной ишемии – 91,61 (72,29; 196,62)%, в сочетании с предиабетом – 124,35 (61,2; 187,6)%, в комбинации с СД – 81,13 (42,14; 154,33)% [p=0,002]. На тыле стопы выявлены меньшие различия в 5 исследуемых группах, но тенденция к снижению так же наблюдалась. Например, LTH2-BP2 принимал следующие значения от здоровых добровольцев к сочетанию микро- и макрососудистого заболеваний: 2,97 (2,07; 4,01) ПЕ; 2,39 (1,74; 3,02) ПЕ; 0,65 (0,45; 1,35) ПЕ; 0,68 (0,45; 1,06) и 0,58 (0,41; 1,01) [p<0,001].

Базовая перфузия показала разнонаправленные изменения: при СД оказалась выше на 27,7% по сравнению со здоровыми лицами, а при ЗАНК, наоборот, меньше на 63,6% при изолированном поражении, на 75,5% – при сочетании с предиабетом, на 68,3% – при комбинации с СД. Такой эффект может быть обусловлен различными механизмами повреждения: при СД преобладают метаболические нарушения со снижением физиологического симпатического тонуса, а при ЗАНК – структурные изменения с критическим снижением перфузии.

Таким образом, наиболее информативным параметром в оценке кожной микрогемодинамики при ЗАНК и СД оказался LTH_3_200. При этом синергетический эффект комбинированной патологии превышает влияние изолированных нарушений. Полученные данные подчёркивают необходимость комплексной оценки микроциркуляции для ранней диагностики сосудистых осложнений.

[1] Cederqvist J., Rådholm K., Nystrom F.H., Engvall J., *Cardiovasc. Diabetol.*, **24**, №1, 86, (2025).

[2] Lapitan D., Rogatkin D., *J. Biophotonics*, **14**, e202000459, (2021).

[3] Lapitan D.G., Raznitsyn O.A., *Instrum. Exp. Tech.*, **61**, 745-750, (2018).

**СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЦЕРЕБРАЛЬНОГО И
КОЖНОГО КРОВОТОКА У ЛАБОРАТОРНЫХ КРЫС**

**Голубова Н.В.^{1,2}, Рыжков И.А.¹, Лапин К.Н.¹, Калабушев С.Н.¹,
Приземин В.Н.², Дрёмин В.В.², Потапова Е.В.²**

¹НИИ общей реаниматологии им. В.А. Неговского Федерального
научно-клинического центра реаниматологии и реабилитологии, Москва, Россия

²Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, г. Орёл, Россия

nadin.golubova@inbox.ru

Данная работа посвящена применению метода лазерной спекл-контрастной визуализации для анализа интенсивности микрокровотока и изучения механизмов его регуляции как в головном мозге, так и в коже лабораторных животных при острой кровопотере.

Ключевые слова: лазерная спекл-контрастная визуализация, микроциркуляция крови, кровопотеря.

Оценка параметров микроциркуляции крови играет важную роль в диагностике целого ряда патологических состояний организма, в том числе при острой циркуляторной недостаточности (геморрагическом шоке, ГШ) [1]. При этом проявления нарушений микроциркуляции имеют свою специфику в зависимости от сосудистого региона: при кровопотере кровоснабжение головного мозга некоторое время поддерживается на достаточном уровне, однако перфузия других органов (в первую очередь, кожи) будет значительно снижена.

Перспективным является использование оптических методов в биомедицинских исследованиях, в частности – метода лазерной спекл-контрастной визуализации (ЛСКВ) [2]. Он позволяет регистрировать изменение интенсивности кровотока во времени, а для более детального анализа применяются методы частотной декомпозиции получаемых сигналов для выявления ритмической активности [3]. Таким образом, цель данной работы – использование ЛСКВ для анализа динамики кровоснабжения в головном мозге и коже у лабораторных крыс при моделировании острой кровопотери с последующим применением вейвлет-преобразования для исследования особенностей регуляции кровотока.

Исследования проводились в соответствии с принятыми национальными и международным биоэтическими стандартами (Директива 2010/63/EU). Протокол исследований был одобрен Локальным этическим комитетом ФНКЦ РР (протокол № 1/24/2 от 24.04.2024 г.). Экспериментальная установка, реализующая метод ЛСКВ, состояла из лазерного источника излучения с длиной волны 785 нм, набора диффузоров, высокоскоростной видеокамеры, объектива, а также линейного поляризатора для устранения бликов [4]. Эксперименты проводились на самцах крыс линии Wistar, разделенных на 2 группы: группа с моделированием кровопотери (ГШ, n = 18) и группа ложноперированных животных (ЛО, n = 12). Для контроля физиологических параметров животное располагалось на столике хирургической системы для грызунов. Голова животного фиксировалась в стереотаксисе и производилось истончение костей черепа в левой теменной области. Для инвазивного измерения артериального давления и проведения кровопотери (35% от общего объема циркулирующей крови) производилась катетеризация. Также с помощью анализатора осуществлялся анализ кислотно-щелочного состояния крови для определения наступления состояния ГШ. Регистрация ЛСКВ-сигнала (попеременно в головном мозге и коже) происходила исходно до кровопотери и спустя 30 минут после осуществления кровопотери, запись проводилась в течении 5 минут с частотой 90 кадров в секунду и экспозицией 11 мс. Данные обрабатывались с помощью специального алгоритма, реализованного в среде Matlab. Для проведения частотно-временного анализа использовалось непрерывное вейвлет-преобразование.

Полученные данные показали, что при острой кровопотере снижение интенсивности кровотока в коже было в 3 раза более сильным по сравнению со снижением интенсивности кровотока в головном мозге, при этом отсутствовала вазоконстрикторная компенсаторная реакция в коже в ответ на острую циркуляторную недостаточность. Амплитудно-частотная декомпозиция позволила наблюдать колебания, вызванные вазомоторной, дыхательной активностью и сердцебиением. Анализ показал активацию вазомоторных механизмов (преимущественно нейрогенных) в головном мозге и коже при тяжелой кровопотере у части животных. Таким образом, предложенный подход является перспективным для анализа физиологических механизмов регуляции в системе микроциркуляции. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 24-25-00310.

[1] Григорьев Е.В., Лебединский К.М., Щеголев А.В., Бобовник С.В., Буланов А.Ю., Заболотских И.Б., Синьков С.В., Шень Н.П., Корнелюк Р.А., *Анестезиология и реаниматология*, **1**, 5-24, (2020).

[2] Boas D.A., Dunn A.K., *J. Biomed. Opt.*, **15**, №1, 011109-011109-12, (2010).

[3] Mizeva I., Dremine V., Potapova E., Zhrebtsov E., Kozlov I., Dunaev A., *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **67**, №7, 1882-1889, (2019).

[4] Golubova N., Ryzhkov I., Lapin K., Seryogina E., Dunaev A., Dremine V., Potapova E., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **31**, №4, 7000108, (2025).

ПРОЦЕССЫ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА НА ОСНОВЕ *TARGETES PATULA L.* ПРИ ПОВЫШЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА

Землякова Е.С.^{1,2}, Цибульников А.В.¹, Слежкин В.А.^{1,2}, Кострина А.А.¹,
Артамонов Д.А.¹, Самусев И.Г.¹, Брюханов В.В.¹

¹БФУ им. И. Канта, Калининград, Россия

²ФГБОУ ВО КГТУ, Калининград, Россия

w0w0w0@mail.ru

Исследованы методом люминесцентной спектроскопии процесс комплексообразования порфирина с ионами иттербия и флавоноидами цветков *Tagetes patula L.* в процессе насыщения раствора молекулярным кислородом. Установлена роль кислорода в качестве тушителя люминесценции за счет разных механизмов.

Ключевые слова: люминесценция, порфирин, кислород.

Интерес научного сообщества к порфиринам и их металлокомплексам не снижается из-за их уникальных физико-химических свойств [1, 2]. Экстракты растений уже несколько десятилетий активно изучаются в контексте применения в фотодинамической терапии для лечения широкого спектра заболеваний, в том числе злокачественные образования [3]. Целью настоящей работы было исследование методом люминесцентной спектроскопии процессов комплексообразования, происходящих в водно-спиртовых растворах дигидрохлорид мезопорфирина IX (МП9) в присутствии ионов иттербия (Yb^{3+}) и флавоноидов цветков *Tagetes patula L.* (Tag) при повышенной концентрации молекулярного кислорода.

Исходный водно-спиртовой раствор МП9 с концентрацией $C = 10^{-4}$ М готовили путём растворения его кристаллов в этаноле ($C_2=95\%$). В качестве источника Yb^{3+} использовали нитрат иттербия. Экстракт из цветков *Tagetes patula L.* получали в водно-этанольном растворе ($C_2=95\%$) путём настаивания с последующей фильтрацией ($m=0,200$ г, $V_2=20$ мл, $t=24$ ч при $T=20\pm 1^\circ\text{C}$). В эксперименте использовали рабочие растворы, приготовленные смешиванием исходных растворов в установленных соотношениях. Процесс и установка для генерации молекулярного кислорода подробно описаны в статье [3]. Спектры флуоресценции растворов измеряли с помощью оптической системы Fluorolog 3 (Horiba).

Спектры люминесценции МП9 в присутствии Yb^{3+} (рисунок а) и в присутствии Tag (рисунок б) при постепенном насыщении системы O_2 представлены ниже.

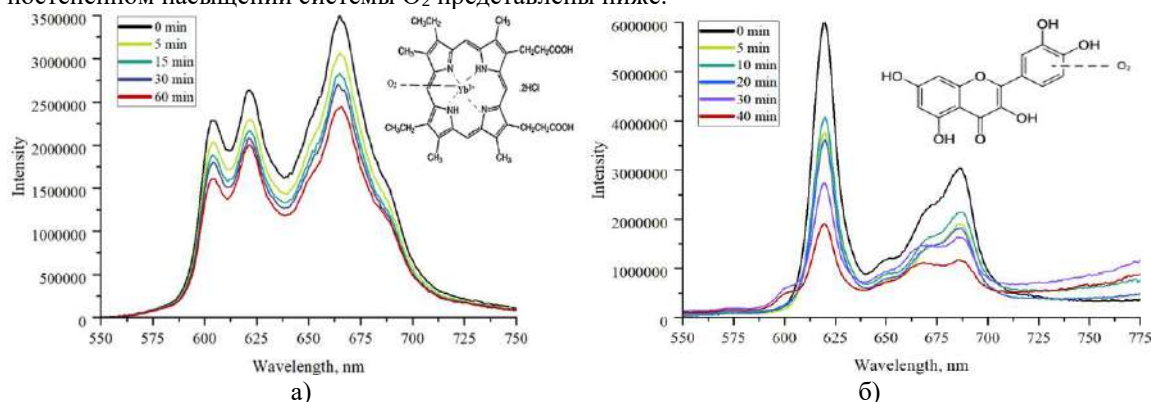


Рисунок. Спектры люминесценции: а) комплекса МП9 с Yb^{3+} (вставка – предполагаемый комплекс МП9- Yb^{3+} - O_2); б) МП9 в экстракте цветков *Tagetes patula L.* (время – длительность кислородного насыщения)

Данные рисунка свидетельствуют о влиянии молекулярного кислорода на интенсивность люминесценции, наблюдается процесс её тушения на длинах волн основных пиков в обоих случаях. Процессы, отображаемые на рисунке, соответствуют классическим представлениям: молекулярный кислород является активным тушителем органических люминофоров. В присутствии Yb^{3+} возникает с МП9 металлоорганический комплекс, который, в свою очередь, может образовывать устойчивую связь с молекулярным кислородом, процесс тушения люминесценции происходит именно за счет образования комплекса МП9- Yb^{3+} - O_2 (см. вставка рисунка). Тушение люминесценции комплекса МП9+Tag при кислородонасыщении раствора происходит за счёт образования столкновительного комплекса с молекулярным кислородом, также возможно образование слабых комплексов O_2 с флавоноидами.

Настоящее исследование выполнено в рамках части Федерального проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZWM-2024-0010).

[1] Ting S. et. al., *Dyes and Pigments*, **193**, 109469, (2021).

[2] Lai R. et. al., *Journal of Molecular Structure*, **1285**, 135499, (2023).

[3] Villacorta R.B. et. al., *Asian Pac J Trop Biomed*, **7**, 358-366, (2017).

[4] Tcibulnikova A.V. et. al., *Chemosensors*, **10**, 130, (2022).

**ВЛИЯНИЕ БЕЛКОВОГО ОКРУЖЕНИЯ ЛЮМИНОФОРА
НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ С АНОМАЛЬНО БОЛЬШИМ
СТОКСОВЫМ СДВИГОМ**

Слюсарева Е.А., Парфёнова Е.В., Слюсаренко Н.В., Мочалов М.О.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

ESlyusareva@sfu-kras.ru

Исследовано влияние двух белков разного поверхностного заряда на вклад двух типов люминесценции в испускание динатриевой соли 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-[(2-сульфонатобензо-ил)амино] бензолсульфокислоты. Результат обсужден в терминах равновесия между нормальной и таутомерной формами люминофора и его конформационной чувствительности при связывании с белком.

Ключевые слова: люминофор, белок, фототаутомеризация.

Особенностью водорастворимого производного бензолсульфокислоты (динатриевая соль 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-[(2-сульфонатобензоил)амино]бензолсульфокислоты) является протекание реакции фототаутомеризации, в результате которой наряду с обычной люминесценцией наблюдается дополнительная яркая полоса [1]. В результате формируются две полосы флуоресценции, одна из которых соответствует нормальной форме, а другая, с аномально большим стоксовым сдвигом, соответствует таутомерной форме. Эффективность фототаутомеризации зависит от факторов, косвенно или напрямую формирующих оптимальную для этого процесса конформацию люминофора.

Целью работы была проверка гипотезы чувствительности люминесценции производного бензолсульфокислоты к связыванию (или комплексообразованию) с белками. Были использованы глобулярные белки с хорошо изученными поверхностными свойствами, несущие при использованных рН раствора (6,50-6,88) преимущественный положительный заряд (лизоцим белка куриного яйца) и отрицательный поверхностный заряд (бычий сывороточный альбумин, БСА). При этом известно, что БСА обладает развитой поверхностью с гидрофобными полостями, выполняющими функцию связывания с лигандами.

Исследование проводилось методами абсорбционной, флуоресцентной, в том числе поляризационной и разрешенной во времени, спектроскопии. Было выявлено отличие спектров возбуждения нормальной и таутомерной (с аномально большим стоксовым сдвигом) форм, существующих в виде равновесия конформеров в основном состоянии. О связывании люминофора с белками свидетельствует как увеличение эффективного размера излучателя в присутствии белка, полученное методом поляризованной люминесценции, так и усиление люминесценции с аномально большим стоксовым сдвигом и спектральные сдвиги при добавлении белков. Показано, что рН-независимая люминесценция люминофора с аномальным стоксовым сдвигом оказывается специфичной к заряду поверхности макромолекулы. Ратиометрический сигнал, полученный как отношение аномальной люминесценции к нормальной, оказался чувствительным к концентрации БСА, что открывает возможность его применения в сенсорных приложениях.

[1] Parfenova E.V., Slyusarenko N.V., Kulagin S.V., Rogova A.V., Tomilin F.N., Slyusareva E.A., *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.*, **88**, №6, 940-945, (2024).

**ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ФОТОХИМИЯ БИОАКТИВНЫХ ХРОМОФОРОВ
МОДЕЛИРОВАННАЯ НЕАДИАБАТИЧЕСКОЙ
МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКОЙ**

Помогаев В.А., Чайковская О.Н.

НИ ТГУ, г. Томск, Россия

valienpo@yandex.ru

Алгоритм компьютерного фотодинамического моделирования молекулярных спектрально-люминесцентных и фотохимических свойств был продемонстрирован в приближениях поиска конических пересечений, квантово-классического и неадиабатического движения биохромофоров и фенольных производных в процессе диссипации фотоиндуцированных электронных структур.

Ключевые слова: фотодинамика, неадиабатика, биохромофоры.

Стремительное развитие современной индустрии, медицины и экологии с использованием технологий фотоиндуцированных процессов, в частности, генерируемых и экспериментально регистрируемых сверхбыстрых пикосекундных и даже фемтосекундных фотопреобразований, требует развития прикладных расчетных методов оценки, интерпретации и предсказания эволюции молекулярной структуры в возбужденном электронном состоянии с последующими изомерными и химическими изменениями, влияющими на свойства всей системы [1].

В последние десятилетия особое внимание уделяется развитию гибридных методов моделирования фотохимических преобразований, включающих в себя классическое движение частиц в сочетании с неадиабатической квантовой механикой электронно-возбужденных фрагментов отдельных хромофорных соединений как комплексов, так и отдельных фрагментов в растворах, в частности, азотистых оснований ДНК, фотоактивных аминокислот в составе белков, также как кластеров благородных металлов, лекарственных или токсичных молекулярных соединений инкорпорированных в биополимеры с целью изучения спектрально-люминесцентных свойств системы, отклика на фотохимические преобразования хромофорных фрагментов с изменением биохимической активности. Гибридная квантово-классическая динамика, включающая в себя неадиабатическую квантовую механику электронно-возбужденных фотоактивных соединений и классическую теорию движения окружающей фотопассивной молекулярной системы, активно развиваются и применяются различными теоретическими группами во всем мире [1].

Проанализирована схема применения конических пересечений и неадиабатической молекулярной динамики для моделирования фотоиндуцированных преобразований и оптических спектров хромофорных фрагментов в различных средах на примере электронно-возбужденных несвязанных биологических молекул ряда азотистых оснований и их производных, а также фенол замещенных [2, 3]. Получены интегральные статистические спектры поглощения и флуоресценции исследуемых молекул, как изолированных без внешнего взаимодействия, так и в модельных водных растворах континуальной сольватации или явного взаимодействия с классическими частицами сферической капли, оценена статистическая заселяемость нижних электронно-возбужденных состояний на серии стохастических неадиабатических траекториях, а также изменение структурных параметров на этих траекториях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт № FSWM-2025-0007).

[1] Помогаев В.А., Садык С., Филатов М., Цой Ч.Хо., *Известия вузов. Физика*, **66**, №4 (785), 25-33, (2023).

[2] Pomogaev V.A., Bocharnikova E.N., Avramov P.V., Tchaikovskaya O.N., *Journal of Molecular Structure.*, **1344**, 142986, (2025).

[3] Huix-Rotllant M., Schwinn K., Pomogaev V., Farmani M., Ferré N., Lee S., and Choi C.H., *J. Chem. Theory Comput.*, **19**, 147-156, (2023).

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОНФОРМАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕМОГЛОБИНА В ЦИТОПЛАЗМЕ ЭРИТРОЦИТА

Слатинская О.В., Максимов Г.В.

ФГБОУ ВО МГУ им. М.В. Ломоносова, биологический факультет, Москва, Россия

slatolya@mail.ru

Повышение температуры среды инкубации эритроцитов сопровождается увеличением гомогенности распределения гемоглобина с образованием нескольких пулов, различных по структуре и динамике глобина в цитоплазме. Данные эффекты участвуют в переносе и транспорте кислорода.

Ключевые слова: Раман-спектроскопия, эритроцит, конформация.

Понимание механизмов взаимодействия гема и глобина молекул гемоглобина (Гб) является важной областью физиологии крови. Гб играет ключевую роль в регуляции внутриклеточных процессов в эритроцитах и действует совместно с цитоплазматическим доменом анионообменника 1 (AE1), обеспечивая фиксацию кислорода в клеточной мембране. Способность Гб транспортировать кислород зависит от его конформации, состояния плазматической мембраны, объема клетки, мембранного потенциала и свойств цитоплазмы [1]. Известно, что изменение флуоресценции триптофанов в составе глобина может служить индикатором формирования новых конформационных состояний в белковой глобуле [2]. Так, Гб содержит шесть остатков Trp, причем остаток в β -субъединице β Trp37, расположенный на поверхности контакта α - и β -субъединиц ($\alpha_1\beta_2$), считается основным аминокислотным остатком, вносящим вклад в собственную флуоресценцию Гб, и участвует в гидрофобном взаимодействии между субъединицами Гб [3].

Для оценки свойств цитоплазмы эритроцитов, а также конформационных изменений между комплексом Гб-О₂ использовали Раман-спектроскопию, лазерную интерференционную микроскопию и коррелированный по времени счет одиночных фотонов (TCSPC). Изменения ζ -потенциала (потенциал липидов и белков мембраны) сопровождался изменениями конформации гема и глобина, включая олигомеризацию комплексов гемоглобина.

В работе продемонстрировано, что увеличение температуры среды инкубации клеток с 20 до 38 °С не влияет на вероятность нахождения гема в куполообразной конформации, но приводит к снижению плотности упаковки глобина Гб (снижение величины соотношения интенсивностей полос Раман-спектра I_{2880}/I_{2930}). При этом, отмечено снижение ζ -потенциала с $-15,3 \pm 0,2$ (при 20°C) до $-15,6 \pm 0,2$ мВ (при 38°C) на поверхности эритроцитарной мембраны. Вероятно, некоторое увеличение отрицательного заряда на поверхности клеток происходит в результате отщепления от отрицательно заряженных групп сиаловых кислот гликокаликса и отрицательно заряженных головок фосфолипидов различных органических и неорганических катионов, которые экранируют отрицательный заряд [4]. Смещение максимума флуоресценции Trp в коротковолновую область характеризует снижение взаимодействия Trp с микроокружением *в белке, и, как следствие, снижение доли энергии, которая тратится на тепловую диссипацию перед актом испускания кванта флуоресценции* [5].

Таким образом, увеличение температуры сопровождается ростом гомогенности распределения Гб в цитоплазме эритроцита человека и снижением плотности упаковки молекулы глобина, что является результатом молекулярного краудинга. Выявленные изменения конформации характерны только для Гб в цитоплазме эритроцита. Мы предполагаем наличие нескольких пулов молекул Гб, отличающихся между собой по структуре и динамике белковой глобулы, формирующих гетерогенное распределение гемоглобина внутри эритроцита за счет соединения молекул Гб в кластеры [4]. Обнаруженные эффекты могут вносить вклад в функционирование эритроцита за счет кластеризации Гб в цитоплазме клетки, что повышает эффективность сигнально-регуляторной функции переноса и транспорта кислорода.

[1] Atkins C.G., et al., *Appl. Spectrosc.*, **71**, №5, 767-793, (2017).

[2] Sreerama N., Woody R.W., *Anal. Biochem.*, **287**, №2, 252-260, (2000).

[3] Makarska-Bialokoz M., *Spectrochim. Acta. A. Mol. Biomol. Spectrosc.*, **178**, 47-54, (2017).

[4] Слатинская О.В. и др., *Биофизика*, **70**, 2, 305-313, (2025).

[5] Maksimov E.G., et al., *Sci. Rep.*, **7**, №1, 15548, (2017).

СВЕТОДИОДНЫЙ МОДУЛЬ ФИТОСВЕТИЛЬНИКА ПОЛНОГО СПЕКТРА

Андреева М.В., Афонин К.Н., Ермолаев А.В.,

Кремзуков Ю.А., Солдаткин В.С., Туев В.И.

ФГАОУ ВО ТУСУР, кафедра РЭТЭМ, г. Томск, Россия

vasilii.i.tuev@tusur.ru

В работе представлен вариант конструкции светодиодного модуля фитосветильника полного спектра. Изготовлен макет светодиодного модуля с использованием светодиодов разных длин волн от 395 до 1050 нм и проведено измерение неравномерности светораспределения.

Ключевые слова: светодиодный модуль, фитосветильник, интенсивность излучения, спектральная однородность, светораспределение.

Фитосветильники на основе светодиодов (СД) приобрели большую популярность, как у садоводов-любителей, так и у профессиональных растениеводов. Существующие фитосветильники классифицируют по спектру свечения на биколорные, мультиспектральные и полноспектральные. Первые содержат СД, излучающие свет на двух длинах волн – в диапазоне синего (440 – 500 нм) и красного (635 – 770) цвета. Мультиспектральные дополнительно содержат в конструкции светодиоды белого цвета свечения, а полноспектральные сочетают широкий диапазон цветов и длин волн, соответственно. Именно последний тип фитосветильников с использованием СД позволяет, на сколько это возможно, приблизиться к спектральному составу солнечного излучения и имеет возможность регулировки интенсивности излучения по всему спектру. Так как спектр излучения СД оказывает непосредственное влияние на фотосинтез, морфогенез и другие физиологические процессы растений, а неправильный выбор спектра может привести к снижению урожайности, ухудшению качества продукции, то задача создания светильника с регулируемым спектральным составом является актуальной задачей [1, 2].

Цель данной работы заключается в разработке СД модуля фитосветильника полного спектра. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи.

1. Выбор светодиодов и материала печатной платы. Выбраны СД преимущественно высокой мощности (2 Вт и более) для изучения возможности создания фитосветильников на их основе, например для теплиц с расположением источника света на значительном удалении от растений. Печатная плата СД модуля изготовлена на алюминиевом основании из-за высокой теплопроводности 140 – 200 Вт/(м·К) [3]. Это обеспечит эффективный отвода тепла от СД.

2. Разработка топологии печатной платы. СД размещены на плате с размерами 100 × 100 мм по группам соответствующих длин волн. Группы СД перемешаны на плате для увеличения спектральной однородности. Также учтены углы излучения каждого типа СД для увеличения равномерности энергетической освещённости (ЭО). Фотография собранного макета СД модуля приведена на рисунке 1.

Исследование неравномерности ЭО макета. Проведены измерения значений ЭО в 121 точке поля засветки с размерами 100 × 100 мм. Максимальное значение относительной неравномерности составило ~ 69% (рисунок 2). Проведённые испытания показали, что СД размещены не оптимально и максимум ЭО приходится на центральную область СД модуля.

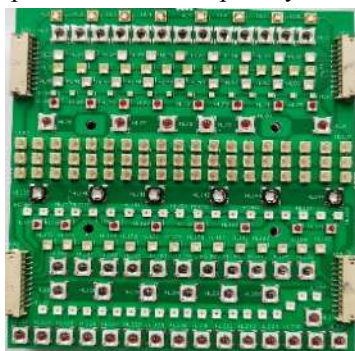


Рис. 1. Фотография макета СД модуля

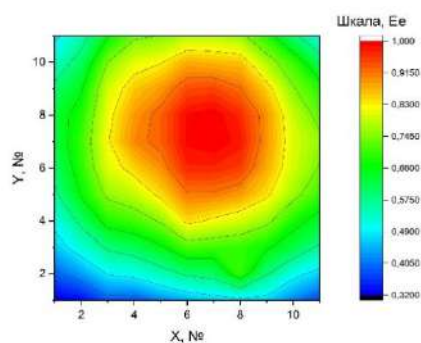


Рис. 2. Относительное распределение ЭО

[1] Озинковский О.О., *Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами: сборник научных докладов Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 11 декабря 2024 года*, 256-260, (2025).

[2] Шамукаев С.Б., *Российский электронный научный журнал*, №1(55), 493-498, (2025).

[3] Белецкий В.М., Кривов Г.А., *Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение)*, 365 с, (2005).

**АНАЛИЗ ДАННЫХ ОБЪЕМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ
КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ МЕТОДАМИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИММУННО-ОПОСРЕДОВАННЫХ
КОЖНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ**

**Павлов О.О.¹, Потапов А.Л.², Якимов Б.П.¹, Сироткина М.А.²,
Кузнецова И.А.², Ширшин Е.А.¹, Гладкова Н.Д.²**

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²ФГБОУ ВО "ПИМУ" Минздрава России, Москва, Россия

pavlovoo@my.msu.ru

В работе демонстрируется возможность диагностики ранних и поздних стадий Склерозирующего Лихена (СЛ) по данным Оптической Когерентной Томографии с помощью компьютерного зрения с применением глубокого обучения.

Ключевые слова: оптическая когерентная томография, глубокое обучения, компьютерное зрение.

Иммунно-опосредованные заболевания кожи представляют особый интерес с точки зрения задачи диагностики, поскольку, несмотря на распространенность случаев развития некоторых из подобных заболеваний у возрастных пациентов, неинвазивное диагностирование данных заболеваний затруднено проявлением структурных изменений в ткани только на микроскопическом уровне в подповерхностных слоях кожи, без значительных внешних изменений. Примером подобного заболевания служит склерозирующий лишай (СЛ), являющийся хронически прогрессирующим иммунно-опосредованным воспалительным и дистрофическим заболеванием кожи, требующим длительного лечения, что увеличивает важность своевременной диагностики данного заболевания [1].

Наиболее объективным и информативным методом оценки состояния слизистой при данном заболевании на данный момент является биопсия с последующим морфологическим анализом, однако ввиду риска нанесения травм пациенту, болезненности, возможности осложнений, а также негативного отношения пациентов данный метод не может быть рекомендован для рутинного применения в клинике и используется скорее в исключительных случаях.

Кандидатом на роль неинвазивного метода может выступать проявивший себя в задачах офтальмологии метод Оптической Когерентной Томографии (ОКТ), предоставляющий объемную визуализацию слоев кожи на основе реконструкции обратно рассеянного тканью излучения от источника со слабой временной когерентностью. В научной литературе уже была продемонстрирована эффективность метода ОКТ в контрастной визуализации эпителия [2], что позволяет производить количественные оценки толщины эпителия и коэффициента затухания сигнала ОКТ, потенциально выступающие чувствительными маркерами аутоиммунных кожных заболеваний [3].

Однако, несмотря на подтверждение наличия специфичных к СЛ маркеров в данных ОКТ, на данный момент в научной литературе не встречаются методики, реализующие автоматизированные алгоритмы оценки состояния кожной ткани при подозрении на наличие СЛ и диагностику данного заболевания, хотя разработка подобных методов позволила бы избежать необходимости обучения персонала анализу данных ОКТ, либо помочь ориентировать врача в процессе анализа. В рамках настоящей работы была исследована возможность классификации степени развития СЛ по данным объемных массивов карт коэффициента затухания ОКТ-сигнала, предоставленным сотрудниками Лаборатории оптической когерентной томографии НИИ ЭО и БМТ Приволжского Исследовательского Медицинского Университета. В выборку вошли данные от более чем 40 уникальных пациентов, для каждого из которых было измерено от 1 до 6 объемных массивов В-сканов ОКТ, соответствующих различным анатомическим областям [4]. Для анализа изображений использовалась методика дообучения моделей популярных архитектур сверточных нейронных сетей, таких как ResNet [5]. Для оценки качества классификации на отложенной выборке использовалась пятикратная кросс-валидация по всему объему имеющейся выборки. На данном этапе был продемонстрирован уровень макроусредненных значений специфичности и чувствительности предсказаний выше 0,85 при классификации образцов между 3 классами: умеренная степень поражения при СЛ, ранняя стадия развития поражения при СЛ и здоровая ткань. Также были рассмотрены различные подходы к обработке объемного массива данных ОКТ: от агрегации предсказаний на отдельных В-сканах до одновременного предсказания на всем измерении целиком.

[1] De Luca D.A., Papara C., Vorobyev A., et al., *Frontiers in medicine*, **10**, 1106318, (2023).

[2] Sudol N.T., Miao Y., Li Y., et al., *Urogynecology*, **26**, №2, 155-158, (2020).

[3] Malone J., Hill C., Tanskanen A., et al., *Cancers*, **16**, №15, 2751, (2024).

[4] Павлов О.О., Потапов Л.А., Якимов Б.П., и др., *Тезисы докладов 67-ой Всероссийской научной конференции МФТИ Секция квантовой и вычислительной химии*, 509-510, (2025).

[5] He K., Zhang X., Ren S., Sun J., *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 770-778, (2016).

**ПЕРСПЕКТИВЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
В СВЕТОКУЛЬТУРЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКИМИ СВЕТОВЫМИ ПОЛЯМИ**

Корепанов В.И.¹, Терещенко Н.Н.², Туев В.И.², Петикарь П.В.¹, Былков Д.В.¹

¹ТПУ, г. Томск, Россия

²ТУСУР, г. Томск, Россия

Korepanov@tpu.ru

Изучено накопление пигментов в растениях, возбуждаемых монохроматическими потоками излучения из области 395...705 нм. Методологию и результаты исследований можно использовать при подборе параметров светового поля для управления фотосинтетическими процессами.

Ключевые слова: пигменты, растения, монохроматические излучения.

Оптическое излучение является источником энергии для фотосинтеза и сигналов для управления фотосинтетическими процессами в растениях, например, суточными и сезонными биоритмами. Выявление сложных механизмов влияния света на фотосинтетические процессы – ключ к созданию искусственных световых полей, с помощью которых можно не только реализовывать условия освещения, близкие к природным, но и управлять пищевыми, органолептическими, лечебными свойствами сельскохозяйственной продукции, применять в селекционной работе, разработке специальных агропрепаратов. Управление может быть основано на использовании фоторецепторов и фитогормонов. Роль, механизмы, спектры действия фоторецепторов известны, а для фитогормонов показано только то, что их синтез зависит от спектра падающего излучения.

Влияние спектрального состава световых полей на рост и развитие растений интенсивно изучается. Обычно используются различные комбинации монохроматических светодиодов с люминофорными покрытиями, вплоть до создания так называемых облучателей «полного спектра» или облучателей со спектрами «солнечного излучения» различных оттенков. Для выявления механизмов управления фотосинтетическими процессами нами разработана методология изучения влияния переменных световых полей на вторичные фотосинтетические процессы, основанная на экспериментальном изучении накопления пигментов в растениях при облучении монохроматическими излучениями светодиодов или их сочетаний в пределах 400...700 нм. В основе лежит кривая McCree [1], свидетельствующая о том, что фотосинтез можно осуществлять при облучении растений излучением любой длины волны. Поэтому, подобрав удобное и эффективное для стимуляции фотосинтеза монохроматическое светодиодное излучение, можно использовать излучатели с другим спектром свечения для селективного возбуждения фоторецепторов или стимуляции синтеза фитогормонов.

В настоящей работе представлены результаты исследований процессов накопления пигментов в различных растениях при возбуждении только монохроматическими излучениями светодиодов с $\lambda = 395$ нм, 412 нм, 430 нм, 445 нм, 460 нм, 490 нм, 525 нм, 590 нм, 630 нм, 665 нм, 705 нм в сравнении с накоплением пигментов в поле излучения светодиодов «солнечного спектра» (5000 К) при одинаковых потоках квантов света в пределах 89...200 мкмоль/м²с. Растения выращивались в ячейках (грубоксах) с контролируемыми параметрами (температура, влажность, время облучения, поток фотонов) в грунте на торфяной основе. Стенки ячеек футерованы материалом с одинаковым коэффициентом отражения в пределах 300...1000 нм, то есть рост растения происходил в условиях равномерного со всех сторон облучения. Для исследований использовались 12 одинаковых ячеек размерами 0.5×0.5×1.0 м или 0.25×0.27×0.7 м, в верхней части которых располагались панели со светодиодами. Накопление пигментов регистрировалось методами спектроскопии отражения с последующим определением индексов вегетации.

Как следовало ожидать, монохроматические излучения в пределах ФАР приводят к эффективному накоплению хлорофилла во всех изученных видах растений (огурцы, перцы, петрушка, лук, горчица). Однако явно заметны различия в накоплении других видов пигментов, например, каротиноидов, а также различия в развитии вегетативных органов растений. Установлено, что очень эффективно растения развиваются при возбуждении монохроматическими светодиодными излучениями фиолетового спектра ($\lambda = 395 - 460$ нм). Изучено влияние изменения длины волны возбуждающего излучения в процессе роста растения на изменение спектров отражения его листьев. Как правило, это приводит к адаптации спектра к виду характерному для облучения текущим излучением.

Результаты исследований позволяют говорить о том, что применение переменных по спектру и потоку световых полей, в том числе монохроматических, позволяет эффективно управлять фотосинтетическими процессами в светокультурах и свойствами конечной продукции. Разработанную методологию можно применять при подборе оптимальных параметров переменного светового поля для различных видов растений.

[1] McCree K.J., *Agric. Meteorol.*, **9**, 191-216, (1972).

**НОВЫЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ МЕТКИ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОЙ
ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ТРОМБОЦИТОВ**

Науменко М.Б.¹, Панфилов М.А.¹, Воробьев А.Ю.^{2,3}, Москаленский А.Е.¹

¹Научный центр трансляционной медицины, Научно-технологический университет «Сириус»,
Сириус, Краснодарский край, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, г. Новосибирск, Россия
m.naumenko@g.nsu.ru

Разработан оптимизированный протокол флуоресцентного мечения тромбоцитов конъюгатом BODIPY-эпинефрина. Продемонстрирована эффективность направленной фотоактивации тромбоцитов под воздействием света.

Ключевые слова: выделение тромбоцитов, флуоресцентное мечение, управляемая фотоактивация.

Современные флуоресцентные молекулы представляют собой мощный инструмент для визуализации и исследования биологических систем. В области исследований тромбоцитов особый интерес вызывают синтетические молекулы со свойством фотоактивации – так называемые фотолабильные («saged») соединения, способные избирательно активировать тромбоциты под действием света [1].

В наших предыдущих исследованиях было показано, что модифицированные аналоги эпинефрина, связанного с фотолабильной защитной группой через карбаматный мостик, позволяют исследовать *in vitro* активацию тромбоцитов [2]. В данной работе мы развиваем данный подход, используя в качестве защитной группы остаток красителя класса BODIPY. Данное соединение (рисунок) было впервые синтезировано в лаборатории фотоактивируемых процессов НИОХ СО РАН. Также были получены аналоги с различными заместителями. Помимо фотоактивации, гибридные молекулы, представляющие собой конъюгат BODIPY и эпинефрина, обладают яркой флуоресценцией в видимом диапазоне, что позволяет визуализировать тромбоциты.

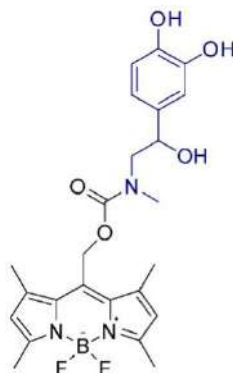


Рисунок. Структурная схема используемого вещества: остаток эпинефрина (показан синим) и флуоресцентный краситель класса BODIPY, связанный с ним через карбаматный мостик

Для сохранения функциональной целостности тромбоцитов и обеспечения надёжной флуоресцентной визуализации крайне важно оптимизировать протоколы их выделения и мечения. Мы провели сравнительный анализ различных методов выделения тромбоцитов, включая применение различных антикоагулянтов и буферных растворов, а также методы пассивного осаждения и центрифугирования. В работе представлены экспериментальные данные по исследованию флуоресцентного окрашивания и фотоактивации тромбоцитов с помощью данного класса молекул. Разработанная методика расширяет возможности для контролируемых исследований активации тромбоцитов.

Результаты получены при финансовой поддержке исследования, реализуемого в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» Соглашение № 28-03 от 07.07.2025.

[1] Panfilov M.A., Starodubtseva E.S., Karogodina T.Y., Vorob'ev A.Y., Moskalensky A.E., *Journal of Xenobiotics*, **15**, №1, 8, (2025).

[2] Spiriyova D.V., Vorobev A.Y., Klimontov V.V., Koroleva E.A., Moskalensky A.E., *Biomedical Optics Express*, **11**, №6, 3319-3330, (2020).

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЛЕКУЛЫ
БАКТЕРИОХЛОРОФИЛЛА НА ПОЛОЖЕНИЕ МАКСИМУМОВ
ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В Q-ОБЛАСТИ СПЕКТРА**

Ковалева Е.А.¹, Ларионов Е.А.², Коршунов М.М.^{1,2}

¹ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

²Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, Россия

kovaleva.evgeniya1991@mail.ru

В ходе работы при помощи теории функционала плотности рассмотрено влияние структурных искажений порфириновой плоскости в молекуле бактериохлорофилла а на локализацию граничных орбиталей и энергию электронных переходов в ближнем ИК-диапазоне.

Ключевые слова: бактериохлорофилл а, теория функционала плотности, оптический спектр.

Периферический светособирающий комплекс (LH2) пурпурных бактерий *Rhodoblastus Acidophilus*, содержащий 27 молекул бактериохлорофилла а (BChl а), объединенных в две подсистемы (B800 и B850), дающие в общем спектре поглощения LH2 характеристические пики поглощения на 800 и 850 нм, широко используется в качестве модельного объекта для изучения процессов переноса энергии в фотосинтетических структурах [1]. Ранее было показано [2, 3], что в B800 части LH2 батохромный сдвиг характеристического пика поглощения не связан с коллективными возбуждениями ввиду большого расстояния между молекулами пигмента, а обусловлен искажением структуры порфириновой плоскости, в частности, пиррольных колец, вследствие взаимодействия с аминокислотами окружающих пептидных цепочек. В настоящей работе эффекты, связанные со структурными искажениями в молекуле BChl а, исследуются более подробно.

Расчеты проводились в рамках формализма теории функционала плотности с использованием пространственно-разделенного гибридного обменно-корреляционного функционала CAM-B3LYP и базисного набора def2-SVP, определенных в ходе предварительных расчетов как оптимальные для воспроизведения экспериментально наблюдаемых оптических характеристик.

С целью определения параметров, характеризующих искажения в молекуле, были проанализированы кривизна плоскости, диэдральные углы выхода атома Mg из плоскостей, образованных атомами N пиррольных колец (рисунок), для различных вариантов аминокислотного окружения.

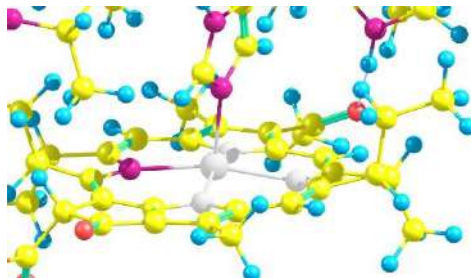


Рисунок. Фрагмент рассмотренной структуры BChl а с аминокислотным окружением из комплекса LH2 *Rhodoblastus Acidophilus*. Атомы углерода, водорода, кислорода и азота обозначены желтым, голубым, красным и фиолетовым цветом. Серым выделен пример диэдрального угла N-N-N-Mg

Также рассмотрены варианты замены центрального атома-комплексобразователя на Ca и Zn, исследованы как оптические свойства замещенных молекул, так и колебательные характеристики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФИЦ КНЦ СО РАН.

[1] Maity S., Kleinekathofer U., *Photosynth. Res.*, **156**, 147-162, (2023).

[2] Begunovich L.V., Kovaleva E.A., Korshunov M.M., Shabanov V.F., *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry*, **450**, 115454-1-7, (2024).

[3] Kovaleva E.A., Begunovich L.V., Korshunov M.M., *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry*, **468**, 116489-1-4, (2025).

**УПРАВЛЕНИЕ КОГНИТИВНОЙ АКТИВНОСТЬЮ С ПОМОЩЬЮ
ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Туранов С.Б., Коржнева Т.Г., Толкачева К.П., Шачнева П.В.

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

turanov_sb@tpu.ru

Исследование влияния цветовой температуры освещения на психофизиологические реакции показало, что оптимизация условий освещения позволяет регулировать продуктивность и когнитивные процессы, улучшая рабочую среду за счет адаптации света под специфику задач.

Ключевые слова: адаптивное освещение, когнитивная активность, цветовая температура.

В условиях ежегодного роста городского населения [1] освещение играет ключевую роль в создании комфортной и продуктивной рабочей среды. С увеличением времени, проводимого людьми в помещениях, особенно в офисах и учебных заведениях, все больше растет актуальность исследования влияния цветовой температуры и освещенности на психофизиологические реакции и когнитивные процессы человека. Существующие решения, направленные на оптимизацию условий освещения, часто не учитывают индивидуальные особенности восприятия света и его влияние на когнитивную активность.

Согласно исследованиям [2, 3], цветовая температура света может существенно влиять на уровень концентрации, производительность и общее самочувствие людей. Например, более теплые оттенки (2700–3000 К) способствуют созданию уютной атмосферы, что важно для задач, требующих спокойствия и внимания, в то время как более холодные оттенки (5000–6500 К) могут стимулировать активность и улучшать скорость обработки информации. Несмотря на это, многие существующие системы освещения не предлагают возможности адаптации цветовой температуры в зависимости от выполняемых задач, что ограничивает их эффективность. Отсутствие гибких систем освещения связано с недостаточным научным обоснованием данного подхода. Это ограничивает возможности создания оптимальных условий для выполнения задач, требующих различного уровня концентрации. В связи с этим, целью данной работы является исследование влияния изменения цветовой температуры на когнитивную активность и психофизиологическую реакцию пользователя.

Для достижения целей исследования была разработана экспериментальная установка со светодиодным светильником [4], который позволяет настраивать цветовую температуру в диапазоне от 2700 до 6500 К и освещенность в диапазоне от 0 до 550 Лк. В эксперименте участники выполняли тесты (символьно-цифровой, тесты слежения А и Б, тест Струпа, тест на различение и задачу на классификацию) под воздействием света с различными цветовыми температурами (3000 К, 4000 К, 5000 К, 6000 К). Уровень освещенности составил 500 лк, коэффициент пульсации не превышал 0,05%. Температура (22 ± 1 °C) и влажность (40–50%) в помещении были постоянными. Все участники проходили тесты в один и тот же промежуток времени (с 10.00 до 12.00) для исключения влияния циркадных ритмов. Для оценки психофизиологической реакции испытуемым предлагались специальные опросы до и после эксперимента, а во время прохождения тестов фиксировались частота сердечных сокращений с помощью нагрудного пульсометра, количество морганий и диаметр зрачка методами компьютерного зрения. В эксперименте приняли участие 25 человек. Результаты сравнивались по скорости выполнения заданий, точности ответов и психофизиологическим изменениям. Наличие значимых различий между участниками проверялось методами дисперсионного анализа (ANOVA) и описательной статистики.

Результаты исследования показали значимые различия в эффективности выполнения когнитивных задач при разных цветовых температурах освещения. Скорость обработки информации была выше всего при цветовой температуре 4000 К. Точность и минимизация ошибок достигались при освещении с температурой 6500 К. Спокойная работа, требующая внимания, лучше всего выполнялась при 3000 К. Цветовая температура 5000 К не показала преимуществ ни в одном из тестов. Таким образом, можно стимулировать когнитивную активность изменяя и подстраивая цветовую температуру под специфику выполняемой работы. Эти данные рекомендуются использовать при проектировании освещения для различных помещений с учетом его назначения, что повысит продуктивность и улучшит условия труда. На основе проведенных экспериментальных работ сформирован сценарий динамического изменения цветовой температуры в зависимости от выполняемой работы, что открывает новые перспективы для дальнейших исследований и практического применения в области освещения.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда 25-28-20162 (<https://rscf.ru/project/25-28-20162/>) и гранта в форме субсидии, выделяемого Департаментом по научно-технологическому развитию и инновационной деятельности Томской области (Соглашение №02/7/2025).

[1] ТАСС [Электронный ресурс]: Росстат назвал число россиян, проживающих в городах. URL: <https://tass.ru/obschestvo/14764801> (дата обращения: 01.05.2025).

[2] Sun C., Lian Z., Lan L., *Indoor Built Environ.*, **28**, №7, (2019).

[3] Беспалов В.Г., Макаров Н.С., *Опт. и спектр.*, **90**, №6, 1034–1037, (2001).

[4] Шачнева П.В., Колесникова В.А., *Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов*, **3**, 11, (2025).

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ,
ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ
ПОРИСТЫХ МИШЕНЕЙ, ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ БИОФОТОНИКИ**

**Заботнов С.В.¹, Нестеров В.Ю.¹, Шулейко Д.В.¹, Соколовская О.И.¹,
Гурбатов С.О.², Кучмижак А.А.², Турчин И.В.³, Сергеева Е.А.³, Кириллин М.Ю.³**

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

³Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия
ZabotnovSV@my.msu.ru

Показана возможность использования кремниевых наночастиц, сформированных методом лазерной абляции мишеней пористого кремния и кремниевых нанонитей в воде, этаноле и жидком азоте, в качестве агентов для биомедицинской визуализации и фотогипертермии.

Ключевые слова: кремниевые наночастицы, лазерная абляция в жидкостях, биофотоника.

Кремниевые наночастицы (КНЧ), формируемые методом импульсной лазерной абляции, имеют высокий потенциал для использования в различных биомедицинских приложениях [1, 2]. Существенно увеличить производительность данной технологии можно путем использования мишеней на основе пористого кремния или кремниевых нанонитей с пониженным порогом абляции [3].

В настоящей работе с помощью импульсной лазерной абляции мишеней пористого кремния и кремниевых нанонитей в воде, этаноле и жидком азоте изготовлены КНЧ, средний размер которых варьируется в диапазоне от 25 до 200 нм в зависимости от используемых мишеней и буферных сред для абляции. Применение пористых мишеней вместо монокристаллического кремния позволяет уменьшить до трех раз размер формируемых КНЧ [4].

Высокая степень кристалличности КНЧ способствует их флуоресценции, которая наиболее ярко проявляется в диапазоне 600–900 нм, попадающим в диагностическое окно прозрачности биотканей.

Анализ измеренных значений коэффициентов рассеяния и поглощения взвесей КНЧ показал, что их величины достаточны для эффективного использования в качестве контрастирующих агентов в оптической когерентной томографии (ОКТ). Пример контрастирования структурных неоднородностей фантома, состоящего из агарового геля при его визуализации ОКТ-системой с центральной длиной волны зондирования 1300 нм представлен на рисунке.

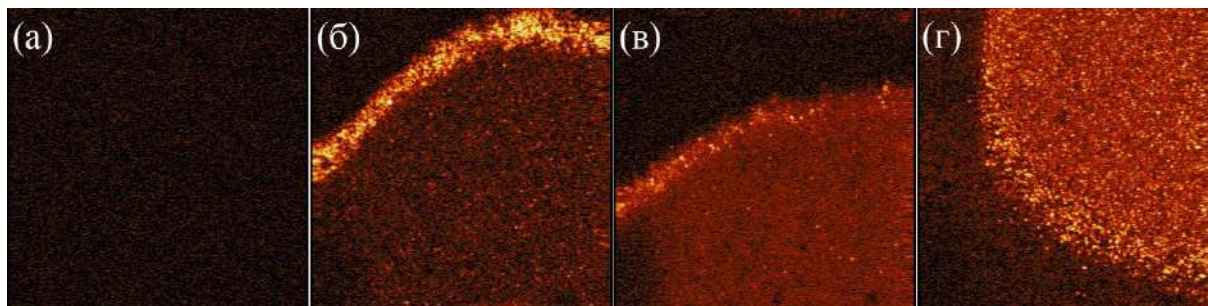


Рисунок. Фронтальные ОКТ-изображения агарового фантома без наночастиц (а) и с нанесенными в виде капли суспензии КНЧ, сформированными методом фемтосекундной лазерной абляции пористого кремния в воде (б), этаноле (в) и жидком азоте (г); размер изображения – 3х3 мм

Дополнительно была произведена оценка потенциала изготовленных КНЧ в качестве агентов для фотогипертермии. Проведено численное моделирование нагрева базально-клеточной карциномы в коже человека с использованием непрерывного лазерного излучения (633 или 800 нм, 60–200 мВт) как без введения, так и с введением КНЧ. Показано, что при внедрении КНЧ в опухоль можно более эффективно подобрать параметры облучения, обеспечивающие гипертермию всей опухоли без значительного перегрева окружающих здоровых тканей. Эксперимент по нагреву фантома, имитирующего оптические свойства кожи человека и изготовленного на основе агарового геля, липофундина и красной туши, подтвердил, что добавление КНЧ в фантом увеличивает его нагрев при идентичных условиях облучения.

Таким образом, КНЧ, формируемые методом лазерной абляции пористых мишеней в жидкостях, представляют несомненный интерес для решения задач тераностики биотканей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-20016.

[1] d'Amora M., Rodio M., Sancataldo G., et al., *ACS Appl. Bio Mater.*, **2**, №1, 321-329, (2019).

[2] Zabotnov S.V., Skobelkina A.V., Sergeeva E.A., et al., *Sensors*, **20**, №17, 4874, (2020).

[3] Zabotnov S.V., Skobelkina A.V., Kashaev F.V., et al., *Solid State Phenomena*, **312**, 200-205, (2020).

[4] Gurbatov S.O., Zhizhchenko A.Yu., Nesterov V.Yu., et al., *ACS Appl. Nano Mater.*, **7**, 10779-10786, (2024).

ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕРАГЕРЦОВОЙ БИОФОТОНИКИ

Гавдуш А.А.¹, Черномырдин Н.В.¹, Катыба Г.М.², Зайцев К.И.¹

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН, г. Черноголовка, Россия

arsenii.a.gavdush@gmail.com

Терагерцовые (ТГц) технологии актуальны для многих биомедицинских приложений. В докладе рассматриваются современные достижения, перспективы и проблемы применения ТГц методов биофотоники.

Ключевые слова: ТГц биофотоника, ТГц спектроскопия, ТГц визуализация.

ТГц технологии были существенно развиты в последние десятилетия [1, 2]. К настоящему времени, их потенциальное использование в биомедицинских приложениях достаточно обширно: показана возможность применения ТГц методов в диагностике и терапии многих заболеваний, в том числе, сахарного диабета [3], злокачественных и доброкачественных новообразований различной нозологии и локализации на основе эндогенных маркеров [4-7].

Ряд актуальных достижений в области биомедицинских приложений ТГц техники рассматривается в этом докладе [8-12]. Среди оригинальных работ научной группы будут упомянуты исследования возможностей ТГц диагностики онкологии кожных покровов человека и глиом головного мозга [9, 10]. Кроме того, подчеркнуты сложности трансляции и внедрения ТГц методов биофотоники в клиническую практику, а также обсуждаются возможные пути решения сопутствующих проблем. Среди них будут упомянуты необходимость преодоления дифракционного предела Аббе в ТГц диапазоне с учетом требования высокого пространственного разрешения ТГц спектроскопии и визуализации в медицинских приложениях [12-19]; разработка экспериментальных установок и методов ТГц эндоскопии для исследования труднодоступных тканей и внутренних органов [20-22]; повышение эффективности и информативности ТГц спектроскопических и изображающих систем [23-25].

- [1] Guerboukha H. et al., *Advances in Optics & Photonics*, **10**, 843-938, (2018).
- [2] Smolyanskaya O.A. et al., *Progress in Quantum Electronics*, **62**, 1-77, (2018).
- [3] Hernandez-Cardoso G.G. et al., *Scientific Reports*, **12**, 3110, (2022).
- [4] Zaytsev K.I. et al., *Journal of Optics*, **22**, 013001, (2020).
- [5] Lindley-Hatcher H. et al., *Applied Physics Letters*, **118**, 230501, (2021).
- [6] Cherkasova O.P. et al., *Journal of Biomedical Optics*, **26**, 090902, (2021).
- [7] Chernomyrdin N.V. et al., *Opto-Electronics Advances*, **6**, 220071, (2023).
- [8] Zaytsev K.I. et al., *Applied Physics Letters*, **106**, 053702, (2015).
- [9] Gavdush A.A. et al., *Journal of Biomedical Optics*, **24**, 027001, (2019).
- [10] Gavdush A.A. et al., *Biomedical Optics Express*, **12**, 69-83, (2021).
- [11] Kucheryavenko A.S. et al., *Physical Review Applied*, **20**, 054050, (2023).
- [12] Chernomyrdin N.V. et al., *Scientific Reports*, **13**, 16596, (2023).
- [13] Chernomyrdin N.V. et al., *Applied Physics Letters*, **113**, 111102, (2018).
- [14] Chernomyrdin N.V. et al., *Optica*, **8**, 1471-1480, (2021).
- [15] Kucheryavenko A.S. et al., *Biomedical Optics Express*, **12**, 5272-5289, (2021).
- [16] Musina G.R. et al., *Biomedical Optics Express*, **12**, 5368-5386, (2021).
- [17] Chernomyrdin N.V. et al., *Applied Physics Letters*, **120**, 110501, (2022).
- [18] Zhelnov V.A. et al., *Advanced Optical Materials*, **12**, 2300927, (2024).
- [19] Zhelnov V.A. et al., *Applied Physics Letters*, **126**, 251101, (2025).
- [20] Kucheryavenko A.S. et al., *Optics Express*, **31**, 13366-13373, (2023).
- [21] Kатыба G.M. et al., *Applied Physics Letters*, **124**, 243703, (2024).
- [22] Kатыба G.M. et al., *Light: Advanced Manufacturing*, **6**, 1-18, (2025).
- [23] Ponomarev D.S. et al., *Optics Letters*, **48**, 1220-1223, (2023).
- [24] Zenchenko N.V. et al., *Applied Physics Letters*, **124**, 121107, (2024).
- [25] Ponomarev D.S. et al., *Physics-Uspekhi*, **67**, 3-21, (2024).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА АКТИВАЦИИ
ФОТОПРОТЕИНОВ ОБЕЛИНА И АКВОРИНА**

**Рогова А.В.^{1,2}, Щугорева И.А.², Томилин Ф.Н.^{1,2,3},
Маликова Н.П.⁴, Еремеева Е.В.^{1,4}, Высоцкий Е.С.⁴**

¹Университет СФУ, г. Красноярск, Россия

²Красноярский научный центр ФИЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

³Институт физики им. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

⁴Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

arogova1927@gmail.com

Смоделированы апофотопротеины при различных рН: 5, 6, 7, 9. Поскольку электростатические взаимодействия в значительной степени зависят от состояния протонирования остатков, рН влияет на конформацию апообелина/апоакворина. Проведена молекулярная динамика апофотопротеиновых комплексов с различными верифицированными ранее формами субстрата (целентеразина). Проведена интерпретация экспериментальных данных.

Ключевые слова: апофотопротеины, молекулярная динамика, fragment molecular orbital (FMO).

Обелин и акворин принадлежат к семейству Ca^{2+} -связывающих фотопротеинов, проявляющих биолюминесценцию. Сравнение акворина и обелина показывает высокое структурное сходство между фотопротеинами. Молекулярная структура фотопротеинов определяет их функцию и зависит от многих факторов: молекулярного окружения, температуры, рН раствора, сольватированных ионов и др. Компьютерное моделирование помогает создавать молекулярные модели в условиях реального раствора, определить конформационные изменения аминокислот. Так, значения рК ионизируемых групп в аминокислотах могут различаться между свободными аминокислотами и аминокислотными остатками в полипептидах под влиянием нескольких факторов: в полипептиде на ионизируемые группы влияют соседние остатки (заряженные группы) и общая трехмерная структура белка. Это может привести к различным электростатическим взаимодействиям и водородным связям, которые стабилизируют или дестабилизируют ионизированную форму, влияя на значение рК [1].

На основе структурной информации можно планировать рациональные мутации для инженерии свойств фотопротеина, модуляции цвета биолюминесценции, кинетики вспышки, чтобы применить их в аналитических методах. На сегодняшний день синтезированы мутантные белки с различными субстратами, которые показали большую стабильность и более высокую эмиссию света, чем нативный аналог [2].

Проведено структурное исследование влияния рН на образование активного фотопротеина – обелина и акворина с помощью теоретических и экспериментальных методов. Для проверки гипотезы о том, что анионная форма играет большую роль в формировании фотопротеина и о влиянии рН на скорость реакции зарядки в работе применяли методы молекулярной динамики (МД). С помощью МД возможно получение близких к реальным атомным структурам белков при конкретной температуре и рН, а также распределение заряда на поверхности, что может помочь при интерпретации экспериментальных данных. При этом благодаря МД можно анализировать влияние рН на третичную форму белков и субстратов. Также данное моделирование может помочь при постановке задачи при расчёте кинетики реакций. Изучены оптические свойства аниона целентеразина в аминокислотном окружении белка. Рассчитаны спектры поглощения аниона целентеразина в обелине с помощью FMO-TD/CAM-B3LYP/6-31Gs/PCM метода. Максимум спектра поглощения субстрата в полости обелина составил 397 нм. Данное значение соответствует второму пику поглощения (400 нм) активного обелина.

[1] Gitlin I., Carbeck J.D., Whitesides G.M., *Angewandte Chemie International Edition*, **45**, №19, 3022-3060, (2006).

[2] Loening A.M., Wu A.M. and Gambhir S.S., *Nat. Method*, **4**, №8, 641-643, (2007).

**ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ЛЕЧЕНИЮ ГНОЙНЫХ АБСЦЕССОВ:
АНТИМИКРОБНАЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕРАПИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРАСНОГО И ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И ОПТИЧЕСКОГО ПРОСВЕТЛЕНИЯ БИОТКАНЕЙ**

**Мусаелян А.Г.^{1,2}, Грицай У.О.², Напшева А.М.²,
Тучина Е.С.¹, Тучин В.В.¹, Алипов В.В.²**

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

²Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского, г. Саратов, Россия
musaelyan.gagik@mail.ru

В работе предложен новый подход к лечению гнойных абсцессов мягких тканей – комплексная антимикробная фотодинамическая терапия и оптическое просветление ткани для повышения проникающей способности излучения.

Ключевые слова: фотодинамическая терапия, гнойный абсцесс, фотосенсибилизаторы.

Антимикробная фотодинамическая терапия (АФДТ) — инновационный метод борьбы с инфекциями, эффективный как против чувствительных, так и против устойчивых к антибиотикам бактерий. Данный метод доказал может быть применен, в том числе, и для лечения глубоких абсцессов мягких тканей. Однако существует ограничение: биологические ткани слабо поглощают и хорошо рассеивают свет в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. В данном исследовании была поставлена цель повысить эффективность АФДТ с использованием метода оптического просветления биологических тканей в ходе лечения моделированного гнойного абсцесса у лабораторных крыс.

Исследования проводились на 16 крысах-самках породы «стандарт» массой 200±50 г с абсцессами, моделированными по описанному ранее методу [1]. Лабораторные животные содержались в регламентированных условиях вивария, проведение экспериментов осуществлялись согласно основным морально-этическим принципам проведения биомедицинских экспериментов на животных. Изучали действие таких фотодинамических красителей как: 0,0001% метиленовый синий (МС), 0,1% индоцианин зеленый (ИЗ) в сочетании с 0,24% раствором интралипид. Для облучения использовали в первом случае источник светодиодного красного (СКИ, 660 нм) излучения, во втором случае – источник лазерного инфракрасного (ЛИК, 808 нм) излучения. Для обработки кожи в области ГА использовали оптически-просветляющий агент (ОПА) - смесь глицерина, ДМСО и воды в объемных долях 70% : 5% : 25%, соответственно [2]. Животных делили на 5 групп: 1) контроль без обработки и облучения, 2) обработка полости ГА фотосенсибилизатором, 3) обработка ГА излучением, 4) обработка ГА фотосенсибилизатором и облучением, 5) обработка кожи над ГА с помощью ОПА, обработка полости ГА фотосенсибилизатором и излучением. Облучение области ГА животным 3-й, 4-й и 5-й групп проводили по 15 мин в течение 10 дней, начиная с пятых суток после формирования ГА. Параллельно проводили забор 0,1 мл содержимого полости ГА для посева на питательную среду (ГРМ-агар) и оценки бактериальной обсемененности. В 1 и 15 день эксперимента проводился забор крови у экспериментальных животных для общего и биохимического анализа. По завершении эксперимента образцы ткани в области ГА иссекали для гистологического анализа.

В ходе исследования показано, что использование светодиодного красного (660 нм) излучения и метиленового синего для чрескожной обработки ГА снижает обсемененность инфильтрата на 5,5 log₁₀КОЕ после 5 сеанса и на 7 log₁₀КОЕ после 10 дней лечения для животных 4-й группы. Для животных 5 группы показатели в ходе терапии СКИ+МС были следующие: снижение обсемененности на 6 log₁₀КОЕ после 5 сеанса, на 7,6 log₁₀КОЕ после 10 сеанса. Использование лазерного инфракрасного (808 нм) излучения и индоцианина зеленого обеспечивало несколько более выраженную редукцию числа бактериальных клеток в экссудате. Для животных 4-й группы после воздействия ЛИК+ИЗ обсемененность инфильтрата снижается на 6,2 log₁₀КОЕ после 5 сеанса и на 7,1 log₁₀КОЕ после 10 сеанса. Для животных 5-й группы показано снижение обсемененности на 6,5 log₁₀КОЕ после 5 сеанса и на 7,8 log₁₀КОЕ после 10 сеанса.

При анализе таких параметров как лейкоцитарная формула, СОЭ и содержание в крови С-реактивного белка было показано, что АФДТ обеспечивала снижение уровня воспалительного процесса. Ежедневное облучение способствовало восстановлению средней концентрации гемоглобина в эритроците, а также восстановлению нарушения функциональной активности тромбоцитов. При анализе гистологических срезов выявлено существенное сокращение объема ГА у животных группы 3 к 10 дню эксперимента, у животных групп 4 и 5 показана полная редукция полости ГА. Лучшие показатели – скорость снижения бактериальной нагрузки, редукция абсцесса, восстановление нормальных значений показателей крови – отмечены на 10 день для 4 и 5 группы животных.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №25-24-00370 от 28.12.2024 г.

**КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
СУСПЕНЗИИ ВНЕКЛЕТОЧНЫХ ВЕЗИКУЛ**

Окотруб К.А.¹, Омельченко А.Н.¹, Суровцева М.А.², Суровцев Н.В.¹

¹ИАиЭ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²НИИКЭЛ – филиал ИЦиГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

okotrub@iae.nsk.su

Доклад посвящен исследованию возможностей спектроскопии комбинационного рассеяния света для изучения свойств искусственных везикул и природных субмикронных частиц, формируемых биологическими клетками.

Ключевые слова: комбинационное рассеяние света, везикулы, оптический пинцет.

Внеклеточные везикулы представляют значительный научный интерес в контексте изучения механизмов межклеточной коммуникации, а также в качестве перспективных биомаркеров для диагностики патологических состояний [1]. Однако внеклеточные везикулы характеризуются выраженной гетерогенностью, проявляющейся в вариабельности их размеров, молекулярного состава (липидов, белков и нуклеиновых кислот) и биогенеза. Большинство существующих экспериментальных методов позволяют анализировать лишь усреднённые параметры частиц в суспензии, в то время как для детальной характеристики популяции внеклеточных везикул требуется определение распределения их физико-химических и функциональных свойств. Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) — это перспективный метод, не требующий пробоподготовки и позволяющий получать не только усреднённые данные о свойствах внеклеточных везикул, но и анализировать распределение этих свойств в суспензии. При исследовании внеклеточных везикул комбинационное рассеяние света (КРС) применяется в основном для изучения концентрированных везикул и везикул, осаждённых на SERS-подложках [2]. При высоких интенсивностях возбуждающего излучения метод комбинационного рассеяния света позволяет исследовать сравнительно слабоконцентрированные суспензии везикул, концентрирование которых в перетяжке происходит благодаря эффекту оптического пинцета [3].

В настоящей работе рассматриваются методические аспекты проведения экспериментов по регистрации спектров комбинационного рассеяния света (КРС) от везикул, захваченных в оптический пинцет. На первом этапе эксперименты проводились с суспензиями модельных везикул дипальмитоилфосфатидилхолина диаметром 1 мкм и 100 нм. Установлен оптимальный диапазон концентраций частиц в суспензии, обеспечивающий возможность КРС-анализа отдельных или нескольких везикул. Экспериментально изучено влияние апертуры микрообъектива на скорость захвата частиц, характерное время удержания, а также на максимальное количество одновременно удерживаемых везикул. Показано, что, хотя при использовании масляно-иммерсионного объектива в измеряемые спектры КРС вносится вклад от иммерсионного масла, он не является критическим для исследования одиночных 100 нм везикул. Проведено сравнительное исследование с использованием возбуждающего излучения различной интенсивности, поляризации и двух длин волн - 532 нм и 780 нм.

На втором этапе метод КРС с оптическим пинцетом был применен для анализа суспензии частиц, выделенных из кондиционной среды методом ультрафильтрации. Исследованы средние спектры суспензии и их вариации. Полученные результаты сравниваются с результатами КРС спектроскопии осажденных везикул.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-24-00516).

[1] Kalluri R., McAndrews K.M., *Cell*, **186**, 1610-1626, (2023).

[2] Li J., Li Y., Li P., Zhang Y., Du L., Wang Y., Zhang C., Wang C, *Acta Biomaterialia*, **144**, 1-14, (2022).

[3] Kruglik S.G., Royo F., Guigner J.M., Palomo L., Seksek O., Turpin P.Y., Tatischeff I., Falcón-Pérez J.M., *Nanoscale*, **11**, 1661-1679, (2019).

ЛАЗЕРНОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК
ДЛЯ МАГНИТНОЙ БИОСЕНСОРИКИ

Джунь И.О.^{1,2}, Шулейко Д.В.², Назаров А.В.^{1,2}, Преснов Д.Е.², Перова Н.Н.²,
Нестеров В.Ю.², Ромашкина И.Л.¹, Козин М.Г.¹, Чеченин Н.Г.^{1,2}, Заботнов С.В.²

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, НИИЯФ, Москва, Россия

²МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

dzhun@sinp.msu.ru

В работе показана возможность применения технологий импульсного лазерного структурирования тонких магнитных пленок для создания компонентов магнитных биосенсоров с улучшенным пределом обнаружения.

Ключевые слова: импульсная лазерная абляция, магнитные нанопленки.

Для ранней диагностики заболеваний активно разрабатываются и выпускаются различные портативные персональные устройства для контроля состояния здоровья и *in vitro* самодиагностики. Перспективной основой таких устройств выступают так называемые лаборатории на чипе – миниатюрные устройства, которые могут, используя каплю биологической жидкости отделить требуемые аналиты и осуществить их подсчет. Для использования в такой технологии интерес представляют магнитные биосенсоры (МБС), детектирующие магнитное поле рассеяния магнитных меток, связанных с требуемыми аналитами. Поскольку на ранних стадиях заболеваний концентрация аналитов низкая, важным вопросом является улучшение предела обнаружения МБС. В данной работе для этой цели используются технологии импульсного лазерного структурирования тонких пленок в трех различных направлениях, способствующих созданию магнитных меток и улучшению захвата и удержания их на поверхности МБС: (1) использование импульсной лазерной абляции в жидкости для получения магнитных наночастиц (МНЧ), (2) импульсное лазерное структурирование для формирования рельефа поверхности МБС, (3) импульсное лазерное микромагнитное структурирование без сопутствующего изменения рельефа поверхности.

Показано, что ИЛА тонких пленок Со в воде позволяет получать МНЧ на основе оксида Co_3O_4 . Распределение полученных МНЧ по размерам существенно зависит от толщины используемой пленки. Так, при абляции пленок толщиной ниже скин-слоя достигается двукратное уменьшение дисперсии [1]. Также показана возможность синтеза МНЧ вида ядро-оболочка Fe@FeO при ИЛА тонких 250 нм пленок железа в ацетоне. Кроме того, данный метод позволил также получить МНЧ на основе Fe и Со путем использования в качестве мишени как пленки $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$, так и двухслойных мишеней Со/Fe и Fe/Со.

Для формирования периодического рельефа поверхности элемента МБС использовалась технология фемтосекундного лазерного структурирования кремниевой подложки с последующим осаждением структуры вида Ta30нм/NiFe10нм/IrMn10нм/Ta15нм. Методом атомно- и магнитосиловой микроскопии показано наличие рельефа поверхности и соответствующее появление вертикальной компоненты намагниченности. Методом магнитооптического эффекта Керра (МОЭК) показано наличие обменного смещения в структурированной области, что обеспечивает потенциальную работоспособность полученного таким образом МБС. Осаждение на образец капли коллоида МНЧ Fe@FeO привело к скоплению МНЧ в рельефной области [2].

Микромагнитное структурирование образца Si/Ta30нм/NiFe10нм/IrMn10нм/Ta15нм осуществлялось путем облучения фемтосекундными лазерными импульсами в присутствии внешнего магнитного поля, приложенного перпендикулярно плоскости образца. На рисунке представлены МОЭК (слева) и СЭМ (справа) изображения образца. Как видно из рисунка, реализован режим, позволяющий локально изменять конфигурацию намагниченности образца без сопутствующего изменения рельефа поверхности, что также необходимо в дизайне МБС для захвата и удержания магнитных меток.

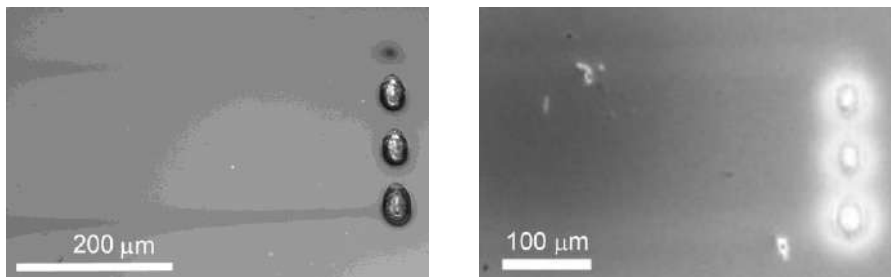


Рисунок. МОЭК (слева) и СЭМ (справа) изображения образца после облучения фс импульсами в присутствии магнитного поля

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 25-29-00176, <https://rscf.ru/project/25-29-00176/>.

[1] Dzhun I., Nesterov V., Shuleiko D., et al., *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **88**, 540-548, (2024).

[2] Dzhun I.O., Shuleiko D.V., Nazarov A.V., et al., *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.*, **88**, S166-S173, (2024).

**ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРОСВЕТЛЕНИЯ НА ИЗМЕРЕНИЯ
МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ МЕТОДОМ
ЦИФРОВОЙ КАПИЛЛЯРОСКОПИИ**

**Луговцов А.Е.¹, Мольдон П.А.¹, Максимов М.К.¹,
Гурфинкель Ю.И.¹, Тимошина П.А.², Тучин В.В.², Приезжев А.В.¹**

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²СГУ имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

anlug@biomedphotonics.ru

Исследована эффективность оптического просветления и влияние оптических просветляющих агентов, используемых для увеличения глубины зондирования при визуализации капилляров ногтевого ложа методом цифровой капилляроскопии, на агрегацию, деформируемость клеток крови и ее микроциркуляцию.

Ключевые слова: оптическое просветление, микроциркуляция, капилляроскопия.

Метод оптического просветления (ОП) биологических тканей активно развивается в последние десятилетия [1]. С развитием методов биофотоники его все активнее стали применять для диагностики в комбинации с известными лазерно-оптическими методами, такими как спекл-контрастная визуализация, микроскопия, цифровая капилляроскопия и оптическая когерентная томография (ОКТ). Метод ОП основан на использовании оптических просветляющих агентов (ОПА), которые снижают относительный показатель преломления оптических неоднородностей в биотканях и на границах раздела сред за счет проникновения ОПА внутрь тканей при их поверхностном нанесении. В результате снижается коэффициент рассеяния биоткани, которую исследуют [2]. Для неинвазивного мониторинга состояния капиллярного кровотока используется метод неинвазивной диагностики микроциркуляции крови – цифровая капилляроскопия [3]. Данная методика основана на оптической микроскопии капилляров на поверхности кожи и используется совместно с ОП, что позволяет визуализировать капиллярный кровоток в подкожных слоях на больших глубинах.

В работе мы демонстрируем визуализацию капилляров ногтевого ложа человека методами ОП и цифровой капилляроскопии, что может быть применено для диагностики нарушений кровообращения пациентов с социально-значимыми заболеваниями. Несмотря на положительный эффект от ОП по увеличению глубины зондирования капилляров методом капилляроскопии, ОПА из-за своей осмотической активности, проникая в ткани и кровь, могут вызывать и нежелательные эффекты. Например, ОПА могут изменить свойства агрегации эритроцитов и тромбоцитов, деформируемость эритроцитов, что безусловно скажется на вязкости и течении крови в терминальных капиллярах [3]. Также ОПА могут повлиять и на сами стенки капилляров и клетки эндотелия, которыми покрыты сосуды. Все это может изменить параметры капиллярного кровотока, который измеряется локально, внося погрешности в результаты измерений, получаемые методом цифровой капилляроскопии.

Эффективность просветления кожи ногтевого ложа 11 различными ОПА (глицерин, диметилсульфоксид, пропиленгликоль, кедровое масло, рентгеноконтрастные и магниторезонансные вещества и их комбинации) была протестирована с помощью метода ОКТ на основе измерения коэффициента экстинкции света при нанесении агентов поверхностно на кожу. Наибольший эффект оптического просветления кожи ногтевого ложа наблюдался на глубине 0–50 мкм при использовании рентгеноконтрастного – агента визипак совместно с вспомогательными веществами (диметилсульфоксид, пропиленгликоль). Для данного диапазона глубин наблюдалось снижение коэффициента экстинкции света на $30 \pm 11\%$, что характеризует уменьшение коэффициента рассеяния кожи. Методами лазерной агрегометрии и дифрактометрии показано, что ОПА влияют на агрегацию клеток крови и их деформируемость, а эффект зависит от концентрации [4]. Скорость капиллярного кровотока, измеренная с помощью цифровой капилляроскопии *in vivo*, также зависят от используемых ОПА и времени, прошедшего после их нанесения. Представленные в докладе данные показывают необходимость проведения корректировки результатов измерений методом капилляроскопии и демонстрируют перспективы различных ОПА для качественной визуализации капилляров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-45-00027).

[1] Tuchin V., Zhu D., Genina E., Handbook of Tissue Optical Clearing: New Prospects in Optical Imaging, CRC Press, (2022).

[2] Genina E. et al., *Journal of Biomedical Science and Engineering*, **1**, 22-58, (2015).

[3] Lugovtsov A. et al., *Biomedical Optics Express*, **10**, 3974-3986, (2019).

[4] Moldon P.A. et al., *Journal of Biophotonics*, e202300524, (2024).

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОТКАНЕЙ
В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ САХАРНОГО ДИАБЕТА**

Лазарева Е.Н.¹, Бучарская А.Б.^{1,2}, Тучин В.В.^{1,3,4}

¹СГУ, г. Саратов, Россия

²СГМУ им. С.И. Разумовского, г. Саратов, Россия

³ТГУ, г. Томск, Россия

⁴ГУП ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова, г. Саратов, Россия

lazarevaen@sgu.ru

Показано сравнение рефрактометрических свойств кожи, мышечной ткани и миокарда крысы в норме и при развитии сахарного диабета. Полученный результат позволяет рассмотреть показатель преломления в качестве маркера для патологических тканей.

Ключевые слова: показатель преломления, ткань, сахарный диабет.

Ранняя диагностика сахарного диабета является одной из актуальных проблем для всего населения мира в настоящее время [1]. Активно проводятся многочисленные исследования, посвященные поиску новых эффективных неинвазивных или малоинвазивных способов диагностики и лечения сахарного диабета. Изучается влияние сахарного диабета на различные свойства и функционирование биологических тканей и органов с помощью различных методов, а также широкое распространение получили оптические методы [1, 2]. Поскольку структура и оптические свойства биологической ткани меняются с развитием патологии, то несколькими исследовательскими группами было предложено использовать показатель преломления в качестве маркера для дифференциации нормальной и патологической биологических тканей, в том числе экспериментального диабета у животных [3-6].

В настоящей работе экспериментальный сахарный диабет был смоделирован на аутбредных белых крысах-самцах путем внутримышечного введения аллоксана тетрагидрата («LaChema», Чехия). Модель диабета воспроизводили путем внутримышечного введения аллоксана в дозе 90 мг/кг через 6 ч после голодания. В качестве группы сравнения использовали животных без какого-либо воздействия. Через 2 недели после введения аллоксана измеряли уровень глюкозы у крыс в крови с помощью глюкометра (Акку-Чек Перформа Нано, Германия). Рефрактометрические измерения проводили на многоволновом рефрактометре Аббе DR-M2/1550 (Atago, Япония) на длинах волн 480, 486, 546, 589, 644, 680, 930, 1100, 1300 и 1550 нм.

По полученным результатам величина показателя преломления в видимом и БИК спектральных диапазонах увеличивалась для патологических тканей. Например, для длины волны 589 нм измеренный показатель преломления кожи крысы со стороны дермы в норме равен 1.3726 ± 0.0124 , мышечной ткани - 1.3782 ± 0.0074 , миокарда - 1.3918 ± 0.0218 , в то время как, при развитии патологии величина показателя преломления была равна 1.3812 ± 0.0082 , мышечной ткани - 1.3914 ± 0.0064 , миокарда - 1.3972 ± 0.0108 . Это может объясняться протеканием процесса гликирования тканей, изменением их структуры, в частности повышением её плотности [1]. Данные результаты могут служить хорошей основой для дальнейших исследований и развития оптических методов диагностики сахарного диабета, основанных на различиях нормального и гипергликемического состояний тканей.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-14-00287.

[1] Chen M., Shen Y., Zhu J., Su T., Zhang Y., Wang W., Chen C., Zhou L., *J Biophotonics*, **22**, e202400267, (2024).

[2] Wang Z., Tangella K., Balla A., Popescu G., *J. Biomed. Opt.*, **16**, №11, 116017, (2011).

[3] Khan R., Gul B., Khan S., Nisar H., Ahmad I., *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **33**, 102192, (2021).

[4] Giannios P., Koutsoumpas S., Toutouzas K., Matiatou M., Zografos G., Moutzouris K., *J. Biophotonics*, **10**, №2, 303-310, (2017).

[5] Matiatou M., Giannios P., Koutsoumpas S., Toutouzas K., Zografos G., Moutzouris K., *Results in Physics*, **22**, 103833, (2021).

[6] Martins I.S., Silva H.F., Lazareva E.N., Chernomyrdin N.V., Zaytsev K.I., Oliveira L.M., and Tuchin V.V., *Biomed. Opt. Express.*, **14**, 249-298, (2023).

ЛИНЗОВАННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА ДЛЯ ЗАДАЧ БИОФОТОНИКИ

Пономарев Р.С., Жуков Л.О., Паньков А.С.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
kuperok2003@mail.ru

Разработана серия линзованных оптических волокон для формирования точки диаметром менее 1 мкм и применения в задачах оптогенетики и доведения излучения в нужном состоянии в нужное место в биологических тканях.

Ключевые слова: линзованные оптические волокна, оптогенетика, диаметр поля моды.

Оптические волокна широко используются в биофотонике для точной доставки и сбора светового сигнала в биологических тканях. Благодаря своей гибкости и миниатюрным размерам они позволяют проводить малоинвазивные диагностические и терапевтические процедуры, такие как флуоресцентная спектроскопия, оптическая когерентная томография (ОКТ) и лазерная терапия [1]. Например, волоконные зонды применяются для детекции опухолевых маркеров *in vivo*, что значительно повышает точность ранней диагностики рака [2]. В оптогенетике оптические волокна играют ключевую роль для активации или подавления нейронов с помощью света. Тонкие и биосовместимые волоконные имплантаты обеспечивают точную доставку света к целевым нейронным популяциям в глубоких слоях мозга, что позволяет изучать нейронные сети и разрабатывать методы лечения неврологических заболеваний [3]. Современные технологии, такие как многомодовые волокна с градиентным показателем преломления, минимизируют тепловое повреждение тканей и повышают эффективность стимуляции [4]. Это открывает новые перспективы в лечении болезни Паркинсона, эпилепсии и депрессии.

В рамках работы предложена технология формирования микролинз на торце оптического волокна, позволяющих фокусировать излучение в току диаметром менее 1 мкм, а также система фиксации и перемещения формируемых линзованных оптических волокон с точностью перемещение не хуже 0,5 мкм. Ход излучения в линзованном оптическом волокне моделировался в среде Comsol Multiphysics, с помощью которой был определен оптимальный тип волокна для целевой длины волны, геометрия микролинзы и ожидаемые оптические параметры – диаметр поля моды, рабочее расстояние, апертура и уровень оптических потерь. Микрофотография изготовленного линзованного оптического волокна приведена на рисунке.

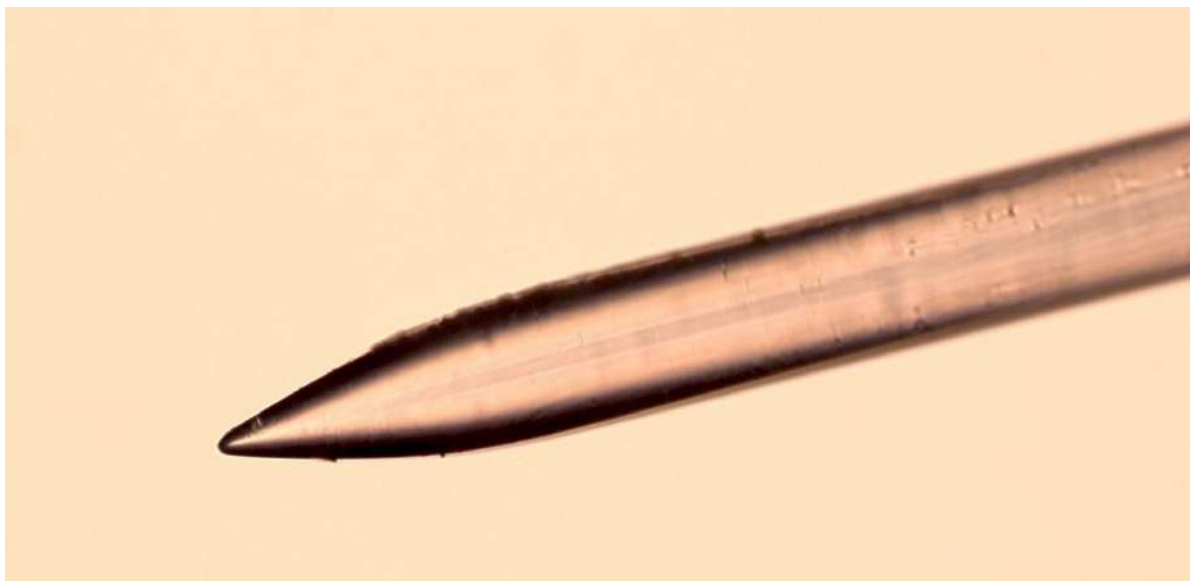


Рисунок. Внешний вид микролинзы, сформированной на торце оптического волокна

Исследование диаметра поля моды образцов линзованных оптических волокон проводилось в дальнем поле с помощью ИК-камеры Ophir Spiricon, а в ближнем поле с помощью поперечного сканирования одного оптического волокна с помощью другого при поперечном смещении. Для исследования фокусного расстояния применялся метод интерферометра Фабри-Перо, позволяющий определить фокусное расстояние по максимуму интерференционной функции. Предложенная система была испытана для возбуждения нейронов в биологических образцах мозга лабораторной мыши.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ №24-91-21001.

[1] Pisanello F. et al., *Nature Neuroscience*, **22**(7), 1097-1103, (2019).

[2] Yun S.H., Kwok S.J.J., *Nature Biomedical Engineering*, **1**(1), 1-16, (2017).

[3] Villette V. et al., *Cell*, **179**(7), 1590-1608, (2019).

[4] Anikeeva P., Kravitz A.V., *Nature Methods*, **16**(9), 811-813, (2019).

**СВЕТ ДЛЯ ЦВЕТА: ОБЛУЧЕНИЕ UV-B ПЕРЕД УБОРКОЙ УСИЛИВАЕТ
КРАСНЫЙ ОТТЕНОК САЛАТА НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФЕРМЕ**

**Тимофеев И.А.¹, Пашковский П.П.², Верещагин М.В.², Слепцов Н.Н.³,
Малышева В.В.¹, Драничникова Е.А.¹**

¹ФГАОУ ВО СФУ, Институт гастрономии, Междисциплинарная лаборатория сити-фермерства,
г. Красноярск, Россия

²Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева, РАН, Москва, Россия

³Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева,
Москва, Россия
ivan@timofeev.com

В эксперименте оценена возможность фазовой коррекции LED-освещения для усиления красной пигментации салата-латука *L. sativa* cv. Lollo rosso, выращиваемого в вертикальных системах.

Ключевые слова : красная пигментация, ультрафиолет б, сити-фермерство.

Салат-латук (*Lactuca sativa* L.) является одной из наиболее экономически важных листовых овощных культур в мире [1] благодаря короткому вегетационному циклу, высокой пищевой ценности и устойчивому потребительскому спросу. Исследование [2] показало, что зрительная привлекательность салатных смесей определяется прежде всего яркостью и контрастностью цвета: наиболее выигрышными оказались комплементарные сочетания красного и зелёного либо светлого и тёмного, однако добиться интенсивной красной пигментации салата-латука, выращенного на вертикальных установках на городских фермах, сложно, поскольку в стандартных рецептурах светодиодов часто не хватает длин волн высокой энергии, которые запускают синтез антоцианов.

Цель исследования — определить, может ли стратегия освещения в зависимости от фазы роста — включение насыщенного синего света в середине роста и кратковременный импульс УФ-Б [3] излучения в конце роста — усилить красную окраску салата *L. sativa* без ущерба для урожайности.

Растения культивировали в течение тридцати восьми дней в камерах с контролируемой средой (с шестнадцатичасовым фотопериодом при температуре (22/18°C). Сравниваются четыре последовательности освещения с одинаковой общей плотностью светового потока на уровне листьев 280 мкмоль/с*м²: (I) белый (R,G,B) = (43%,43%,14%) на всем протяжении (контроль); (II) белый (43%,43%,14%) в течение 21 дня и с 22 дня белый с повышенным содержанием синего (36%,32%,32%); (III) белый (43%,43%,14%) до 35 дня и белый (43%,43%,14%) + УФ-Б 30 мВт/м² с 36 по 38 день и (IV) белый (43%,43%,14%) в течение 21 дня, с 22 дня белый с повышенным содержанием синего (36%,32%,32%) с 21 по 35 день и (43%,43%,14%) +УФ-Б 30 мВт/м² с 36 по 38 день. Газообмен, визуализация флуоресценции хлорофилла, биомасса, пигментный состав, общее содержание фенолов (фоллиевой кислоты) были оценены на ключевых этапах исследования в рандомизированном блочном формате с использованием многофакторного анализа ANOVA.

Визуальный осмотр (рисунок) и ранние биохимические анализы показали, что комбинированная обработка белым + УФ-Б в последние 36 часов способствовала более глубокому красному оттенку, в то время как масса в свежем виде и эффективность фотосинтеза оставались сопоставимыми с показателями в контроле. Сам по себе УФ-Б усиливает пигментацию, но проявляет признаки слабого фотоингибирования; обогащение синим цветом само по себе поддерживает стабильность фотосистемы, но приводит лишь к умеренному улучшению цвета.

Ожидается, что полный набор данных, который будет представлен в ближайшее время, подтвердит, что включение короткого импульса УФ-Б для финишной обработки в светодиодную программу, предназначенную для конкретного этапа, обеспечивает практичное, масштабируемое решение для выращивания ярко окрашенного, богатого антиоксидантами красного салата-латука на вертикальных фермах в помещении. Этот протокол может быть с готовностью принят коммерческими производителями, стремящимися к высокому визуальному и функциональному качеству без ущерба для производительности.

Исследование выполнено за счет гранта Минобрнауки России № 075-15-2024-682.



Рисунок. Слева (III) после предуборочного облучения УФ-Б в течение 36 часов, справа (I) без УФ-Б

[1] Shatilov M.V., Razin A.F., Ivanova M.I., *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **395**, 012053, (2019).

[2] Paakki M., Sandell M., Hopia A., *Food Qual. Prefer.*, **76**, 81-90, (2019).

[3] Zhang H., He H., Song W., Zheng L., *Horticulturae*, **9**, 695, (2023).

ИИ В ФОТОНИКЕ

БИНАРНЫЕ НЕЙРОМОРФНЫЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИТОННЫХ РЕШЁТОК

Седов Е.С.^{1,2,3}, Кавокин А.В.^{1,2}

¹Московский физико-технический институт, Международный центр теоретической физики
им. А.А. Абрикосова, г. Долгопрудный, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Россия
evgeny_sedov@mail.ru

Теоретически предложена аппаратная реализация бинарной нейронной сети на основе поляритонных решёток. В роли нейронов выступают пары когерентных экситон-поляритонных конденсатов с оптически управляемым взаимодействием между ними.

Ключевые слова: поляритонный конденсат, интерференция, нейросеть.

Стремительное развитие искусственных нейронных сетей обусловлено растущими требованиями к эффективности обработки данных. Однако традиционные аппаратные реализации таких сетей ограничены скоростью вычислений и энергоэффективностью. Перспективной альтернативой являются сети на основе экситонных поляритонов — квазичастиц, возникающих в результате сильного взаимодействия фотонов и экситонов в полупроводниковых микрорезонаторах [1-4]. Поляритонные системы демонстрируют выраженную нелинейность и сверхбыструю (пикосекундную) динамику, что делает их подходящими для нейроморфных вычислений. Отдельный интерес представляют бинарные нейросети, используют бинарные веса, что упрощает вычисления, увеличивает скорость и снижает энергопотребление.

В работах [1, 2] предложена нейронная сеть, реализованная на основе решётки экситон-поляритонных конденсатов, формируемых под воздействием нерезонансной оптической накачки (рисунок а). Каждый нейрон представляет собой диаду — пару взаимодействующих конденсатов. Нейрон функционирует как бинарный гейт: он может находиться в состояниях ON либо OFF, которые определяются чётностью интерференционной картины, формирующейся между конденсатами в диаде (рисунок б). В состоянии OFF (ON) интерференционная картина имеет минимум (максимум) интенсивности в центре диады, что даёт слабый (сильный) сигнал фотолюминесценции — выходной сигнал. Состоянием диады можно управлять, модифицируя форму эффективного потенциала, в частности, оптически воздействуя на экситонный резервуар. Решёточная структура сети обеспечивает параллельную обработку сигналов, что является преимуществом по сравнению с бинарными сетями с последовательным кодированием [4]. Модульная архитектура обеспечивает широкие возможности масштабирования сети.

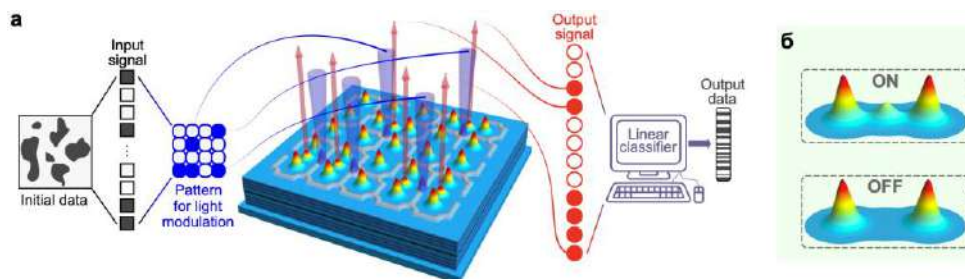


Рисунок. (а) Схема работы поляритонной нейросети. Исходные данные оцифровываются и бинаризуются, формируя входной сигнал. Этот сигнал используется в качестве паттерна для оптического возбуждения искусственных нейронов. Результат обрабатывается линейным классификатором.

(б) Поляритонные диады с чётной (OFF) и нечётной (ON) интерференционными картинами

Предложенная сеть была протестирована на двух задачах: распознавании рукописных цифр из базы данных MNIST и распознавании голосовых команд из набора Speech Commands. В первой задаче достигнута точность классификации 97.5%, что превосходит ранее полученные результаты для поляритонных нейроморфных систем. Во второй задаче точность составила 68%, что превышает результаты, полученные с использованием традиционных методов, таких как скрытые марковские модели с гауссовыми смесями (HMM-GMM). Это подчёркивает универсальность предлагаемой системы при работе с разными типами данных.

Авторы благодарят СПбГУ за финансовую поддержку в рамках гранта № 125022803069-4, а также государственное задание в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0019, госзадание ВлГУ).

[1] Sedov E., Kavokin A., *Light: Science & Applications*, **14**, 52, (2025).

[2] Sedov E., Kavokin A., *Phys. Rev. Applied*, **23**, 044013, (2025).

[3] Ballarini D. et al., *Nano Lett.*, **20**, 3506-3512, (2020).

[4] Mirek R. et al., *Nano Lett.*, **21**, 3715-3720, (2021).

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Соколов М.С., Краснов Д.И., Хуссейн А.

Университет ИТМО, Институт Лазерных Технологий, Санкт-Петербург, Россия

mikhail.sokolov@itmo.ru

Машинное обучение позволяет в режиме реального времени неразрушающим способом обнаруживать неполное проплавление при лазерной сварке.

Ключевые слова: лазерная сварка, оценка качества, машинное обучение.

В условиях активного расширения применения лазерной сварки в промышленности возрастает необходимость разработки новых методов обеспечения стабильного качества сварных соединений при производстве крупногабаритных сборочных единиц. В данной работе предлагается интегрированный подход к контролю качества лазерной сварки, основанный на использовании методов искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа пространственно-временных данных, регистрируемых в процессе сварки.

Эксперименты проведены на образцах из низколегированной стали 09Г2С с применением волоконного лазера мощностью 3 кВт. Методология исследования включает два ключевых этапа. На первом этапе реализуется анализ макрошлифов с помощью сверточной нейронной сети U-net, позволяющий сегментировать сварной шов и выделять области потенциальных дефектов. На втором этапе рассматривается обработка временных и пространственно-временных сигналов, полученных в ходе сварки.

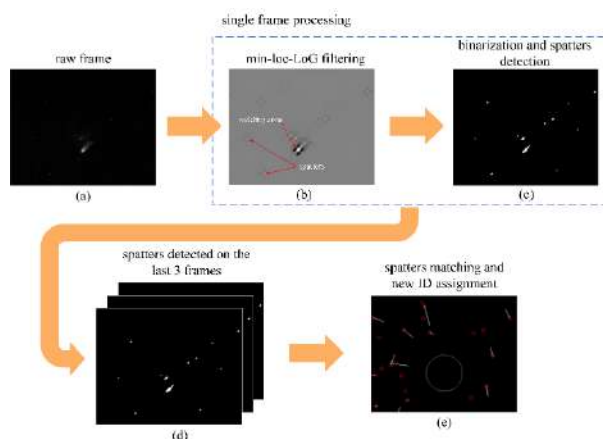


Рисунок. Методика анализа брызг

Для установления взаимосвязи между данными, полученными с помощью датчиков, и возникновением дефектов был использован широкий спектр методов машинного обучения [1]. Классические методы, такие как линейная регрессия, дерево решений (DT), случайный лес (RF), логистическая регрессия (LR) и градиентный бустинг (GB) по-прежнему широко используются в промышленных приложениях.

В рамках исследования были проверены методы, продемонстрировавшие эффективность методов RF в мониторинге глубины провара [2]. Помимо классических подходов, современные методы глубокого обучения (DL) предлагают превосходные возможности для обработки сложных высокоразмерных данных [3]. Путем анализа поведения брызг с помощью инфракрасной термографии (метод проиллюстрирован на рисунке) были извлечены пространственно-временные характеристики, такие как скорость, температура и скорость охлаждения, которые были использованы для обучения нескольких моделей. Наилучшие результаты были достигнуты с помощью GB, со средней точностью 0,78.

Предполагается, что дальнейшее развитие предложенного подхода обеспечит более точное управление параметрами процесса лазерной сварки и откроет возможности для создания автоматизированных систем адаптивного контроля качества на основе обратной связи.

[1] Lu R. et al., *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **137**, 109059, (2024).

[2] Zhao P. et al., *Journal of Laser Applications*, **32**, №2, 022037, (2020).

[3] Yu R. et al., *Journal of Manufacturing Processes*, **93**, 15-46, (2023).

ОСОБЕННОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОДАНЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ШАХТАХ, ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ВИДЕОАНАЛИТИКИ

Зайцева Е.В.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Zaytseva_EV@pers.spmi.ru

В работе рассмотрены особенности применения предварительной обработки видеоданных, полученных в шахтах, в режиме реального времени методами гистограммного выравнивания. Приведены количественные характеристики качества видеок кадров, такие как средний уровень яркости и *tenengrad*.

Ключевые слова: обработка изображений, видеоаналитика, горная промышленность.

Системы технического зрения, применяемые в шахтах и местах добычи ископаемых, традиционно относят к области обеспечения безопасности. Сейчас видеокамеры и системы видеонаблюдения зачастую используют для выявления неисправностей при работе оборудования на том или ином участке, расследовании инцидентов на предприятии. Однако развитие нейросетевых алгоритмов позволяет говорить об использовании машинного зрения для предотвращения инцидентов.

Особенный интерес вызывает поведенческая видеоаналитика, которая представляет собой взаимодействие нейросетей и классических подходов цифровой обработки изображений. Детекторы специфических поз, характерные для потенциально опасного поведения, могут быть использованы для предотвращения инцидентов. Например, отдельного внимания требует поза лежащего человека. Если в шахте кому-то стало плохо, можно успеть своевременно оказать помощь.

При проведении исследований следует учитывать, что условия видеонаблюдения в шахтах и местах выработки отличаются низким уровнем освещенности, запыленностью, повышенной влажностью. На рисунке (1) приведен пример видеок кадра, полученного в режиме реального времени из шахты с устройства оповещения со встроенной видеокамерой, разработанной компанией ООО НПФ «Гранч», объект съемки – группа людей [1].



1)



2)

Рисунок. Видеок кадры, полученные в шахте: 1 — исходный видеок кадр; 2 — обработанный видеок кадр

Как видно из рисунка (1) кадры отличаются низким уровнем контрастности, множество затемнённых участков. Для эффективной работы нейросетевых алгоритмов при распознавании персонала и особенностей их положения целесообразно провести предобработку видеоданных. В режиме реального времени хорошие результаты показывают гистограммные методы: адаптивное гистограммное выравнивание (CLAHE) и методы гистограммной подгонки [2]. Однако для их использования необходимо тщательно подобрать параметры обработки (порог контраста, форму гистограмму), которые оптимально подойдут для видеонаблюдения в шахтах. На рисунке (2) показан видеок кадр, обработанный методом CLAHE. Видеок кадр предварительно был переведен в формат HSV, в качестве формы гистограммы была выбрана колокольная функция, пороговый контраст выбран прямо пропорционально среднему уровню яркости. В качестве количественных характеристик качества возьмем средний уровень яркости (L) и *tenengrad* (T): у исходного кадра $L=45$, $T=144$, а у обработанного $L=69$, $T=150$. При заметном росте количественных показателей, методы гистограммного выравнивания можно использовать в режиме реального времени в качестве предварительной обработки. Полученные видеоданные далее поступают на вход нейросетевым алгоритмам и эффективность видеоаналитики возрастает.

[1] Новиков А.В., Паневников К.В., Писарев И.В., *Горная промышленность*, №5, 65-69, (2021).

[2] Зайцева Е.В., Кочнева А.А., Катунцов Е.В., Киба М.Р., *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*, 65, №1, 10-17, (2024).

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФАЗ МИНЕРАЛОВ ВО ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ
ПО СПЕКТРАМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ
МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ**

Мясникова А.С., Шендрик Р.Ю.

ИГХ СО РАН, г. Иркутск, Россия

sasham@igc.irk.ru

Спектроскопия КР сталкивается с проблемами идентификации минералов из-за перекрытия полос и шумов. Предложен веб-инструмент ArDI на основе нейронных сетей, эффективно анализирующий сложные спектры, включая перекрывающиеся полосы, что подтверждено на примере флюидных включений в кварце.

Ключевые слова: флюидные включения, комбинационное рассеяние, нейросеть.

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) представляет собой важный аналитический метод исследования минерального состава. Однако практическое применение КР-спектроскопии сталкивается с существенными методическими трудностями. Во-первых, многие минералы имеют схожие спектральные характеристики, что осложняет их дифференциацию. Во-вторых, анализ природных образцов затруднен из-за частого присутствия минеральных смесей, приводящего к перекрыванию спектральных полос. В-третьих, на качество спектров влияют такие факторы, как шумы оборудования и неидеальность условий измерений.

Актуальность разработки новых методов анализа КР-спектров обусловлена потребностями различных областей науки. В геологии это необходимо для оперативного анализа керна и шлифов, в планетологии – для обработки данных дистанционного зондирования, в материаловедении – для контроля состава сырья. Особое значение задача приобретает при исследовании уникальных образцов, когда количество материала ограничено.

Идентификация минералов с помощью спектроскопии КР, даже для отдельных фаз, сталкивается с методологическими проблемами. Классический подход, который моделирует спектры как линейные комбинации ссылок базы данных (полный профиль), хорошо работает для ИК-спектроскопии, но сталкивается с проблемами с данными комбинационного рассеяния. Во-первых, в базах данных часто отсутствуют спектры минерала во всех возможных кристаллографических ориентациях, что имеет решающее значение, поскольку положения и интенсивности полос зависят от угла падения лазерного луча и поляризации. Например, спектр комбинационного рассеяния одного минерала (кварца, оливина, корунда и т. д.) может значительно различаться в зависимости от ориентации кристалла относительно оптической оси [1]. Во-вторых, помехи от люминесценции или высокоинтенсивных примесных анионов (например, радикалов трисульфура) искажают сигнал, маскируя диагностические полосы целевого минерала. Версия ARDI [2] представила предварительные решения этих проблем, но последняя итерация значительно расширяет эти возможности. Реальные спектры дочерних минералов внутри включения обычно включают в себя колебательные полосы не только от самих дочерних минералов, но и от минерала-хозяина, соседних дочерних минералов и жидкостей включения. Это перекрытие является основной причиной трудностей, возникающих при идентификации дочерних минералов.

Методы глубокого обучения предлагают новые возможности для решения этих задач. В работе рассматриваются современные архитектуры нейронных сетей, наиболее эффективные для обработки спектральных данных. Основное внимание уделяется сверточным нейронным сетям, показавшим высокую эффективность в выделении спектральных особенностей, и моделям типа трансформер, способным анализировать глобальные зависимости в данных. Особый интерес представляет решение задачи разделения перекрывающихся полос в спектрах смесей.

Проведенные исследования демонстрируют, что современные подходы на основе нейронных сетей позволяют достигать высокой точности идентификации даже при анализе сложных многокомпонентных систем. Перспективные направления развития включают создание более эффективных архитектур и адаптацию методов глубокого обучения для работы с ограниченными наборами обучающих данных. В данной работе представлен веб-инструмент ArDI, который объединяет быстрые алгоритмы поиска (Faiss), сверточные нейронные сети и рекурсивное спектральное разложение для анализа сложных спектров комбинационного рассеяния. Используя в качестве примера флюидные включения в пегматитовом кварце, мы демонстрируем, что метод эффективно идентифицирует дочерние минералы (сассолит, раманит-(Rb)), даже когда их спектры перекрываются с доминирующими полосами кварца. Разработанный подход открывает новые возможности для неразрушающего анализа минеральных ассоциаций в микроскопических объектах.

[1] Nasdala L. et al., *Raman spectroscopy: Analytical perspectives in mineralogical research*, (2004).

[2] Шендрик Р.Ю., Плечов П.Ю., Смирнов С.З., *Новые данные о минералах*, **58**, 26-35, (2024).

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ
С ГОЛОГРАММ 3D-СЦЕН С ПРИМЕНЕНИЕМ
ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНОЙ НЕЙРОСЕТИ**

Кирий С.А.*, Свистунов А.С., Рымов Д.А., Черёмхин П.А.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
semakiriy@kiraksa.ru

Для восстановления полутонových изображений с голограмм 3D-сцен предложен, реализован и применен метод на основе генеративно-состязательной нейросети, включающей в себя сеть-генератор, который производит восстановление изображений с голограмм, и сеть-дискриминатор, оценивающий качество полученного изображения. Проведена оценка качества восстановленных изображений и сравнение с популярной сетью U-Net.

Ключевые слова: оптическая обработка информации, цифровая голография, машинное обучение.

Использование нейронных сетей в задачах голографии представляет собой перспективное направление исследований [1]. Такой подход позволяет снизить или устранить негативное влияние неинформативных дифракционных порядков при восстановлении изображений, благодаря предобучению модели [2]. Подобные методы обладают высоким качеством выделенной информации, коротким временем работы, возможностью обойтись от применения дополнительных алгоритмов фильтрации [3].

В работе проведено исследование возможностей восстановления полутонových изображений с голограмм объемных сцен с применением генеративно-состязательной нейросети (ГСН), состоящей из сети-генератора с архитектурой U-Net [4] и сети-дискриминатора. Первая производит реконструкцию изображений с голограмм, а вторая производит сравнение реконструкций с оригинальными изображениями объектов [5]. Генеративные сети обладают гибкостью и показывают высокое качество в задаче восстановления изображений с голограмм. На рисунке представлены примеры оригинальных изображений (а) и восстановленных при помощи обученных моделей U-Net (б) и ГСН (в) с оптически зарегистрированных цифровых голограмм. По численным метрикам предложенный метод также показал хорошие результаты: индекс структурного сходства и коэффициент корреляции равны 0,97, нормированное среднеквадратичное отклонение достигает 0,19.

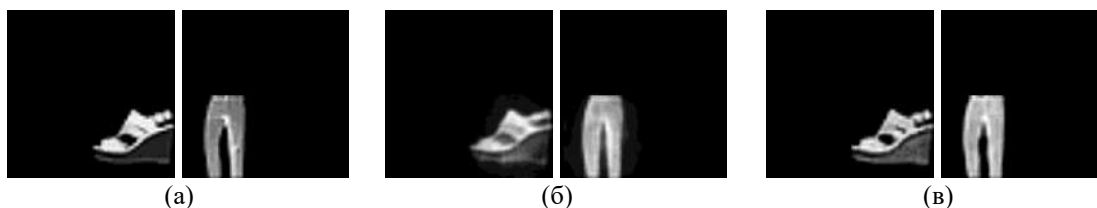


Рисунок. Примеры оригинальных изображений (а), реконструкций с помощью U-Net (б), реконструкций с помощью ГСН (в)

Представленный метод ГСН показывает высокое качество реконструкций 3D-сцен различных конфигураций как с синтезированных, так и с цифровых голограмм. Исследованы различные варианты модернизаций метода, в том числе изменения конфигураций нормализаций и функций ошибок. Проведено сравнение метода с популярной архитектурой U-Net.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340-П.

- [1] Situ G., *Light: Advanced Manufacturing*, **3**, 278-300, (2022).
- [2] Kiriy S.A., Rymov D.A., Svistunov A.S., Starikov R.S., Shifrina A.V., Cheremkhin P.A., *Laser Physics Letters*, **21**, 045201, (2024).
- [3] Kiriy S.A., Svistunov A.S., Rymov D.A. et al., *Measurement Techniques*, **67**, 282-290, (2024).
- [4] Ronneberger O., Fischer P., Brox T., *MICCAI*, **9351**, 234-241, (2015).
- [5] Khan A., Zhijiang Z., Yu Y., et al., *Complexity*, **2021**, (2021).

РАСПОЗНАВАНИЕ ФАЗОВЫХ РАЗЛИЧИЙ КОЛЬЦЕВЫХ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПУЧКОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ИНТЕНСИВНОСТИ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Богач Е.А., Адамов Е.В., Дудоров В.В., Колосов В.В.

ИОА СО РАН, г. Томск, Россия

bogach@iao.ru

Впервые показано, что в турбулентной атмосфере нейронные сети позволяют различать синтезированные пучки с различными относительными сдвигами фаз между субпучками по мгновенным распределениям интенсивности, тождественным в случае однородной среды.

Ключевые слова: векторный пучок, когерентное сложение, нейронная сеть.

В нашей недавней работе [1] показано, что применение нейронных сетей позволяет различать случай противоположных по знаку, но равных по модулю величин ОУМ по мгновенным распределениям интенсивности. Целью данного исследования является оценка возможности распознавания с помощью нейронных сетей фазовых различий синтезированных пучков в турбулентной атмосфере по мгновенным распределениям интенсивности в приёмной плоскости.

Численная модель эксперимента подробно описана в [2]. В данной работе рассмотрены 3 различных случая (класса) относительного сдвига фаз между субпучками (см. рисунок (а)): однонаправленные поляризации субпучков с относительным сдвигом фаз $\pi/3$ по часовой (U+) и против часовой стрелки (U-) и радиальные направления поляризации субпучков без относительного сдвига фаз (R) [2]. В приёмной плоскости наблюдаются тождественные распределения интенсивности для всех классов в случае однородной среды (см. рисунок (б)), а в турбулентной атмосфере распределения искажаются (рисунок (в)). Отметим, что усреднённые распределения интенсивности также практически тождественны (рисунок г)).

Для проведения исследования рассчитано по 15000 изображений интенсивности для каждого класса при различной турбулентности в диапазоне $C_n^2 \in [1 \cdot 10^{-16}, 5 \cdot 10^{-14}]$. Набор изображений затем был разделён на тренировочную (60% всех изображений), валидационную и тестовую выборки (по 20% каждая). Тренировочная и валидационная выборки использовались при обучении нейронной сети с архитектурой Inception V3 [3], а тестовая выборка – для анализа результатов. На рисунке (е) приведена матрица ошибок, полученная в результате применения обученной нейронной сети на тестовой выборке. Обученная нейронная сеть верно определила класс пучка по мгновенному распределению интенсивности в более чем 92% случаев для каждого отдельного класса. Таким образом, показано, что с помощью нейронных сетей возможно распознавать фазовые различия синтезированных векторных пучков в турбулентной атмосфере по мгновенным распределениям интенсивности.

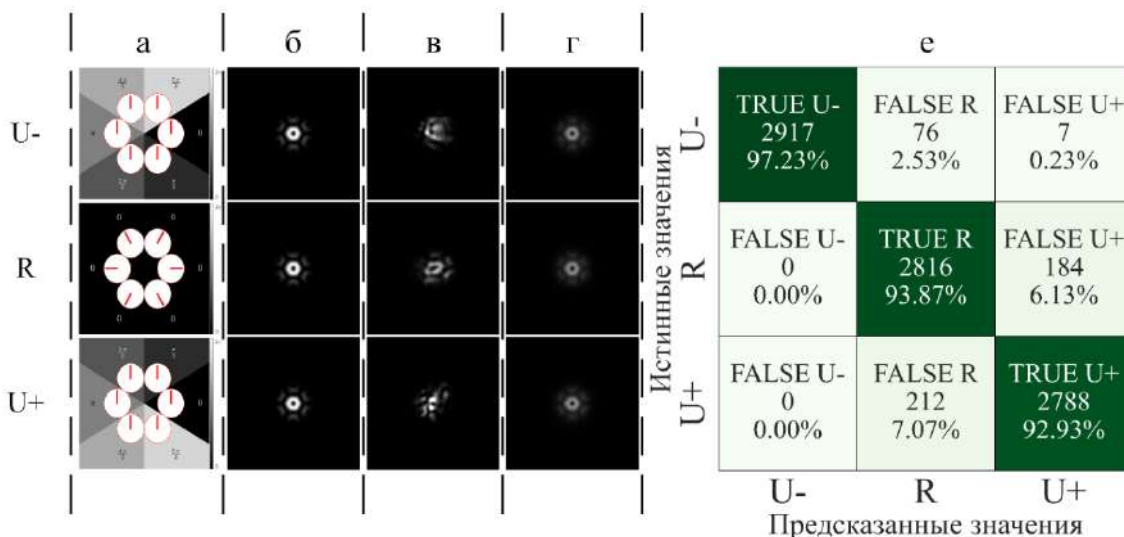


Рисунок. Относительные сдвиги фаз и направления поляризации субпучков (а), распределения интенсивности в однородной среде (б), мгновенные (в) и усреднённые (г) распределения интенсивности в турбулентной атмосфере и матрица ошибок обученной нейронной сети на тестовой выборке (е)

[1] Богач Е.А., Адамов Е.В., Дудоров В.В., Колосов В.В., *Оптика атмосф. и океана*, **38**, №4, 247-254, (2025).

[2] Adamov E.V., Bogach E.A., Dudorov V.V., Kolosov V.V., Levitskii M.E., *Opt. Commun.*, **559**, 130399, (2024).

[3] Zhao X., Wang L., Zhang Y., Han X., Deveci M., Parmar M., *Artif. Intell. Rev*, **57**, №99, (2024).

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ И КВАНТОВОГО ВЫХОДА
ГЕНЕРАЦИИ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА ДЛЯ BODIPY
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Чеботаев П.П.¹, Буглак А.А.¹, Шихан Э.², Филатов М.А.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Технологический университет Дублина, Дублин, Ирландия

platon.jr@chebotaev.ru

Построены QSPR-модели для прогнозирования отношения квантовых выходов флуоресценции и генерации синглетного кислорода BODIPY с использованием методов машинного обучения.

Ключевые слова: BODIPY, QSPR, синглетный кислород.

Фотодинамическая регуляция биологических процессов была впервые описана в 1900 году, и с тех пор это явление активно исследуется. Прогнозирование соотношения квантовых выходов флуоресценции и фотогенерации синглетного кислорода ($^1\text{O}_2$) имеет решающее значение для терапистики XXI века, которая сочетает флуоресцентную визуализацию и возможность фотодинамической терапии (ФДТ). Разработка новых функциональных красителей для терапистики часто является дорогостоящей и трудоемкой задачей из-за химической модификации и пост-синтетического скрининга больших библиотек соединений. Наша работа направлена на адаптацию алгоритмов машинного обучения для одновременного прогнозирования флуоресценции и фотосенсибилизирующей способности бор-дипиррометенов (BODIPY), не содержащих тяжелых атомов. Мы проанализировали соотношение квантового выхода флуоресценции (Φ_F) и квантового выхода генерации синглетного кислорода (Φ_Δ) для более чем 70 структур BODIPY в полярных (ацетонитрил) и неполярных (толуол) растворителях, которые, соответственно, имитируют гидрофильную и гидрофобную клеточную среду [1]. Модели количественных соотношений структура-свойство (QSPR) разработаны на основе более 5,000 молекулярных дескрипторов, включая квантово-химические. Для построения и оптимизации моделей мы применили методы множественной линейной регрессии (MLR), регрессии опорных векторов (SVR) и регрессии случайного леса (RFR). Анализ выявил значимость ряда дескрипторов, причем решающую роль играют дескрипторы, связанные с электронной структурой, поляризуемостью, потенциалом ионизации и топологическими характеристиками. Примечательно, что топологические дескрипторы, связанные с 2D-парами атомов, в частности расположением атомов углерода и азота, оказались весьма влиятельными для соединений в ацетонитриле. Высокие статистические параметры моделей продемонстрировали их точность в прогнозировании соотношения Φ_F/Φ_Δ , причем модель RFR показала наилучшие результаты для соединений в толуоле, а модель SVR — для молекул, растворенных в ацетонитриле. Кроме того, все модели демонстрируют достаточные статистические параметры ($R^2 = 0.73 - 0.91$) для обеих сред и могут быть использованы для прогнозирования Φ_F/Φ_Δ .

Наши результаты демонстрируют применимость методологии QSPR для изучения соотношения Φ_F/Φ_Δ предоставляя ценный инструмент для досинтетического скрининга новых функциональных красителей. Эти прогнозные модели предлагают простой и эффективный подход к поиску новых фотосенсибилизаторов, заменяя необходимость в случайном синтезе новых молекулярных библиотек. Кроме того, они могут служить ориентиром для синтеза красителей с желаемым соотношением Φ_F/Φ_Δ в определенных средах, таких как растворители различной полярности. Такие прогнозные модели не только перспективны для ФДТ, но и имеют значение для тонкого химического синтеза, очистки сточных вод и т.д. Кроме того, мы доказали, что методы машинного обучения могут быть полезны для прогнозирования ключевых фотохимических параметров для фотосенсибилизаторов BODIPY ряда.

[1] Chebotaev P.P., Buglak A.A., Sheehan A., Filatov M.A., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **26**, №38, 25131-25142, (2024).

СКРИНИНГ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ
НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯМолокеев М.С.^{1,2}¹Международный исследовательский центр спектроскопии и квантовой химии - IRC SQC,
Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия²Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской
академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия
msmolokeev@mail.ru

С помощью методов машинного обучения были предсказаны ключевые структурные параметры металлоорганических галогенидов, определяющие интенсивность их сцинтилляции. На основе выведенных закономерностей синтезированы новые высокоэффективные соединения, включая [DMe]MnBr₄ (где DMe — декаметоний), что подтвердило достоверность прогноза в ходе экспериментальных исследований.

Ключевые слова: сцинтиллятор, машинное обучение, металлоорганика.

Машинное обучение было применено для прогнозирования сцинтилляционных свойств гибридных органическо-неорганических галогенидов (OIMH) с акцентом на их фотолюминесцентный квантовый выход (PLQY). Использование алгоритмов Случайного леса и Древа Решений позволило выявить ключевые структурные параметры органических молекул, влияющие на расстояние между металлическими центрами (M...M) и коррелирующие с величиной PLQY [1].

На основе анализа 371 образца OIMH была создана предсказательная модель с использованием Случайного Леса, достигшая высокой точности прогноза расстояний d(M...M) с погрешностью всего 0.5 Å. Модель эффективно работает с молекулярными скетчами или DeepSMILES-представлениями в комбинации с типами металлов (M) и галогенидов (X) (рисунок), что позволяет проводить быстрый скрининг потенциальных сцинтилляторов в структурных базах данных. Дополнительно, с помощью модели Древа Решений были выявлены ключевые структурные особенности: терминальные группы -NH₃ и N-H ограничивают увеличение расстояний M...M, тогда как [N⁺] фрагменты и алифатические цепи способствуют их росту.

Эти данные легли в основу направленного синтеза пяти новых соединений, среди которых [DMe]MnBr₄ продемонстрировал наивысшую светоотдачу и значительный прикладной потенциал. Данное исследование закладывает основу для прогнозирования сцинтилляционных свойств гибридных материалов и расширения областей их применения, предлагая мощный инструмент для ускоренного дизайна новых поколений люминесцентных материалов с улучшенными характеристиками.

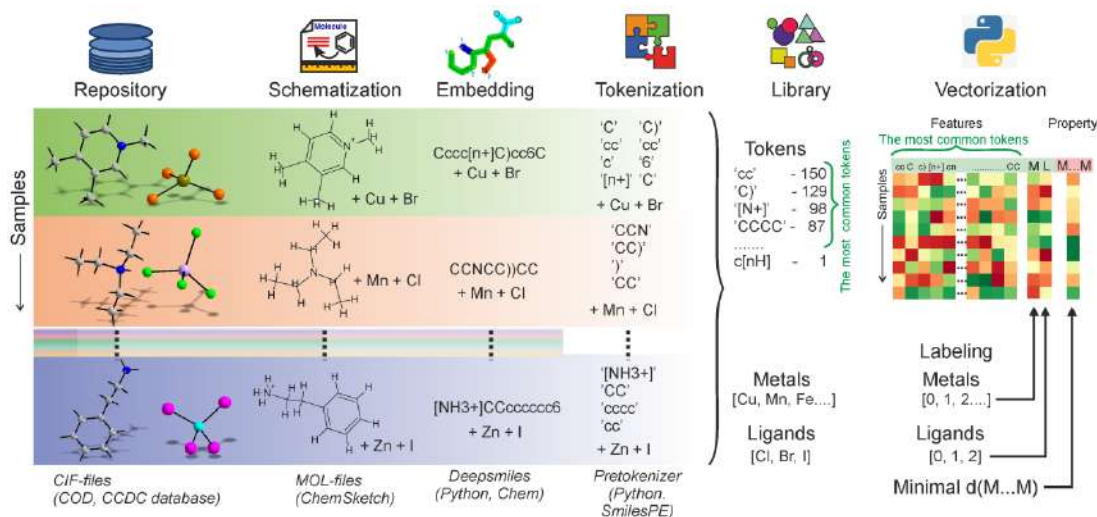


Рисунок. Визуальная схема демонстрирует ключевые этапы формирования унифицированного представления данных по всем изученным OIMH-соединениям. На схеме показано, как DeepSMILES-нотация и атомные токены (M/X) интегрируются в единое векторное пространство с помощью методов совместного векторного представления

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (24-43-00006).

[1] Molokeev M.S., Su B., Aleksandrovsky A.S., Golovnev N.N., Plyaskin M.E., Xia Z., *Chem. Mater.*, **34**, 537-546, (2022).

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ
ДЛЯ АУГМЕНТАЦИИ ДЕРМАТОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ЗЛОКАЧЕСТВЕННОЙ МЕЛАНОМЫ**

Захаров Н.К., Матвеева И.А.

Самарский университет, г. Самара, Россия

nk.z4kharov@gmail.com

В работе рассматривается проблема несбалансированности и малого объема наборов данных в задачах медицинской диагностики. Предлагается метод аугментации дерматоскопических изображений с использованием генеративно-состязательных сетей (GAN). Описана архитектура и процесс обучения модели WGAN-GP для синтеза фотореалистичных изображений злокачественной меланомы. Показана возможность генерации качественных синтетических данных, пригодных для расширения обучающих выборок.

Ключевые слова: генеративно-состязательная сеть, аугментация данных, дерматоскопия.

Внедрение систем автоматической диагностики новообразований кожи на основе нейросетей одним из наиболее перспективных направлений в современной цифровой медицине. Эффективность таких систем, как правило основанных на сверточных нейронных сетях (CNN), напрямую зависит от объема и качества обучающих данных. Однако сбор медицинских изображений сопряжен с рядом трудностей, что приводит к формированию ограниченных и несбалансированных наборов данных. Особенно остро эта проблема стоит для редких и наиболее опасных патологий, что снижает точность и обобщающую способность моделей, даже для устойчивых CNN [1].

Классические методы аугментации (повороты, отражения, изменение яркости) вносят лишь ограниченное разнообразие в данные. Перспективным способом решения данной проблемы является генерацией новых изображений с помощью генеративно-состязательных сетей (GAN).

В данной работе предложен подход к аугментации дерматоскопических изображений злокачественной меланомы. Объектом исследования выступил набор данных HAM10000 [2], из которого были отобраны исключительно изображения меланомы. Для обучения была использована архитектура WGAN-GP (Wasserstein GAN with Gradient Penalty), которая обеспечивает стабильность обучения и высокое качество генерируемых изображений за счет применения функции потерь Вассерштейна и градиентного штрафа [3].

Модели генератора и дискриминатора были реализованы на платформе TensorFlow. Генератор построен на последовательности слоев UpSampling2D, Conv2D и BatchNormalization для преобразования случайного вектора из латентного пространства размерностью 256 в изображение 64x64 пикселя. Архитектура дискриминатора, наоборот, использует сверточные слои для извлечения признаков и вынесения вердикта о реалистичности изображения. Обучение проводилось с использованием оптимизатора Adam с динамически изменяемой скоростью обучения для обеих сетей.

Основная идея метода заключается в обучении двух моделей — генератора и дискриминатора. Генератор учится создавать реалистичные изображения из случайного вектора шума, а дискриминатор — отличать синтезированные изображения от настоящих. В работе использована архитектура WGAN-GP (Wasserstein GAN with Gradient Penalty), которая обеспечивает стабильность процесса обучения и высокое качество генерируемых изображений [2].

В ходе исследования была успешно обучена модель WGAN-GP для синтеза дерматоскопических изображений меланомы. Процесс обучения продемонстрировал высокую стабильность — характерное преимущество WGAN-GP по сравнению с классическими GAN. Для количественной оценки качества и разнообразия синтезированных изображений на каждом этапе валидации применялась метрика Fréchet Inception Distance (FID), измеряющая расстояние между распределениями реальных и сгенерированных данных в пространстве признаков предобученной сети InceptionV3.

В результате получены синтетические изображения меланомы размером 64×64 пикселя, визуально схожие с реальными образцами. Динамика FID в процессе обучения показала устойчивое снижение, что свидетельствует о сходимости модели и приближении распределения сгенерированных изображений к реальным данным. Это подтверждает, что генератор научился улавливать ключевые визуальные характеристики патологии.

Таким образом, работа демонстрирует эффективность применения GAN для аугментации дерматоскопических датасетов. Синтезированные данные могут быть использованы для балансировки классов и увеличения обучающих выборок, что позволит повысить точность и надежность моделей классификации новообразований кожи.

[1] Dablain D., Jacobson K.N., Bellinger C., Roberts M., Chawla N.V., *Mach. Learn.*, **113**, №7, 4785-4810, (2024).

[2] Tschandl P., Rosendahl C., Kittler H., *Sci. Data*, **5**, №1, 180161, (2018).

[3] Gulrajani I., Ahmed F., Arjovsky M., Dumoulin V., Courville A.C., *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, **30**, (2017).

ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ БИОХИМИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ: ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА НА МИКРОРЕЗОНАТОРНЫХ СЕНСОРАХ

Саечников И.В., Чернявская Э.А., Саечников А.В.

Белорусский Государственный Университет, г. Минск, Беларусь

saetchnikovivan@gmail.com

Представляется биочип на основе оптических микрорезонаторов, предназначенный для иммуносенсинга в сложных растворах. Использование мультиплексной регистрации сигналов микрорезонаторов и методов глубокого обучения снижает зависимость от однородности отдельных микрорезонаторов на чипе и способствует внедрению биосенсоров на основе резонаторов мод шепчущей галереи в условия приближенных с реальным.

Ключевые слова: кластер микрорезонаторов, регистрация соединений, глубокое обучение.

Оптические биосенсоры используют взаимодействие между оптическим полем и анализируемыми веществами, обеспечивая компактность, доступность, высокую чувствительность и мультиплексное обнаружение для получения комплексной информации о биологических системах. Оптические микрорезонаторы усиливают взаимодействие света с образцом за счёт локализации оптического поля, где волны распространяются по его поверхности и формируют моды шепчущей галереи (МШГ). Они обладают высоким показателем добротности (Q-фактором) и обеспечивают высокую чувствительность вплоть до отдельных молекул [1]. Множество микрорезонаторов можно компактно размещать на небольшой площади или в объёме, создавая платформу для одновременного считывания данных с тысяч сенсоров [2]. Дальнейшая интеграция методов глубокого обучения позволяет проводить доступный анализ, а также определять параметры исследуемых веществ на базе больших объемов данных [3, 4]. За основу глубокого обучения взяты сверточные нейронные сети, показавшие высокую точность в идентификации динамических объектов на многомерных данных [5, 6].

Представленный интеллектуальный биочип, интегрирующий тысячи резонаторов МШГ для параллельного измерения, где стеклянные микросферы (90–120 мкм) фиксируются на тонком стеклянном покрытии, образуя отдельные пространственно разделённые зоны или каналы. С помощью микропипеток на разные каналы наносятся биорецепторы, формируя различные функциональные группы или узоры. Количество функциональных каналов зависит от размеров микрорезонаторов и эффективной площади сенсора, обеспечивая наличие более 100 резонаторов для стабильных измерений. Чип поддерживает до 16 каналов, расширяемых до 100 при использовании резонаторов размером 40 мкм. Сбор сигналов МШГ с биочипа осуществляется с помощью технологии мультиплексного микрорезонаторного отображения, где сигнал микрорезонатора фиксируется камерой. Отклик биочипа отслеживается по изменениям излучаемой энергии при непрерывном освещении лазером с длиной волны 785 нм и контролируемой поляризацией.

Из-за различий в откликах сенсоров для разных образцов мы используем инженеринг признаков и анализ главных компонент (МГК) для снижения размерности данных и повышения устойчивости сенсинга. При наличии более 100 одновременных откликов микрорезонаторов можно с точностью свыше 98% восстановить спектральный сдвиг по первой главной компоненте, которая затем используется как признак для анализа. Изготовлены биочипы с 4 или 9 каналами для селективного обнаружения различных иммуноглобулинов (IgG) в сложных растворах. Измерения показали, что концентрации до нескольких нг/мл можно точно различать с вариабельностью менее 5%. Идентификация и анализ соединений выполнялись в два этапа: сначала классификация, затем определение концентрации. В качестве модели использовался ансамбль методов глубокого обучения, включающий сверточные нейронные сети, модули трансформеров и механизмов self-attention. Кроме того, в модель был интегрирован механизм полуконтролируемого обучения. Результаты показали точность более 95% при определении типа вещества и ошибку на уровне предела детектирования. Таким образом, в данной работе представлен интеллектуальный биочип на основе оптических микрорезонаторов для иммуносенсинга в сложных биохимических растворах, который использует специфичность технологии мультиплексного микрорезонаторного изображения вместе с методами глубокого обучения для значительного снижения требований к стабильности производства и тем самым существенно расширяет потенциал применения биосенсоров на основе WGM в реальных условиях.

[1] Houghton M.C., Kashanian S.V., Derrien T.L., et al., *ACS Photonics*, **86**, 37, (2024).

[2] Saetchnikov A., Tcherniavskaia E., Skakun V., et al., *IEEE Sensors J.*, **19**, 7644, (2019).

[3] Saetchnikov A., Tcherniavskaia E., Saetchnikov V., Ostendorf A., *Opto-Electronic Adv.*, **3**, 200048, (2020).

[4] Saetchnikov A.V., Tcherniavskaia E.A., Saetchnikov V.A., Ostendorf A., *Adv. Photonics Res.*, **7**, 2100242, (2021).

[5] Saetchnikov I., Skakun V., Tcherniavskaia E., *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, **4**, №3, 250-256, (2023).

[6] Saetchnikov I., Skakun V., Tcherniavskaia E., *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, **2**, №2, 98-103, (2021).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПО ТУРБУЛЕНТНОМУ УШИРЕНИЮ ГАУССОВОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Филимонов Г.А.¹, Куликов В.А.²

¹Институт оптики атмосферы им В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

²Дейтонский Университет, Дейтон, США

fga@iao.ru

Предложен универсальный подход к оценке структурной характеристики показателя преломления C_n^2 , основанный на нейросетевом прогнозе эффективной ширины гауссова пучка после прохождения атмосферной трассы.

Ключевые слова: турбулентная атмосфера, структурная характеристика, прогноз.

Современные методы оценки структурной характеристика показателя преломления C_n^2 всё чаще используют искусственный интеллект и глубокое обучение [1, 2]. В настоящей работе рассматривается альтернативный подход к созданию универсальных нейросетевых моделей, основанный на идее восстановления эффективной ширины гауссова пучка после прохождения атмосферной трассы. Эта характеристика в отличие от величины C_n^2 , может быть непосредственно связана с измеряемыми оптическими параметрами в приёмной плоскости. Зная ширину пучка после прохождения трассы, можно использовать аналитические зависимости из теории распространения излучения в турбулентной среде для восстановления C_n^2 и других параметров атмосферной трассы, которые не поддаются измерению. В частности, в параболическом приближении и при выполнении условий слабой и умеренной турбулентности, эффективная ширина пучка может быть выражена как [3]:

$$a_{eff}^2 = a^2 \left[\left(1 - \frac{Z}{F}\right)^2 + \frac{Z^2}{Z_d^2} \right] + 9.8 \frac{Z^2}{kr_0^2}, \quad (1)$$

где a — начальная ширина пучка, Z — длина трассы, $Z_d = ka^2/2$ — длина дифракции, k — волновое число, $r_0 = (0.423C_n^2 k^2 Z)^{-3/5}$ — радиус Фрида.

Решая это уравнение относительно C_n^2 , можно выразить структурную характеристику через измеренное уширение пучка и известные параметры трассы и источника.

Для реализации предложенного подхода была использована топология нейросети, описанная в работе [1] представляющая собой сверточную сеть с блоками извлечения пространственных признаков, за которыми следуют полносвязные слои регрессии. На входе нейросеть принимала 16 распределений интенсивности в плоскости приемника. В отличие от [1] на выходе нейросети вместо C_n^2 помещался эффективный радиус пучка a_{eff} . Точность прогноза рассчитывалась по среднеквадратичной ошибке между предсказанным и истинным радиусом пучка (1).

Для обучения сети методом численного моделирования был создан датасет из 160 000 распределений интенсивности гауссового пучка в конце трассы. В процессе генерации для каждой 16 сеансов распространения задавалось одно значение C_n^2 из диапазона $[10^{-16} \dots 4 \cdot 10^{-14}] \text{ м}^{-2/3}$ и одна длина трассы из диапазона $[1 \dots 10]$ км. В плоскости источника формировался гауссов пучок с длиной волны 1.55 нм и радиусом 5 см. Распространение пучка вдоль трассы с однородным распределением турбулентности моделировалось на основе решения параболического уравнения методом расщепления [4]. Размер области моделирования составлял 1.536 м, разрешение – 1024x1024 пикселя. При моделировании каждого сеанса распространения генерировались 10 фазовых экранов, представляющие слои турбулентности вдоль трассы распространения. Распределения интенсивности в конце трассы сжимались до разрешения 128x128 пикселей. Для тестирования обученной сети был записан тестовый датасет, содержащий 16000 распределений интенсивности и соответствующих им рассчитанных значений a_{eff} . Тестовый датасет был записан с теми же параметрами трассы и источника, как и обучающий датасет.

При прогнозе a_{eff} на тестовом датасете относительная ошибка составила порядка 5%, а при восстановлении C_n^2 – порядка 14%.

Сравнение с прямыми вычислениями эффективного радиуса пучка по распределению интенсивности показывает существенное преимущество нейросетевого подхода за счет того, что нейросеть может более точно определять эффективный радиус по распределению интенсивности в сильной турбулентности и в ситуациях, когда лазерный пучок в конце трассы шире, чем приемная апертура или область моделирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания.

[1] Vorontsov M.A. et al., *Appl. Sci.*, **10**, 22, 8136, (2020).

[2] Filimonov G.A., Vorontsov M.A., *arXiv preprint arXiv:2210.01957*, (2022).

Armstrong J.A., Bloembergen N., Ducuing J., Pershan P.S., *Phys. Rev.*, **127**, 1918-1939, (1962).

[3] Andrews L.C., Phillips R.L., *SPIE Press*, (2005).

[4] Коняев П.А., Тартаковский Е.А., Филимонов Г.А. *Оптика атмосферы и океана*, **24**, 5, 359-365, (2011).

**МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ
МИКРОЧАСТИЦ В БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССАХ**

Кузьмин Н.А.

ФГУП «ВНИИА» им. Н.Л. Духова, Москва, Россия
mr.nkuzmin@gmail.com

Предложены решения задачи автоматизации определения параметров дисперсной фазы на основе машинного обучения. Проведены модельные и натурные эксперименты голографической записи и восстановления облака частиц. Показана точность работы алгоритма более 75%.

Ключевые слова: машинное обучение, цифровая голография, дисперсная фаза.

Анализ пространственного распределения быстродвижущихся частиц с размерами от 1 до 50 мкм представляет интерес для проведения газодинамических экспериментов, в которых конструкционные материалы подвергаются ударным и взрывным воздействиям, сопровождающимся отколами и пылением – происходит образование дисперсной фазы материала [1].

Используя параметры дисперсной фазы, возможно смоделировать пространственное распределение объектов в динамике, что необходимо для изучения кинематики быстропротекающих газодинамических процессов. Актуальной задачей является автоматизация процесса определения параметров микрочастиц, поскольку время ручной обработки может достигать тысяч часов. В качестве решения было предложено использование нейронных сетей, обученных на модельных данных [2].

Целью работы являлась разработка метода автоматического определения характеристик дисперсной фазы в быстропротекающих процессах. В ходе работы проведены модельные и натурные эксперименты голографической записи и численное послойное восстановление полученных голограмм, созданы и обучены на основе модельных данных нейронные сети. Определено, что одна из предложенных нейронных сетей с архитектурой U-net способна распознавать частицы на послойно восстановленных голограммах с достаточной точностью. Нейронная сеть и классические алгоритмы распознавания объектов были проверены на экспериментальных данных. В результате сравнения установлено, что точность работы нейронной сети по количественному критерию превышает более чем в 2 раза точность работы классических алгоритмов и составляет 76%.

[1] Arapov Y.D., Dvornichenko M.E. et al., *Optical Engineering*, **59**, №10, 102420, (2020).

[2] Mallery K., Hong J.R., *Optics Express*, **27**, №13, 18069-18084, (2019).

ИНДУСТРИАЛЬНАЯ ФОТОНИКА

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ЛИНЕЙНЫХ ВЕЛИЧИН В ЭНЕРГЕТИКЕ**

Коротаев В.В., Тимофеев А.Н., Васильев А.С., Рыжова В.А., Родикова Л.С.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

korotaev_v_v@mail.ru

Рассматриваются оптико-электронные приборы и комплексы контроля линейных величин при сборке и ремонте паровых турбин большой единичной мощности (500 МВт и более), а также при мониторинге их состояния в процессе эксплуатации. Создание указанных средств является актуальной задачей имеющей существенное значение для развития энергетики.

Ключевые слова: соосность валов, позиционирование ротора, контроль хорды рабочих лопаток.

Установка вала ротора паровой турбины в заданное положение осуществляется при сборке турбины и повторяется при её капитальном ремонте. Перед началом установки вала ротора центрируются диафрагмы и подшипники цилиндров с погрешностью не более 0,1 мм.

Разработана и изготовлена автоматическая система контроля соосности элементов турбоагрегатов (АСКС), которая состоит из базового блока, отражателя и блока обработки (промышленного компьютера) [1]. Базовый блок задаёт направление оси вала ротора. Отражатель последовательно устанавливается в центры диафрагм или расточек подшипников и путем их сдвигов совмещают центры с заданным положением оси. Дистанция контроля: от 0,5 до 10 м с возможностью увеличения до 20 м. СКО погрешности контроля по поперечным направлениям: не более 0,07 мм на дистанции 10 м [2].

После установки ротора на опоры необходимо измерить фактическое положение поверхности вала относительно геометрических поверхностей масляных расточек диаметром 700 – 900 мм. Для выполнения этих измерений разработана система ОСЬ. Система ОСЬ содержит каретку, которая перемещается по поверхности вала и измеряет расстояние между этой поверхностью и поверхностью основания масляных расточек в диапазоне контролируемых смещений ± 5 мм со СКО составляющей погрешности $\pm 0,005$ мм.

Системы АСКС и ОСЬ образуют комплекс позволяющий обеспечить установку вала ротора паровой турбины большой единичной мощности в опоры с заданной погрешностью. Качество сборки обеспечивает производительность турбины и экономическую эффективность турбоагрегата в целом.

Актуальной также является задача контроля износа рабочих лопаток паровых турбин в процессе её эксплуатации без вскрытия цилиндров. Выполнен комплекс исследований по созданию оптико-электронной системы контроля износа рабочих лопаток паровых турбин большой единичной мощности (ОЭСРЛ) при использовании валоповорота на закрытом цилиндре.

Применение ОЭСРЛ позволяет осуществить измерение износа лопаток с помощью видеозондов вводимых в закрытую турбину. Для выполнения такого обследования турбина выводится из рабочего режима и переводится в режим валоповорота со скоростью 1 оборот в минуту. Из крышки корпуса турбины вынимаются специальные заглушки технологических каналов, а в образовавшиеся отверстия вводятся специальные видеозонды, с помощью которых по сигналам синхродатчика о положении ротора определяется величина хорды лопаток. По мере введения зонда в технологические отверстия осуществляется последовательное измерение величин хорды лопаток в различных сечениях по их длине. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования показали возможность создания ОЭСРЛ, позволяющей контролировать износ хорды рабочих лопаток по всей их длине с погрешностью не более 0,3 мм в режиме валоповорота [3].

Накопленный опыт проектирования и испытания указанных систем позволяют продолжить создавать более высокоточные оптико-электронные приборы и комплексы контроля линейных величин [4].

[1] Nekrylov I.S., Timofeev A.N., Kleshchenok M.A., *Proceedings of SPIE*, **10231**, 1023115, (2017).

[2] Клещенко М.А., Коротаев В.В., Некрылов И.С., Тимофеев А.Н., Сычева Е.А., Блохина А.А., Родригеш Ж., *Изв. вузов. Приборостроение*, **61**, №9, 771-778, (2018).

[3] Korotaev V.V., Rodikova L.S., Timofeev A.N., Ryzhova V.A., Yarishev S.N., Djamiykov T.S., Marinov M.B., *Machines*, **13**(3), 174, (2025).

[4] Lashmanov O.U., Vasilev A.S., Vasileva A.V., Anisimov A.G., Korotaev V.V. *Measurement*, **123**, 226-234, (2018).

**МАШИННОЕ ЗРЕНИЕ В ЗАДАЧАХ
МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Афонюшкин А.А.

ООО «Лазерный центр», Санкт-Петербург, Россия
research@newlaser.ru

Доклад посвящён применению технологий машинного зрения для решения ключевых задач микроэлектроники. Описаны подходы к высокоточному визуальному контролю, распознаванию объектов и автоматической калибровке лазерных установок.

Ключевые слова: машинное зрение, визуальный контроль, техническое зрение.

В современном производстве микроэлектроники возрастает спрос на высокоточный визуальный контроль и автоматизацию технологических процессов [1-3]. Машинное зрение позволяет решать задачи, связанные с позиционированием, калибровкой и инспекцией изделий на микроуровне. В докладе представлен опыт компании ООО «Лазерный центр» по интеграции машинного зрения в линейку лазерных установок MicroSet. Описаны различные способы установки промышленных камер, включая использование сканаторных систем и механизированных осей для сшивки изображений и исправления перспективных искажений.

Особое внимание уделено практическим задачам: распознавание реперных точек с точностью до нескольких микрон, автофокусировка и поиск рабочего расстояния, а также чтение и верификация микроразмерных DPM-кодов. Подчёркивается использование как традиционных алгоритмов поиска по шаблонам и контурам, так и нейросетевых методов глубокого обучения под задачи заказчиков.

Отмечены перспективные направления развития: интеллектуальное отслеживание процесса обработки, автоматическая оценка качества и адаптация подсветки. Внедрение таких решений позволяет повысить стабильность качества, снизить долю брака и расширить функционал лазерных установок для производства микроэлектроники нового поколения.

[1] Jain R., Kumar S., *International Journal of Optical and Digital Systems*, **3**, 4, 45-60, (2021).

[2] Можяев Р.К., Иванов С.П., Петров А.И., *Вест. Информационные технологии.*, **30**, 4, 45-55, (2023).

[3] Singh A., Patel R., Zhao Y., *Journal of Engineering Research and Reports*, **25**, 3, 55-72, (2025).

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ ЗАПОМИНАЮЩЕЕ
УСТРОЙСТВО С ОПТИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ И
СПЕКТРАЛЬНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ**

Янукович Т.П., Юдыцкая К.С., Поляков А.В.

Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

YanukovichTP@bsu.by

Проведены исследования процесса рециркуляции оптических сигналов в волоконно-оптическом динамическом запоминающем устройстве с оптической регенерацией и технологией DWDM, проанализированы информационные параметры при различных форматах модуляции.

Ключевые слова: волоконно-оптическое динамическое запоминающее устройство, время хранения, информационная емкость.

Для обеспечения надежного хранения информации в оптических системах передачи и обработки данных с гигабитными скоростями необходимо применять специальные запоминающие устройства. В качестве элементов памяти для этих целей могут быть использовано волоконно-оптическое динамическое запоминающее устройство (ВОДЗУ), представляющее собой буферную память циркуляционного типа, в которой осуществляется периодическое восстановление информационного потока непосредственно в оптическом диапазоне. Разработка схемных реализаций и методов интеграции таких запоминающих устройств представляются перспективными для различных телекоммуникационных применений.

Ввиду простоты способов детектирования амплитудно-модулированных сигналов наиболее простая схема ВОДЗУ предполагает использование сигналов с амплитудной модуляцией. Поскольку детектируемым параметром является уровень сигнала, конфигурация устройства может быть дополнена схемой регенерации для восстановления амплитуды и формы сигнала на основе нелинейного оптического кольцевого зеркала [1], обеспечивающая требуемое время циркуляции информации в запоминающем устройстве. Использование технологий плотного спектрального мультиплексирования позволяет организовать большое количество информационных каналов в одном волоконном световоде и, следовательно, увеличивает информационную емкость ВОДЗУ.

При переходе от стандартов скорости передачи информации 2,5 Гбит/с и 10 Гбит/с к приобретающему все большую популярность стандарту 40 Гбит/с возникают ряд факторов, ограничивающих время хранения в ВОДЗУ. Уменьшение тактового интервала приводит к возрастанию межсимвольных помех. Кроме этого, совместное влияние фазовой самомодуляции, хроматической и поляризационной модовой дисперсии, приводящей к первоначальному сжатию и последующему уширению циркулирующих оптических импульсов, на скорости 40 Гбит/с выражается значительно слабее. Это требует более частого использования процедуры восстановления импульсов посредством нелинейного оптического кольцевого зеркала, что ведет к уменьшению отношения сигнал/шум, и как следствие, уменьшает время хранения при заданной вероятности ошибки BER на уровне не более 10^{-9} [2]. По этой причине целесообразным представляется переход к использованию альтернативных форматов модуляции. Одним из перспективных для описанных задач является формат фазовой модуляции, например QPSK. Применение такого формата позволяет дополнительно сузить используемую полосу частот, что снижает уровень накапливаемого в процессе циркуляции шума, а гетеродинный прием значительно повышает отношение сигнал/шум на выходе. Однако это требует использования более сложных схем как формирования оптического информационного потока, так и детектирования сигналов.

Результаты расчетов показали, что при линейном увеличении пиковой мощности входных оптических сигналов время хранения при фиксированной вероятности ошибки возрастает нелинейно, при этом эффективно увеличивать время хранения можно при возрастании мощности до 10–12 мВт на один информационный канал. Для минимизации влияния перекрестной фазовой модуляции необходимо увеличивать спектральный интервал между информационными каналами. В этом случае для сохранения требуемого количества информационных каналов требуется использовать широкополосные оптические усилители. При сравнении амплитудного RZ-кодирования и фазового кодирования при условии одинаковой длины оптоволоконной петли хранения информации установлено, что переход к QPSK ведет к увеличению времени хранения в 12 раз.

[1] Polyakov A.V., *Optical Memory and Neural Networks*, **29**, №2, 100-109, (2020).

[2] Поляков А.В., Юдыцкая К.С., *XIII межд. конф. по фотонике и информационной оптике*: Москва, 24-26 января 2024 г., 463-464, (2024).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАЗЕМНОГО ТЕРМИНАЛА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВЯЗИ

Лозов Р.К., Мурашкин В.В., Петушков С.В., Лексина Р.А.,
Кузьмин И.В., Григорьев В.Н., Третьякова Л.В., Неткачев В.В.

АО «НПК «СПП», Москва, Россия

otd1103-11@npk-spp.ru

В работе описан разработанный наземный терминал высокоскоростной космической лазерной связи. Экспериментально подтверждена возможность передачи данных со скоростью 2 Гбит/с с уровнем битовых ошибок не хуже $1 \cdot 10^{-6}$ в полнодуплексном режиме при использовании когерентного многолучевого передатчика и системы наведения, точность которой равна 0,1 угловой секунде.

Ключевые слова: космическая лазерная связь, атмосферная линия связи, наземный терминал.

В настоящее время развитие многоспутниковых группировок малых космических аппаратов (МКА) связи и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) включает в себя требование наличия высокоскоростной передачи больших объемов информации как с борта МКА на наземные пункты (нисходящие линии), так и с наземных пунктов на борт МКА (восходящие линии) [1]. Существующие радиотехнические системы связи имеют ограничения по пропускной способности, что делает актуальным поиск альтернативных решений, которыми являются оптические линии связи.

Оптические линии связи позволяют обеспечить скорость передачи данных до 100 Гбит/с, а построенные на их основе системы обладают следующими преимуществами (по сравнению с радиочастотными аналогами): малые массогабаритные характеристики, повышенная электромагнитная совместимость, стойкость к помехам и безопасность передачи. К недостаткам можно отнести повышенные требования к системе наведения, влияние фоновой засветки и погодных условий [2]. Основными устройствами, которые осуществляют организацию оптической линии связи являются бортовые и наземные терминалы высокоскоростной космической лазерной связи (БТ ВКЛС и НТ ВКЛС, соответственно). Целью работы является определение принципов построения и алгоритма работы НТ ВКЛС для реализации связи с низкоорбитальными МКА и обработка результатов исследований линии связи между НТ ВКЛС и БТ ВКЛС на испытательном стенде, имитирующим движение МКА.

Наземный терминал ВКЛС включает в себя блок оптико-механический (БОМ) и блок управления терминалом (БУТ). БОМ имеет телескопы передающего и приемного каналов, узлы передатчика и приемника, широкоугольную камеру, блоки пеленгаторов и маркеры. Особенностью НТ ВКЛС является применение когерентного многолучевого передатчика и система точного наведения с пьезоэлектрическими платформами и маркерной системой слежения за осями излучения.

Испытательный стенд позволяет организовать условия максимально приближенные к реальным: мощности приемных излучений на апертурах НТ ВКЛС и БТ ВКЛС моделируют космические условия, а угловая скорость платформы, на которую устанавливается БТ ВКЛС, имитирует движения МКА для отработки терминалов в режиме наведения. Передача информации на испытательном стенде осуществляется на трассе с длиной 1200 м.

В результате проведенных исследований на испытательном стенде было установлено, что разработанный НТ ВКЛС обеспечивает наведение с точностью до 0,1 угловой секунды (три сигмы). Время входа в связь и восстановления после обрыва составило не более 1 секунды. Экспериментально подтверждена работоспособность терминала при передаче данных в полнодуплексном режиме со скоростью 2 Гбит/с и уровнем битовых ошибок не хуже $1 \cdot 10^{-6}$. На рисунке представлены результаты измерений скорости передачи информации и уровня битовых ошибок в обоих направлениях – с БТ ВКЛС на НТ ВКЛС (рисунок а) и обратно (рисунок б).

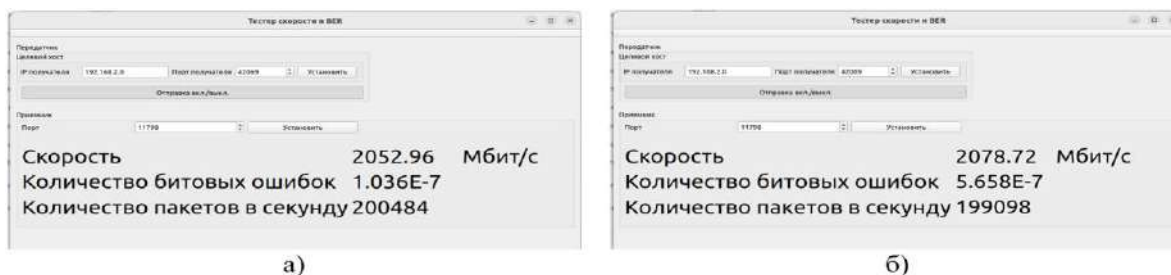


Рисунок. Результаты измерений скорости передачи информации и уровня битовых ошибок:
а) с БТ ВКЛС на НТ ВКЛС; б) с НТ ВКЛС на БТ ВКЛС

- [1] Kuzmin I.V., et al., 2024 *International Conference Laser Optics (ICLO)*, 459-459, (2024).
[2] Gavrilenko M., et al., 2022 *International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech)*, 383-387, (2022).

**ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ НА ПРОЦЕСС
ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ
МЕТОДОМ ПРОТОННОГО ОБМЕНА**

**Гордеева А.И., Петухов И.В., Корнилицын А.Р.,
Мясникова Е.В., Масалкин Д.Н.**

ПГНИУ, г. Пермь, Россия

gordeeva@psu.ru

Экспериментально изучено влияние гидродинамических потоков на глубину и фазовый состав планарных волноводов, формирующихся в процессе протонного обмена на кристаллах ниобата лития. Фазовый состав волноводов исследован методом рентгеноструктурного анализа, приращение показателя преломления и глубина волноводов определены с помощью модовой спектроскопии. Продемонстрирована вариативность фазового состава вдоль поверхности волноводов при классическом способе протонирования в муфельной печи. Показано, что омывание кристалла течениями с высокой надкритичностью позволяет ускорить процесс протонного обмена, а также получить более однородные по глубине и фазовому составу волноводы.

Ключевые слова: планарный волновод, протонный обмен, термогравитационная конвекция.

Наиболее часто при изготовлении волноводов методом ионного обмена используют монокристаллы ниобата лития, на поверхности которых происходит замещение ионов донорными атомами солей или кислот. Теоретические исследования показали [1], что в ходе обмена ионов лития с протонами бензойной кислоты вблизи поверхности кристалла образуется запирающий ионный пограничный слой, который замедляет ход протонирования. Как правило, процесс протонного обмена (ПО) на производстве протекает по заданной программе нагрева, выдержки и охлаждения в плотно закрытом реакторе, помещенном в муфельную печь. Считается, что в такой ситуации внутренний объем реактора прогревается равномерно, а в системе отсутствуют крупномасштабные конвективные потоки. Очевидно, что неоднородный нагрев стенок или дна реактора приведет к формированию градиента температуры, который в свою очередь возбудит в расплаве бензойной кислоты термогравитационную конвекцию [2]. Наличие омывающего течения с одной стороны может препятствовать накоплению бензоата лития вблизи поверхности кристалла, с другой приводит к формированию неоднородного по глубине и фазовому составу волновода вдоль его поверхности. Для проверки гипотезы образования запирающего ионного слоя и определения влияния омывающих кристалл течений на оптические свойства формирующегося волновода в работе были проведены эксперименты, при которых процесс ПО осуществлялся под действием конвективных потоков в объеме бензойной кислоты различной интенсивности.

Исследования проводились на кристаллах ниобата лития X и Z среза размером 1×10×15 мм, которые помещались на дно титанового реактора внутренним диаметром 50 мм. Измерение температуры и оценка интенсивности конвективного течения в кислотной среде осуществлялась с помощью шести термопар, введенных внутрь реактора через верхнюю чашу сквозь технологическое отверстие диаметром 6 мм. Процесс протонирования проводился в течение двух часов после выхода системы на рабочую температуру 190°C в муфельной печи. Для создания интенсивных конвективных потоков процесс ПО проходил при неоднородном нагреве дна и стенок реактора с сохранением средней температуры 190°C на плитке. После проведения ПО образцы исследовались методом рентгеноструктурного анализа на рентгеновском двух кристалльном дифрактометре ДРОН-УМ1 в пяти точках. Приращение показателя преломления и глубина волноводов определялись с помощью модовой спектроскопии. После определения оптических свойств кристаллы проходили процедуру отжига и снова исследовались методом РСА и модовой спектроскопией.

В экспериментах при проведении ПО в муфельной печи (промышленный метод ПО) на термопарах был зафиксирован перепад температуры в 0,5-1,5°C между максимально удаленными точками внутри реактора. Неоднородный нагрев, вызванный неустранимым перепадом температуры внутри печи, приводит к возбуждению термогравитационной конвекции в расплаве бензойной кислоты. Наличие конвективных потоков в объеме приводит к формированию волновода с вариативному по площади фазовому составу. Создание более интенсивного течения с высокими надкритичностями путем локального нагрева дна реактора позволило устранить данный эффект. Кроме того, в экспериментах было обнаружено, что при таком способе проведения ПО наблюдается рост приращения показателя преломления и глубины волноводов при сохранении общего времени протонирования 2 часа и средней температуре 190°C. Таким образом, проведенные исследования позволяют не только подтвердить существование запирающего ионного пограничного слоя, но и предлагает возможные варианты его устранения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ и Пермского края (№24-29-20277).

[1] Demin V.A., Petuhov M.I., *JSFU Math. and Phys.*, **18**, №1, 100, (2025).

[2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., *Теоретическая физика Гидродинамика*. - М.: Наука, VI, 736, (1986).

ВЛИЯНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ НА ПОГРЕШНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НА ОБОЛОЧЕЧНЫХ МОДАХ

Полтарак М.Б.^{1,2}, Башкова В.С.², Шевцов Д.И.^{1,2}

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия
PoltarakMB@pnppk.ru

В работе экспериментально обоснованы требования к линии связи датчиков на основе тейпера, учитывая влияние изгибов подводящего и отводящего волокон на погрешность датчика.

Ключевые слова: ВОЛС, тейпер, сдвиг интерференционной картины.

В работе определялись максимально допустимые радиусы изгиба для различных типов волокон (SMF, FS1, FS2, OFS) с числовыми апертурами в диапазоне от 0,12 до 0,15 на длине волны 1550 нм. Были изготовлены датчики согласно статье «High sensitivity fiber refractometer based on an optical microfiber coupler» [1].

Для исследования влияния ВОЛС на погрешности датчика использовалась схема, которая включала в себя широкополосный источник излучения (1500-1600 нм), анализатор оптического спектра, и непосредственно сам датчик. Макет схемы измерения представлен на рисунке 1.

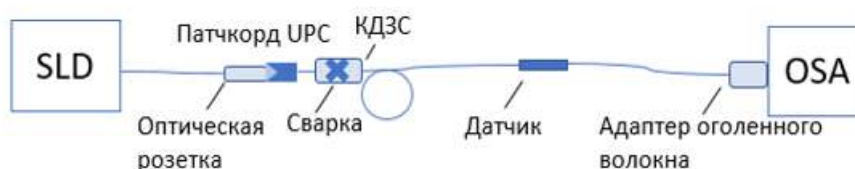


Рис. 1. Схема измерения

Изгибы создавались поочередной намоткой подводящего и отводящего волокон на оснастки диаметром 15, 20 и 30 мм. Сдвиг интерференционной картины фиксировался по локальному минимуму спектра. На рисунке 2 показана типичная интерференционная картина.

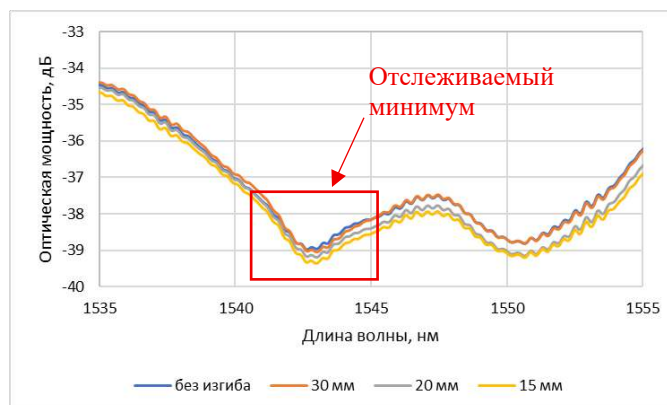


Рис. 2. Сдвиг интерференционной картины при изгибах волокна на оснастках разного диаметра

В ходе работы было выявлено, что температурная чувствительность датчика варьировалась от 0,17 до 1,69 нм/°С в зависимости от типа волокна. Максимальное смещение локальных минимумов при изгибах: для SMF и FS2 – менее 0,04 нм (допустимо), для OFS – до 0,07 нм (превышает норму в 2 раза). А также изгибы отводящего волокна вносят большую погрешность, чем подводящего. Для датчиков на основе тейпера рекомендованы волокна SMF и FS2, устойчивые к изгибам. Волокно OFS требует дополнительной защиты волокон. Также, в ходе работы определены критические радиусы изгиба (≥ 30 мм) для минимизации погрешности датчика.

[1] Bo L., Wang P.F., Semenova Y., and Farrell G., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **25**, №3, 228-230, (2013).

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Четвериков А.С., Шишкин С.А.

АО «НИИ «Экран», г. Самара, Россия

chetverikov86@yandex.ru

Сегодня актуальной задачей является импортозамещение зарубежного программного обеспечения для промышленности. Решена задача разработки отечественного аналога программного обеспечения для проектирования многослойных интерференционных покрытий.

Ключевые слова: проектирование, программное обеспечение, интерференционное покрытие.

В настоящее время импортозамещение зарубежного программного обеспечения в области фотоники для отечественных предприятий является актуальной задачей. Решалась задача разработки отечественного аналога зарубежного десктопного приложения для проектирования интерференционных покрытий Optilayer.

Разработано программное обеспечение для выбора конструктивных параметров многослойных интерференционных покрытий, применяемых для оптических диапазонов длин волн [1]. Программа позволяет решать прямую и обратную задачи (рисунок). Прямая задача состоит в расчете спектральной характеристики при заданной структуре покрытия: количестве слоев и их толщины. Обратная задача состоит в поиске оптимальной структуры покрытия, которая обеспечивает требуемую спектральную характеристику в заданных оптических диапазонах длин волн. Обратная задача решается с помощью математических методов решения многомерных нелинейных задач оптимизации с ограничениями [2]. Ограничения накладываются как на толщину отдельных слоев, так и на толщину всего покрытия. Исходными данными являются угол падения оптического излучения, показатели преломления среды, подложки и материалов, используемых при нанесении покрытия, требуемые значения коэффициентов отражения или пропускания для заданных диапазонов длин волн. Выходными данными являются несколько вариантов многослойных интерференционных покрытий с разными структурами, из которых пользователь может выбирать по своему усмотрению. Каждое сгенерированное программой многослойное интерференционное покрытие оценивается специальной функцией качества, которая определяет степень близости спектральной характеристики полученного покрытия к требуемой спектральной характеристике. Программа производит расчет длин волн излучения для фотометрического контроля нанесения многослойного интерференционного покрытия с учетом технических характеристик вакуумной установки, применяемой для нанесения покрытия.

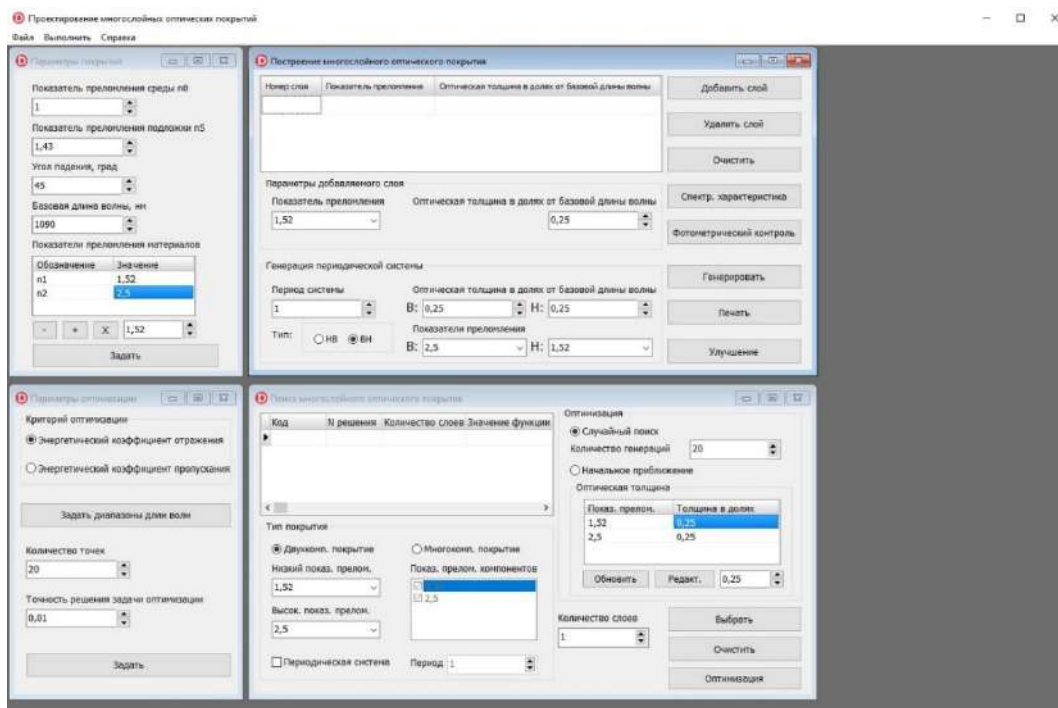


Рисунок. Главное окно программы для проектирования многослойных интерференционных покрытий

[1] Яковлев П.П., Мешков Б.Б., *Проектирование интерференционных покрытий*, М.: Машиностроение, 192 с, (1987).

[2] Тихонравов А.В., *Синтез слоистых сред*. - М.: Знание, 48 с, (1987).

КВАНТОВАЯ ОПТИКА И КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

МЕТОД НЕЛИНЕЙНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОЙ МЕТРОЛОГИИ

Сабанин А.С.¹, Кривицкий Л.А.², Кулик С.П.^{1,3}, Патерова А.В.^{1,2,*}

¹Лаборатория квантовой инженерии света, Южно-Уральский государственный университет,
г. Челябинск, Россия

²Институт исследования материалов и инженерии, Агентство по науке технологиям и исследованиям
A*STAR, Сингапур, Республика Сингапур

³Центр квантовых технологий, Физический факультет, Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*paterovaav@susu.ru

В работе представлен новый метод ИК-спектроскопии и визуализации, основанный на нелинейной интерференции, позволяющий исследовать химический состав образцов посредством регистрации видимого света и обеспечивающий высокую чувствительность, а также широкую применимость технологии.

Ключевые слова: квантовая оптика, квантовая сенсорика, нелинейная интерферометрия.

Инфракрасный (ИК) диапазон длин волн представляет собой область значительного интереса, поскольку ряд молекул демонстрирует характерные полосы поглощения именно в этом диапазоне. Поэтому ИК-спектроскопия и ИК-визуализация являются важными инструментами для измерения химического состава исследуемого образца.

Традиционные методы ИК-микроспектроскопии основаны на использовании синхротронных источников света или квантово-каскадных лазеров (QCL), а также массивов точечных ИК-детекторов. Однако такие источники света имеют ограниченный диапазон перестройки и высокую стоимость. Кроме того, ИК-фотодетекторы страдают от сильных фоновых шумов и требуют охлаждения для повышения отношения сигнал/шум, что, в свою очередь, увеличивает стоимость и ограничивает чувствительность приборов.

В нашей работе мы предлагаем альтернативный подход к ИК-измерениям с использованием явления нелинейной интерференции [1, 2], что позволяет получать информацию о свойствах образца в ИК-диапазоне через регистрацию видимого света. Этот метод продемонстрирован в ряде приложений, включая ИК-визуализацию [2, 3], ИК-спектроскопию [4, 5], оптическую когерентную томографию в ИК-диапазоне [6] и ИК-поляризацию [7]. В последних наших исследованиях мы используем метод нелинейной интерферометрии как в ИК-спектроскопии, так и ИК-визуализации для измерения свойств образца в среднем ИК-диапазоне [8-10]. Наши экспериментальные результаты хорошо согласуются с литературными данными, что подтверждает корректность предлагаемого подхода. Таким образом, наша методика позволяет проводить химическое картирование образца и потенциально может быть использована в медицинской диагностике и химическом анализе.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и Южно-Уральского государственного университета (соглашение № 075-15-2025-018 от 27.02.2025 г.).

- [1] Zou X.Y. et al, *Phys. Rev. Lett.*, **67**, 318-321, (1991).
- [2] Lemos G.B. et al, *Nature*, **512**, 409-412, (2014).
- [3] Paterova A.V. et al, *Appl. Phys. Lett.*, **117**, 054004, (2020).
- [4] Kalashnikov D.A. et al, *Nat. Photonics*, **10**, 98-101, (2016).
- [5] Paterova A.V. et al, *New J. of Phys.*, **20**, 043015, (2018).
- [6] Paterova A.V. et al, *Quant Sci. Tech.*, **3**, 025008, (2018).
- [7] Paterova A.V. et al, *Opt. Exp.*, **27**(3), 2589, (2019).
- [8] Paterova A.V. et al, *Science Advances*, **6**(44), eabd0460, (2020).
- [9] Paterova A.V. et al, *ASC Photonics*, **9**, 2151-2159, (2022).
- [10] Sabanin A. et al, *Laser Phys. Lett.*, **22**, 015203, (2024).

РЕЗОНАНСНАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ АТОМОВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ КВАНТОВЫМ СВЕТОМ

Захаров Р.В.¹, Васильев А.Н.², Тихонова О.В.^{1,2}

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²МГУ имени М.В. Ломоносова, НИИ ЯФ имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

ovtikhonova@mail.ru

Исследована резонансная флуоресценция двухуровневого атома при возбуждении квантовым электромагнитным полем. Обнаружены особенности спектра излучения атома, обусловленные квантовыми свойствами возбуждающего поля. Продемонстрировано возникновение корреляций фотонов в излучении атома.

Ключевые слова: квантовая оптика, резонансная флуоресценция, корреляции фотонов.

Взаимодействие квантовых систем с неклассическими электромагнитными полями на сегодняшний день является быстроразвивающимся направлением современных научных исследований в области квантовой оптики, квантовой информации и нанопотоники. Возможность генерации различных неклассических состояний света в эксперименте открывает широкие возможности для развития перспективных практических приложений. Помимо этого, такие исследования имеют большое фундаментальное значение, поскольку неклассические свойства света и корреляции фотонов обуславливают возникновение новых физических эффектов при взаимодействии такого света с атомно-молекулярными и наноструктурными системами.

Данная работа посвящена исследованию резонансной флуоресценции двухуровневого атома при возбуждении квантовым электромагнитным полем. Отметим, что случай возбуждения классическим полем достаточно хорошо изучен [1], но до сих пор широко обсуждается в литературе [2, 3]. Спектр излучения двухуровневого атома в этих условиях представляет собой хорошо известный триплет Моллоу с неклассическими свойствами рассеянного поля, обусловленными антигруппировкой фотонов [1]. Одновременно с этим, рассеяние излучения атомом при возбуждении квантовым светом очень мало исследовано и фактически ограничивается рассмотрением в приближении заданного поля с известными корреляторами фотонных операторов [4]. В нашей работе развит теоретический полностью квантовый подход, позволяющий из первых принципов анализировать особенности излучения двухуровневого атома при возбуждении квантовым полем. При этом полностью учтены степени свободы как возбуждающего поля, так и диссипативных мод, характеризующих рассеянное излучение. Получено аналитическое решение задачи, позволяющее исследовать возникающие эффекты в пределе бесконечного числа мод излучения. Разработанный подход позволяет учесть нестационарный характер рассеяния, возникающий в случае квантового воздействия, взаимовлияние мод излучения и атомной системы друг на друга, а также анализировать неклассические свойства излучения атома.

В работе продемонстрированы квантовые особенности спектра резонансной флуоресценции атома при возбуждении неклассическим полем. Проанализирована динамика формирования спектра излучения в процессе временной эволюции. Обнаружено существенное влияние начального состояния воздействующего квантового поля на структуру спектра излучения атома. Продемонстрированы корреляции фотонов в излучении атома и проанализированы механизмы их возникновения. Проведено сравнение полученных результатов с классической картиной резонансной флуоресценции. Также решена задача о воздействии излучения атома, возникающего в случае возбуждения квантовым полем, на второй двухуровневый атом, и выявлены особенности их динамики и излучения при учете взаимодействия атомов с общим резервуаром диссипативных мод. Полученные результаты имеют не только фундаментальное значение, но также важны для развития квантовых информационных технологий, разработки атомно-полевого квантового интерфейса, а также генерации неклассических состояний с коррелированными фотонами.

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

[1] Скалли М.О., Зубайри М.С., *Квантовая оптика*, Москва, Физматлит, (2003).

[2] Astafiev O. et al., *Science*, **327**, 840-843, (2010).

[3] Dmitriev A.Yu. et al., *Phys. Rev. A*, **111**, 043715(11), (2025).

[4] Gardiner C.W., Parkins A.S., *Phys. Rev. A*, **50**, 1792-1806, (1994).

УПРАВЛЕНИЕ КВАНТОВЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ В АДИАБАТИЧЕСКОМ КВАНТОВОМ ПАРАМЕТРОНЕ

Бастракова М.В.¹, Пашин Д.С.¹, Пикунев П.В.¹, Щеголев А.Е.^{1,2}

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

²НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобелыцина МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

bastrakova@phys.unn.ru

Разработан метод управления потокового кубита на основе сверхпроводникового адиабатического квантового параметрона через туннелирование Ландау–Зинера для реализации высокоточных квантовых операций 99.99%.

Ключевые слова: квантовые операции, туннелирование Ландау–Зинера.

В современных исследованиях квантовых технологий особую значимость приобретают задачи, связанные с обработкой и передачей квантовой информации – как для телекоммуникационных систем, так и для создания распределённых квантовых вычислительных архитектур. Решение этих задач требует разработки новых устройств передачи и обработки квантовых данных, а также совершенствования методов управления квантовыми состояниями. В сверхпроводниковых системах для реализации подобных идей используют подходы на основе цифровой электроники и адиабатических схем [1, 2]. Особый интерес представляют схемы на основе адиабатического квантового параметрона (АКП, AQFP) – индуктивно шунтированного двухконтактного сверхпроводникового интерферометра. В таких системах уже была экспериментально продемонстрирована возможность переноса классических состояний посредством управляющих импульсов магнитного потока с контролируемой временной формой [2]. Эти результаты открывают перспективы для создания более сложных схем обработки квантовой информации, где параметрон может выступать в качестве базового элемента для передачи и преобразования квантовых состояний. Ключевой задачей при этом становится разработка методов точного управления квантовой динамикой в таких системах, обеспечивающих высокую точность выполнения квантовых операций.

В данной работе представлены принципы оптимального потокового управления для реализации квантовых операций в АКП с учетом технологического разброса параметров в схеме (учет асимметрии индуктивных «плеч» интерферометра) [3]. Проведено численное исследование динамики и выяснено, что в моменты нарастания t_1 /спада t_2 униполярных импульсов магнитного потока, имеющих гладкую трапецевидную форму (см. схему на рисунке), происходит существенное перестроение спектра системы и уровни испытывают сближение (анти-кроссинг), когда существует ненулевая вероятность туннелирования Ландау – Зинера между состояниями. На основе метода градиентного спуска проведено оптимизирование формы управляющего импульса [4]: проведен подбор набег фаз между переходами Ландау – Зинера и начальной фазы состояний до первого анти-кроссинга уровней (длительность воздействия) при заданных параметрах схемы. Благодаря этому удалось продемонстрировать возможность реализации основных однокубитных операций (H-Адамара, X, Z-гейтов) с точностью выполнения операций F (fidelity) выше 99.99% (изображено на рисунке на контурной карте справа) с учетом в моделировании контроля за выходящими уровнями в системе (утечку вне вычислительного базиса). Данный подход лежит в основе формирования квантовой шины передачи данных [5] и «летающих» кубитов, на основе цепочки связанных АКП.

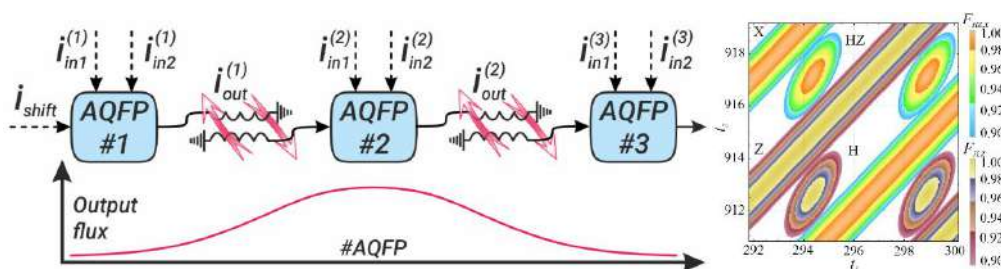


Рисунок. Слева изображена схема квантовой шины данных на основе АКП (AQFP) и справа – контурная карта точности F (fidelity) выполнения квантовых операций (H-Адамара, X, Z-гейтов) на АКП, где t_1, t_2 – времена нарастания/спада униполярных импульсов магнитного потока ($flux$)

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда № 22-72-10075.

- [1] Ayala C.L., Tanaka T., Saito R., et al., *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, **56**(4), 1152-1165, (2020).
- [2] Takeuchi N., Yamae T., Ayala C.L., et al., *IEICE Transactions on Electronics*, **105**(6), 251-263, (2022).
- [3] Bastrakova M.V., Pashin D.S., Pikunov P.V., et al., *Chaos, Solitons and Fractals*, **196**, 116353, (2025).
- [4] Ryzhov A., Ivakhnenko O., Shevchenko S., et al., *Physical Review Research*, **6**(3), 033340, (2024).
- [5] Takeuchi N., Yamae T., Yamashita T., et al., *npj Quantum Information*, **10**(1), 53, (2024).

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ МУЛЬТИМОДОВОГО СЖАТОГО СВЕТА В ПРОЦЕССАХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ

Кузнецов К.А.^{1,2}, Калашников Д.А.¹, Чудаков А.С.^{1,3},
Северин В.В.¹, Пошевкина А.А.^{1,3}, Шарапова П.Р.¹

¹Российский Квантовый Центр, Сколково, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская обл., Россия

k.kuznetsov@rqc.ru

В этой работе мы детально исследуем генерацию сжатого света на основе процессов ПР разных типов. Для характеристики модовой структуры света в случае ПР с высоким коэффициентом усиления мы используем способ гомодинного детектирования. В этом случае лазерный импульс с определенным частотно-пространственным профилем - «локальный осциллятор» - сбивается с квантовым светом на светоделителе. Частотный профиль формируется с помощью амплитудно-фазового модулятора света типа SLM-модулятора. В результате можно измерить сжатие в отдельных модах Шмидта.

Ключевые слова: сжатый свет, моды Шмидта, гомодинное детектирование.

Оптические технологии привлекают внимание исследователей из-за высокой скорости фотонов, возможности миниатюризации с использованием интегральных схем, оснащенных быстрыми электрооптическими механизмами управления и реконфигурируемыми параметрами, что делает их весьма перспективными для разработки вычислительных платформ следующего поколения.

Многомодовый сжатый вакуум (свет с нулевой средней напряженностью поля) является макроскопическим квантовым состоянием света [1]. Такой свет может быть получен в нелинейно-оптических кристаллах при облучении импульсными лазерами в процессе параметрического рассеяния (ПР) света с высоким коэффициентом параметрического усиления. Эффект ПР заключается в когерентном распаде фотонов накачки на пары фотонов с меньшей энергией в нелинейно-оптической среде [2]. Для характеристики модовой структуры света в случае ПР с высоким коэффициентом усиления можно использовать способ гомодинного детектирования. В этом случае лазерный импульс с определенным частотно-пространственным профилем (так называемый «локальный осциллятор» - ЛО) сбивается с квантовым светом на светоделителе. Частотный профиль формируется с помощью амплитудно-фазового модулятора света типа SLM-модулятора. В результате можно измерить сжатие в отдельных модах Шмидта [3].

В этой работе мы исследуем генерацию сжатого света на основе процессов параметрического рассеяния. Модуляция фазы осуществлялась за счет периодического смещения зеркала на пьезоподаче в канале ЛО при одновременном смещении бифотонного и ЛО полей на гомодинном детекторе [4]. На рисунке представлен пример измерения сжатия и анти-сжатия для ПР типа 0 в периодически поляризованном кристалле КТР.

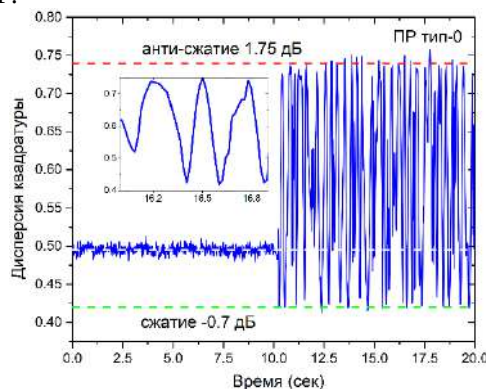


Рисунок. Квадратурные данные гомодинного детектора при одномодовом сжатии ПР тип-0

Генерация многомодового сжатого вакуума является перспективным ресурсом для выполнения квантовых операций в различных вычислителях. Знание свойств различных источников неклассического света позволит конструировать кластерные состояния с многомерной запутанностью.

Работа выполнена при поддержке госкорпорации «Росатом» в рамках Дорожной карты по квантовым вычислениям (Договор № 868-1.3-15/15-2021 от 5 октября 2021 года).

[1] Захаров Р.В., Тихонова О.В., *Успехи физических наук*, **193**, 406-436, (2023).

[2] Klyshko D.N., *Photons and Nonlinear Optics*, Gordon and Breach, New York, (1988).

[3] Sharapova P., et al., *Phys. Rev. A*, **91**, 043816, (2015).

[4] Masalov A.V., Kuzhamuratov A., Lvovsky A.I., *Rev. Sci. Instrum.*, **88**, 113109, (2017).

АНАЛИЗ ПЕРЕПУТАННОСТИ В РАМКАХ МНОГОФОТОННОЙ ТРЕХКУБИТНОЙ МОДЕЛИ ТАВИСА-КАММИНГСА

Багров А.Р., Башкиров Е.К.

Самарский университет им. Королева, г. Самара, Россия
alexander.bagrov00@mail.ru

Представлено точное решение для многофотонной модели Тависа-Каммингса, в которой три идентичных кубита взаимодействуют с модой когерентного поля резонатора. Используя точное решение, мы рассчитали линейную энтропию, отрицательность и проанализировали динамику перепутывания.

Ключевые слова: кубиты, перепутывание, одномодовый резонатор.

Квантовые перепутанные состояния являются основным физическим ресурсом, используемым при квантовой обработке информации, в частности для физики квантовых вычислений и квантовых коммуникаций [1]. Квантовая электродинамика резонаторов (РКЭД) является приоритетным инструментом для исследований свойств перепутанных состояний многокубитных систем [2]. В последнее время в рамках РКЭД удалось экспериментально реализовать перепутанные состояния кубитов различной физической природы, такие как сверхпроводящие кольца с джозефсоновскими переходами, примесные спины и так далее [3]. Теоретические исследования систем кубитов, взаимодействующих с выделенными модами резонаторов в рамках РКЭД, основаны на модели Джейнса-Каммингса и её обобщениях (см. ссылки в [4]). В последние годы исследованию трехкубитных систем посвящается большое число как теоретических, так и экспериментальных работ (см. ссылки в [5]). Интерес к трехкубитным системам обусловлен возможной реализацией трехкубитных вентилях – Тоффли и Фредкина, которые могут позволить существенно упростить коды квантовых коррекций ошибок, а также реализовать более сложные квантовые алгоритмы [6].

В данной работе мы исследовали модель Тависа-Каммингса, в которой три идентичных кубита Q_1 , Q_2 и Q_3 резонансно взаимодействуют с модой электромагнитного когерентного поля резонатора посредством многофотонных процессов. Гамильтониан взаимодействия исследуемой модели можно записать в стандартных приближениях следующим образом

$$\hat{H}_{Int} = \hbar\gamma \sum_i (\hat{\sigma}_i^+ \hat{a}^m + \hat{\sigma}_i^- \hat{a}^{+m}), \quad (1)$$

где γ – постоянная, определяющая связь между кубитом и модой поля резонатора, $\hat{\sigma}_i^+$ ($\hat{\sigma}_i^-$) – повышающий (понижающий) оператор для i -го кубита, $\hat{a}$ ($\hat{a}^+$) – оператор уничтожения (рождения) фотона в моде резонатора, m – кратность фотонных переходов. Мы предполагаем, что начальным состоянием поля резонатора является когерентное состояние с матрицей плотности вида: $\hat{\rho}_{CS}(0) = e^{-\bar{n}} \sum_{n,m} \bar{n}^{m/2} \bar{n}^{n/2} / \sqrt{m! n!} |m\rangle\langle n|$. Предположим также, что кубиты в начальный момент времени приготовлены в GHZ-подобных состояниях следующего типа: $|G_1(0)\rangle = \cos \vartheta |+, +, +\rangle + \sin \vartheta |-, -, -\rangle$, $|G_2(0)\rangle = a|-, -, +\rangle + b|-, +, -\rangle + c|+, -, -\rangle + d|+, +, +\rangle$, $|G_3(0)\rangle = a|+, +, -\rangle + b|+, -, +\rangle + c|-, +, +\rangle + d|-, -, -\rangle$, $|G_4(0)\rangle = a|+, -, -\rangle + b|-, +, +\rangle$. Здесь $|+\rangle$ и $|-\rangle$ обозначают возбуждённое и основное состояния двухуровневого атома (кубита). Сепарабельные, бисепарабельные и W-состояния кубитов можно получить из GHZ-состояний путём вариации параметров ϑ, a, b, c и d , которые задают начальную степень перепутывания кубитов. Таким образом, наше исследование охватывает все возможные классы перепутанных состояний [7]. Для модели (1) и указанных начальных состояний кубитов и поля резонатора нами аналитически решено квантовое уравнение Лиувилля $i\hbar d\hat{\rho}_f/dt = [\hat{H}_{Int}, \hat{\rho}_f]$ для полной матрицы плотности $\hat{\rho}_f$, которая описывает “три кубита+моду поля резонатора”. Используя полную матрицу плотности $\hat{\rho}_f$, нетрудно вычислить различные параметры системы. В данной работе делается акцент на исследовании эволюции линейной энтропии и критерия Переса-Хородецких. Результаты компьютерного моделирования показывают, что кратность фотонных переходов m можно рассматривать в качестве эффективного механизма для управления перепутанностью. Мы также оцениваем время коллапса и возрождения осцилляций Раби параметров перепутывания для различных фотонных процессов.

- [1] Huang H.-L., Wu D., Fan D., Zhu X., *Sci. China Inf. Sci.*, **63**, 1-32, (2020).
- [2] De Bernardis D., Mercurio A., De Liberato S., *J. Opt. Soc. Am. B.*, **41**, №8, 206-221, (2024).
- [3] Xiang Z.-L., Ashhab S., You J.Y., Nori F., *Rev. Mod. Phys.*, **85**, №2, 623-653, (2013).
- [4] Larson J., Mavrogordatos T., Parkins S., Vidiella-Barranco A., *J. Opt. Soc. Am. B*, **41**, №8, 1-261, (2024).
- [5] Bagrov A.R., Bashkirov E.K., *St. Petersburg polytechnic University Journal: Physics and Mathematics*, **17**, №1, 367-371, (2024).
- [6] Reed M.D., et al., *Nature*, **482**, 382-385, (2012).
- [7] Mohd S.M., et al., *IJACSA*, **10**, №7, 374-379, (2019).

**ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМ
КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ**

**Наседкин Б.А., Исмагилов А.О., Опарин Е.Н., Соломатин О.Е., Чистяков В.В.,
Гайдаш А.А., Цыпкин А.Н., Егоров В.И., Козубов А.Н.**

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
banasedkin@itmo.ru

В работе представлены результаты исследования, посвящённые спектральным измерениям волоконно-оптических компонентов систем квантового распределения ключей. Предложены схемы измерения в различных диапазонах длин волн. Апробированы различные варианты измерения спектральных характеристик волоконно-оптических элементов в зависимости от температуры.

Ключевые слова: квантовый взлом, квантовое распределение ключей.

Системы квантового распределения ключей (КРК) гарантируют, что ключ, сформированный в результате передачи последовательности защищён на уровне фундаментальных законов физики. Технические реализации таких систем могут быть уязвимы к действиям нарушителя, направленным на извлечение передаваемых последовательностей. Существует ряд атак на техническую реализацию систем КРК, которые используют лазерное излучение для своей реализации. В связи с этим возникает необходимость спектральных характеристик оптических элементов, используемых в системах КРК на наличие уязвимостей, которыми может воспользоваться нарушитель [1].

В настоящее время существуют различные подходы к спектральным измерениям волоконно-оптических элементов. Для схем измерений можно выделить два основных узла, которые определяют характеристики, влияющие на динамический и спектральный диапазоны измерений: источник зондирующего излучения и устройство измерения интенсивности в зависимости от длины волны. В случае источников могут использоваться перестраиваемые лазеры [2], источники суперконтинуума [3-5] и тепловые источники. В случае измерительных устройств можно выделить: спектроанализаторы [1, 2, 5] и монохроматоры [4] и детекторы одиночных фотонов, используемые совместно с перестраиваемыми фильтрами [3]. Перечисленные подходы позволяют проводить измерения в широком спектральном и динамическом диапазонах. Однако, в настоящее время данные измерения не учитывают ряд особенностей волоконно-оптических элементов, которые могут повлиять на конечный результат и, как следствие, на оценки, основанные на данных измерениях. К таким особенностям можно отнести, например изменения температуры во время проведения исследований. Данные изменения могут быть вызваны использованием для измерений мощного широкополосного излучения, которое для перечисленных работ располагается в диапазоне от 100 мВт до 4,5 Вт. В некоторых случаях обозначенной мощности достаточно для изменения спектральных характеристик исследуемых элементов [6] или же необратимого повреждения исследуемых элементов. Это приводит к необходимости учёта и корректировки мощности зондирующего излучения при проведении измерений. И наиболее оптимальным с точки зрения действия зондирующего излучения на исследуемые элементы представляется использование ослабленного излучения, аналогично представленному в работе [3]. Другим немаловажным фактором в случае учёта зависимости температуры является рабочая температура исследуемой системы квантового распределения ключей. Данная температура может отличаться от нормальных условий, при которых проходят измерения спектральных характеристик, что также требует учёта.

В представленной работе рассмотрены различные подходы к измерению спектров пропускания в зависимости от температуры исследуемых волоконно-оптических элементов. Первый подход подразумевает использование климатической камеры, в которую помещались исследуемые элементы. Второй подход подразумевает изменение температуры за счёт использования нагревателя собственной конструкции. Третий подход подразумевает измерения изменения спектров пропускания под действием внешнего лазерного источника. Полученные в результате серии измерений данные были использованы для сравнения перечисленных подходов.

Было исследовано влияние изменений пропускания исследуемых элементов под действием температуры на оценку границы Холево для системы КРК на боковых частотах и системы КРК на непрерывных переменных.

Наседкин Б.А. и Чистяков В.В. благодарят за поддержку Российский научный фонд (проект 24-11-00398).

- [1] Jain N. et al., *IEEE Jour. of Selec. Top. in Quant. El.*, **21**, №3, 168-177, (2014).
- [2] Makarov V. et al., *Phys. Rev. Appl.*, **22**, №4, 044076, (2024).
- [3] Sushchev I.S. et al., *Phys. Rev. Appl.*, **22**, №3, 034032, (2024).
- [4] Nasedkin B. et al., *Phys. Rev. Appl.*, **20**, №1, 014038, (2023).
- [5] Борисова А.В. и др., *Опт. и спектр.*, **128**, №11, 1758-1766, (2020).
- [6] Ponosova A. et al., *PRX Quantum*, **3**, №4, 040307, (2022).

ЭФФЕКТ ХАНЛЕ В ОСНОВНОМ СОСТОЯНИИ АТОМОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ В ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННОЙ СВЕТОВОЙ ВОЛНЕ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ К КВАНТОВОЙ МАГНИТОМЕТРИИ

Козлова К.С.^{1,2}, Макаров А.О.^{1,2}, Бражников Д.В.^{1,2}, Гончаров А.Н.^{1,2,3}

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

²Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

k.kozlova1@g.nsu.ru

Предложен и исследован с использованием миниатюрных ячеек с атомами ^{133}Cs поляриметрический метод регистрации магнитооптических резонансов (эффект Ханле). Полученная оценка чувствительности измерений магнитного поля делает предлагаемый метод перспективным для биомедицинских приложений.

Ключевые слова: эффект Ханле, магнитометры с оптической накачкой, поляриметрия.

Технологии, связанные с квантовыми магнитометрами с оптической накачкой (КМОН), в настоящее время активно развиваются и применяются во многих областях от навигации и медицины до фундаментальных исследований на Земле и в космосе. КМОН обладают рядом ключевых преимуществ в сравнении как с классическими магнитными сенсорами, так и с другой квантовой технологией – сверхпроводящими квантовыми интерференционными датчиками (СКВИД). А именно, уникальностью КМОН заключается в объединении таких особенностей, как небольшие габариты и энергопотребление, работа при температуре около комнатной и высокая чувствительность.

В настоящей работе исследуются магнитооптические резонансы (МОР) пересечения уровней в нулевом магнитном поле (эффект Ханле в основном состоянии) [1]. Для экспериментов использовалась стеклянная ячейка с размерами $5 \times 5 \times 5 \text{ мм}^3$, наполненная парами атомов ^{133}Cs и буферным газом ($\text{Ar} + \text{N}_2$ с давлением 200 торр). Для наблюдения резонансов излучение диодного лазера с внешним резонатором ($\lambda \approx 895 \text{ нм}$) возбуждало оптические переходы в D_1 -линии и сканировалось магнитное поле около нулевого значения, приложенное поперёк направления распространению светового пучка. В классической (абсорбционной) схеме наблюдения использовался свет с круговой поляризацией, а резонансы регистрировались в интенсивности прошедшего через ячейку излучения.

Для улучшения чувствительности классическая схема была модифицирована по аналогии с работой [2]. В частности, использовалась световая волна с эллиптической поляризацией. Благодаря магнито-чувствительному циркулярному дихроизму в среде происходило изменение параметра эллиптичности при сканировании магнитного поля, что регистрировалось с помощью балансного фотоприёмника (БФП). Такой способ регистрации позволяет вычесть шум интенсивности излучения на балансном выходе БФД, преобладающий на каждом из его каналов по отдельности (см. рисунок).

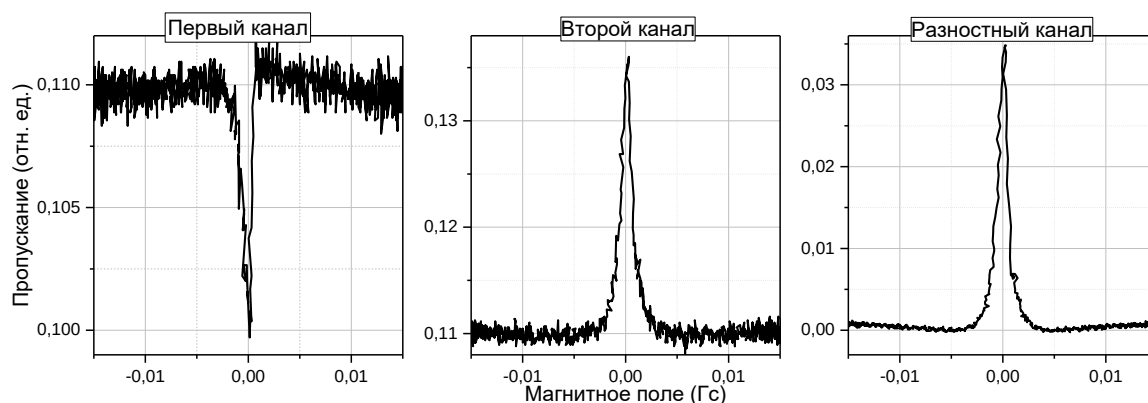


Рисунок. Резонансы Ханле, наблюдавшиеся в трёх каналах БФД при $T_{\text{cell}} \approx 85^\circ\text{C}$, $P \approx 1.5 \text{ мВт}$, $\varepsilon \approx 10$

МОР исследовались на переходах $F_g=3 \rightarrow F_e=3,4$ и $F_g=4 \rightarrow F_e=3,4$ при разных температурах ячейки (T_{cell}), оптической мощности (P) и эллиптичности поляризации (ε). Получены оценки чувствительности измерений магнитного поля: $\approx 10 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ для классической схемы и $\approx 0.5 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ для поляриметрической. При этом ширина полосы измерений в поляриметрической схеме составила $\approx 200 \text{ Гц}$, что примерно в 1.5 раза выше, чем у коммерческих аналогов (например, QZFM Gen-1 от QuSpin). Показано, что в текущих условиях эксперимента чувствительность ограничена техническими шумами и может быть улучшена на порядок при их устранении. Работа поддержана РФФ (грант № 23-12-00195).

[1] Александров Е.Б. и др., *Опт. Спектр.* XXIII, 282, (1967).

[2] Makarov A.O. et al., *Opt. Commun.*, 577, 131369, (2025).

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ АТОМА НА ФОРМИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ ВИХРЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИОНИЗАЦИИ ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

Ларионов Н.В.^{1,2}, Молчановский В.М.¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
larionov.nickolay@gmail.com

В работе теоретически исследуются квантовые вихри, образованные электроном, вырванным в процессе ионизации двумерного атома водорода сверхкоротким лазерным импульсом. Показано, что на характеристики вихрей существенно влияет начальное состояние атома.

Ключевые слова: квантовые вихри, ионизация, предельно короткий импульс.

При воздействии электромагнитным импульсом на одиночный атом возможно образование таких структур как квантовые вихри [1]. Последние представляют собой специфические возмущения в электронной плотности: центр вихря является запрещённой областью для электрона, а ток вероятности закручивается вокруг этого центра.

В работах [2, 3] нами исследовались квантовые вихри, образующиеся при надбарьерной ионизации двумерного атома водорода сверхкоротким лазерным импульсом (см. рисунок). Применяя теорию возмущений к нестационарному уравнению Шредингера, были найдены его приближённые решения, раскрывающие интерференционную природу вихрей. Однако, все расчёты и исследования были выполнены для случая, когда атом до воздействия ионизирующего импульса находился в основном состоянии.

В данной работе, придерживаясь развитого нами ранее алгоритма нахождения приближённого решения уравнения Шредингера [2, 3], анализируется влияние начального состояния двумерного атома водорода на образование квантовых вихрей. Показано, что это влияние может приводить к деструктивному эффекту с исчезновением вихрей или может быть подавлено изменением параметров сверхкороткого лазерного импульса.

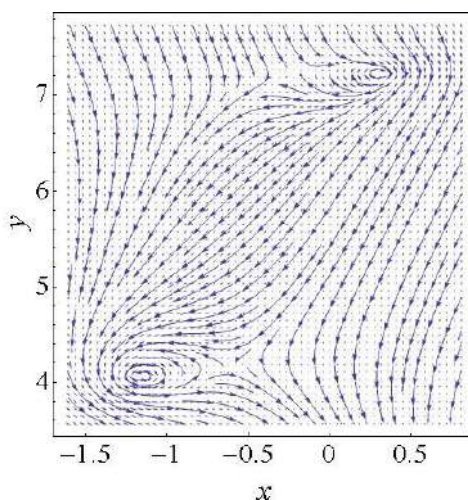


Рисунок. Ток вероятности вблизи центров квантовых вихрей. Масштаб представлен в атомных единицах (а.е.). Электрон вырван лазерным импульсом, продолжительностью $T=3$ а.е. и амплитудой $F_0=5$ а.е.

Представленная работа актуальна не только с фундаментальной точки зрения, поскольку исследуются специфические квантовые состояния, отмеченные ещё Шредингером и Дираком [4], но и с точки зрения возможных практических приложений в области новых режимов управления на атомарных масштабах [5].

- [1] Ovchinnikov S.Yu., Sternberg J.B., Macek J.H., Teck-Ghee Lee, Schultz D.R., *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 203005, (2010).
- [2] Ларионов Н.В., Макаров Д.Н., Смирновский А.А., Овчинников С.Ю., *ЖЭТФ*, **156**, №6, 1035-1043, (2019).
- [3] Ларионов Н.В., Колесников Ю.Л., Молчановский В.М., *Опт. и спектр.*, **132**, №5, 485-495, (2024).
- [4] Schrodinger E., *Phys. Rev.*, **28**, 1049, (1926); Dirac P.A.M., *Proc. R. Soc.*, A **133**, 60, (1931).
- [5] Архипов Р.М., Белов П.А., Архипов М.В., Пахомов А.В., Розанов Н.Н., *Квантовая электроника*, **52**, №7, 610-614, (2022).

**ПРОГРАММИРОВАНИЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО
ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА
ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНО ЗАПУТАННОГО
ТРЕХФОТОННОГО КВАНТОВОГО СОСТОЯНИЯ**

**Кондратьев И.В.¹, Урсова К.Н.¹, Аргенчиев А.С.¹, Бирюков Ю.А.¹,
Скрябин Н.Н.^{1,2}, Дьяконов И.В.^{1,2}, Страупе С.С.^{1,2}, Кулик С.П.¹**

¹Центр квантовых технологий, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Российский квантовый центр, Москва, Россия

iv.kondratjev@physics.msu.ru

Экспериментально продемонстрировано приготовление максимально запутанного трёхкубитного состояния Гринбергера-Хорна-Цайлингера (ГХЦ) на базе универсального шестипортового интегрально-оптического интерферометра, изготовленного методом фемтосекундной лазерной записи. Процедуры генерации состояния и его полной квантовой томографии реализованы внутри единой волноводной структуры.

Ключевые слова интегральная фотоника; программируемый интерферометр; запутанные состояния.

Интегральная фотоника даёт возможность разрабатывать миниатюрные и перестраиваемые чипы, выполняющие линейные оптические преобразования над входным излучением – светом, что позволяет обрабатывать как классические, так и квантовые сигналы. Особый интерес вызывают универсальные многопортовые интерферометры, способные в теории реализовывать произвольные унитарные преобразования. Такие устройства перспективны для применения в квантовых вычислениях [1]. Однако современные конструкции интерферометров подвержены неидеальностям изготовления, что снижает их эффективность и ограничивает внедрение в практические системы.

В данной работе представлено экспериментальное исследование усовершенствованной интерферометрической структуры [2] (рисунок А), в которой чередующиеся многопортовые светоделители и фазовые сдвиги обеспечивают повышенную устойчивость к возможным неидеальностям структуры.

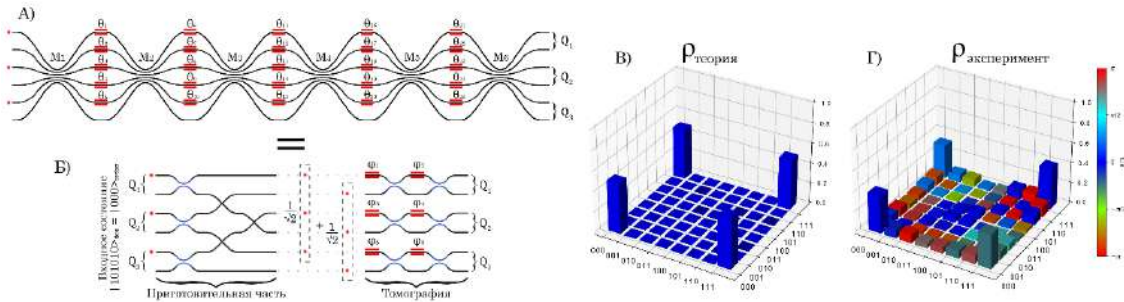


Рисунок. А) Схематическое изображение волноводной структуры исследуемого шестипортового чипа [2], способного в том числе реализовать эквивалентное преобразование структуре, изображенной под (Б). Б) Пассивный интерферометр способный приготовить ГХЦ состояние трёх фотонов [3].

В) Идеальная матрица плотности ГХЦ состояния и экспериментально полученная (Г)

Мы изготовили шестипортовый интегрально-оптический чип на основе архитектуры [2] методом фемтосекундной лазерной печати и разработали его аналитическую модель. Все параметры чипа были определены экспериментально с коэффициентом корреляции 0.99. Для демонстрации универсальности изготовленного интерферометра было реализовано преобразование, эквивалентное структуре из [3] (рисунок Б), генерирующее трёхфотонное ГХЦ-состояние (1) в логическом базисе с учетом постселекции:

$$|\psi\rangle = 1/\sqrt{2} (|000\rangle_L + |111\rangle_L) = 1/\sqrt{2} (|101010\rangle_{\text{Fock}} + |010101\rangle_{\text{Fock}}). \quad (1)$$

Кубиты были реализованы посредством dual-rail кодирования, где логические базисные состояния кодировались пространственным распределением одиночных фотонов между парой соседних волноводов.

Важно подчеркнуть, что универсальность схемы позволила осуществлять как генерацию запутанных состояний, так и проекционные измерения в заданных базисах в рамках единой структуры, без привлечения дополнительных интерферометрических элементов. В качестве источника одиночных фотонов использовалась квантовая точка с пространственным демультиплексированием. В результате эксперимента была измерена матрица плотности трёхкубитного квантового состояния, фиделити которой с матрицей плотности идеального ГХЦ-состояния составило 0.89 (рисунок В, Г).

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 22-12-00353-П).

[1] PsiQuantum Team, *Nature*, **641**, 876-883, (2025).

[2] Kondratyev I.V. et al., *AIP Conference Proceedings*, **2241**, 020022, (2020).

[3] Pont M. et al., *npj Quantum Information*, **10**, 50, (2024).

УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЗОНАНСОВ ФАНО К ДЕКОГЕРЕНЦИИ ПРИ КВАНТОВОМ ТРАНСПОРТЕ В ЛЕСТНИЧНОЙ СТРУКТУРЕ

Мураев П.С.¹, Максимов Д.Н.^{1,2}, Коловский А.Р.^{1,2,3}

¹Сибирский федеральный университет, МНИЦ СКХ, г. Красноярск, Россия

²Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

³Сибирский федеральный университет, Институт инженерной физики и радиоэлектроники, г. Красноярск, Россия
muraev.pavel@mail.ru

Исследовано влияние декогеренции от резервуаров на транспорт фермионов в двухплечевой лестнице. Показано, что декогеренция разрушает резонансы, индуцированные ВИС, но сохраняет резонансы Фано, что позволяет управлять проводимостью от максимума до нуля.

Ключевые слова: квантовый транспорт, резонансы Фано, связанные состояния в континууме.

Явление резонансного туннелирования, и сопутствующее этому наличие резонансных пиков в проводимости, встречается в различных физических системах, таких как макроскопические твердотельные устройства, фотонные кристаллы и установки с ультрахолодными атомами. Принципиальная возможность наблюдения резонансных пиков в проводимости (или токе) для электронов следует из теории Ландауэра, которая связывает проводимость системы с вероятностью прохождения волны Блоха с квазиимпульсом Ферми [1]. При этом транспорт в системах, подключенных к резервуарам, имеет особенности. Главная причина — неунитарная релаксационная динамика резервуаров, обеспечивающая их тепловое равновесие. Эта динамика вызывает частичную декогеренцию транспортных состояний электронов, что модифицирует резонансную проводимость [2].

В данной работе исследован транспорт фермионов в квази-одномерной решетке — двухплечевой лестнице (англ. two-leg ladder, рисунок а). Сначала в рамках задачи рассеяния показано, что система, помимо обычных резонансов, демонстрирует резонансы Фано (FR, рисунок в) и резонансы, индуцированные связанным состоянием в континууме (BIC). Далее исследуется транспорт через лестницу (рисунок б), подключенную к резервуарам [3]. Результаты сравниваются для обоих подходов.

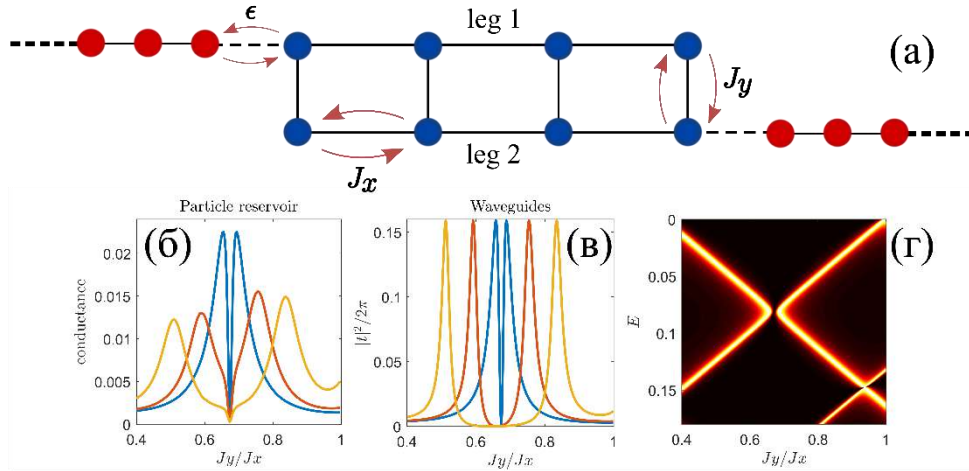


Рисунок. Схема модели: двухплечевая лестница в задаче рассеяния (а). Резонанс Фано в проводимости для задачи с резервуарами (б) и в коэффициенте прохождения для задачи рассеяния (в). Квадрат модуля вероятности прохождения волны через исследуемую модель в виде цветовой карты в окрестности резонанса Фано (г)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта № 25-12-00268.

[1] Datta S., *Electronic transport in mesoscopic systems*, Cambridge: Cambridge University Press., (1997).

[2] Kolovsky A.R., *Europhysics Letters*, **146**, 61001, (2024).

[3] Kolovsky A.R. and Maksimov D.N., *Physical Review B*, **104**, 115115, (2021).

**ЭФФЕКТИВНАЯ УСТОЙЧИВАЯ К ШУМАМ ТОМОГРАФИЯ
МНОГОМОДОВЫХ ЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ
ОДИНОЧНЫМИ ФОТОНАМИ**

Бирюков Ю.А.¹, Морозов Р.Д.¹, Дьяконов И.В.^{1,2}, Страупе С.С.^{1,2}, Кулик С.П.¹

¹МГУ. им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

²«Российский Квантовый Центр», Большой бульвар 30с1, Москва, Россия

biriukov.ia18@physics.msu.ru

Предложен эффективный метод томографии линейно-оптического интерферометра с использованием двухфотонной интерференции. Метод устойчив к шумам, требует линейного числа измерений и демонстрирует 99,7% точность на 4-модовом интерферометре.

Ключевые слова: линейная оптика, квантовая оптика, многомодовые интерферометры.

Линейно-оптические (ЛО) интерферометры — ключевые элементы квантовых вычислений на фотонах. Погрешности изготовления их базовых элементов (светоделителей, фазовращателей) приводят к отклонению реальной унитарной матрицы преобразования от расчётной. Томография, то есть восстановление этой матрицы, необходима для учёта ошибок в экспериментах.

Предлагается эффективный и устойчивый к шумам метод томографии, основанный на двухфотонной интерференции. В пару входных мод (одна фиксирована, вторая сканируется) последовательно подаются одиночные неразличимые фотоны от квантовой точки, возбуждаемой периодическими лазерными импульсами. Измеряется кросс-корреляционная функция между всеми парами выходных мод.

Корреляция в нулевой задержке определяется неклассической интерференцией неразличимых фотонов и элементами матрицы. Боковые пики, вызванные периодичностью накачки, соответствуют интерференции различных фотонов из разных временных окон. Отношение амплитуд центрального пика к боковым ("видность интерференции") зависит только от входных потерь и неразличимости фотонов, но не от выходных потерь. В отличие от предыдущих методов [1, 2], благодаря периодичности сигнала, для оценки видности требуется лишь одно измерение на пару мод вместо двух.

Использование быстрой ПЛИС позволяет измерять все взаимные корреляции одновременно. Число необходимых измерений растёт линейно с числом мод N ($O(N)$), что обеспечивает эффективность. По измеренным видностям запускается глобальная оптимизация для восстановления передаточной матрицы.

Метод реализован для 4-модового интерферометра. Достигнуто высокое соответствие (99.7%) между экспериментальными и восстановленными передаточными матрицами, подтверждающее точность томографии.

[1] Laing A., O'Brien J. L. *arXiv preprint, arXiv:1208.2868*, (2012).

[2] Tillmann M., Schmidt C., Walther P., *Journal of Optics*, **18**, №11, 114002, (2016).

ЛАЗЕРНАЯ И СИЛОВАЯ ОПТИКА

**МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ И КОНТРОЛЯ ОБЪЕМНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ
СУБВОЛНОВЫХ СТРУКТУР В ПРОЦЕССЕ ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ
В ОБЪЕМЕ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Богацкая А.В.^{1,2}, Волкова Е.А.³, Гулина Ю.С.¹, Рупасов А.Е.¹, Попов А.М.^{1,2}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет,
Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, НИИ ядерной физики
имени Д.В. Скобелыцына, Москва, Россия
annabogatskaya@gmail.com

Исследован процесс объемной самоорганизации плазмы в плавленом кварце в процессе лазерного микроstructuring. Определены оптимальные параметры лазерного воздействия. Проведено сравнение с экспериментом по наблюдению накоплению дефектов при многоимпульсном воздействии.

Ключевые слова: прямая лазерная запись, двулучепреломляющие микроstructures

В работе представлено трехмерное самосогласованное моделирование процесса образования и последующей самоорганизации плотной плазмы при воздействии жестко сфокусированного ИК фемтосекундного лазерного импульса в объеме плавленого кварца. Модель основана на совместном интегрировании волнового уравнения второго порядка в цилиндрической геометрии и скоростного уравнения для динамики плотности носителей заряда в зоне проводимости. Показано, что в предфокальной зоне возникает плазменный объект с электронной плотностью $\sim 1 - 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, который эффективно рассеивает падающее лазерное излучение. Когерентная интерференция плоской падающей и рассеянной окосферической волн приводит к формированию плазменных квазипериодических субволновых микроstructures как в r -, так и в z -направлениях [1, 2]. Полученные плазменные профили находятся в хорошем согласии с СЭМ изображениями модификаций в плавленом кварце, полученных в аналогичных условиях лазерного воздействия [3, 4]. В рамках моделирования авторы также исследовали возможность получения микроstructures различных морфологий за счет управления интерференционной картиной лазерного поля в околофокальной области в присутствии отражающих слоев, напыленных на образец плавленого кварца (в качестве отражателей были исследованы металлические пленки и диэлектрические зеркала). Здесь важно отметить, что формирование интерференционной картины с более регулярными максимумами и минимумами напряженности лазерного поля в объеме кварца в присутствии отражающих пленок позволяет понизить порог плазмообразования и, как следствие, обеспечить создание микроstructures при меньших интенсивностях воздействующего излучения и меньшем числе импульсов в точки.

Результаты исследования важны для понимания и контроля начальной (плазменной) стадии процесса лазерного микроstructuring в объеме прозрачных диэлектриков, релаксация, последующее охлаждение и термализация которой вызывают периодические изменения показателя преломления в режиме накопления при многоимпульсном лазерном воздействии. Создание объемных двулучепреломляющих периодических микроstructures представляют актуальность для ряда практических приложений, таких как новые функциональные метаматериалы, объемные дифракционные элементы и пятимерная оптическая память [5, 6].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-72-10076-П).

[1] Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov. A.M., *Europhysics Letters*, **147**, 35001, (2024).

[2] Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov. A.M., *Applied Physics A*, **131**, 79, (2025).

[3] Gulina Yu.S. et.al., *JETP Letters*, **119**, 638-644, (2024).

[4] Zhang F. et.al., *Opt. Express*, **27**, 6442-6450, (2019).

[5] Zhang J. et. al., *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 033901, (2014).

[6] Lei et. al., *Optica*, **8**, 1365-1371, (2021).

**ВЫСОКОМОЩНАЯ ВОЛОКОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА
МОЩНОСТЬЮ 30 кВт**

**Летов Д.А., Колегов А.А., Круликовский Д.А., Дорох А.В.,
Казимов Т.Р., Немочкин А.С., Иванов В.А.**

ООО «Лассард», Москва, Россия

d.letov@lassard.ru

Разработана волоконная лазерная система мощностью 30 кВт на основе 11 одномодовых блоков по 3 кВт. Реализовано сложение излучения с фильтрацией оболочечных мод и параметром качества пучка M^2 менее 12.

Ключевые слова: волоконные лазеры; сложение излучения; фильтрация мод.

В настоящее время волоконно-оптические лазерные системы демонстрируют значительный рост применения в различных технологических областях, включая обработку материалов, нелинейную оптику, медицинскую аппаратуру и метрологические установки. Преимуществом волоконных лазеров являются их компактные размеры, высокая надежность и способность обеспечивать существенную выходную мощность, что позволяет успешно заменять традиционные твердотельные и СО₂-лазеры [1]. Для Российской Федерации разработка высокомоощных лазерных комплексов остается стратегически важным направлением. Промышленное применение преимущественно сосредоточено на системах мощностью до 50 кВт, которые эффективно используются в металлообработке, дистанционной резке металлических конструкций и ликвидации нефтяных разливов [2, 3]. В связи с этим обеспечение технологического суверенитета в данной области приобретает особую актуальность.

Настоящая разработка представляет собой лазерную систему с выходной мощностью 30 кВт, построенную по модульному принципу. Конструкция включает одиннадцать идентичных одномодовых волоконных лазерных блоков мощностью 3 кВт каждый, объединительный блок и оптический коннектор QD. Оптическая конфигурация базового лазерного блока содержит шесть модулей накачки мощностью 750 Вт, устройство объединения накачки, пару брэгговских решеток, активное иттербиевое волокно и фильтр оболочечных мод.

Резонаторная базового блока реализован на основе волокна double clad (DC) 25/400 мкм, при этом выходное волокно объединителя и фильтра имеют параметры 25/250 мкм. Коэффициент полезного действия «свет в свет» базового блока достигает не менее 72%, а параметр качества пучка (M^2) находится в диапазоне 1,4-1,5. Объединение базовых блоков осуществляется посредством высокомоощного объединителя с выходным волокном диаметром 100 мкм, обеспечивающего качество пучка $M^2 \leq 12$ при общей выходной мощности 30 кВт.

В процессе разработки был выявлен критический нагрев сигнального объединителя до 80°C при запуске пяти базовых блоков, обусловленный распространением излучения по оболочке волокна вследствие несовершенства сварных соединений и других оптических потерь. Для устранения данной проблемы разработан инновационный фильтр оболочечных мод (ФОМ) с предельной мощностью 100 Вт. ФОМ представляет собой участок волокна с удаленным полимерным покрытием, на который точечно нанесен полимер с показателем преломления (ПП), превышающим ПП кварца. В разработанном ФОМ благодаря дискретности и малым размерам полимерных точек обеспечивается равномерное распределение тепловой нагрузки по всей длине фильтра, что позволило увеличить фильтруемую мощность до 100 Вт.

Система управления лазером включает специально разработанные платы управления, программное обеспечение и драйверы лазерных диодов, обеспечивающие подключение модулей накачки с током до 40 А и напряжением до 150 В. Время нарастания тока не превышает 20 мкс, что позволяет эксплуатировать лазерную систему в импульсном режиме с частотой до 10 кГц и минимальной длительностью импульса 50 мкс.

Созданная высокомоощная лазерная система демонстрирует сопоставимые с мировыми аналогами массогабаритные характеристики и качество пучка, превосходя их по частоте модуляции излучения благодаря модульной архитектуре, инновационному решению проблемы вывода оболочечных мод и собственной электронной базе. Перспективные исследования направлены на повышение эффективности системы, уменьшение массогабаритных показателей и улучшение качества генерируемого пучка.

[1] Powell J., Kaplan A., *Int. Cong. on Appl. of Las. & Electro-Opt.*, 277-281, (2012).

[2] Токмаков Е.А., Галанина И.А., *Ученые заметки ТОГУ*, 5, №4, 1045-1050, (2014).

[3] Tamura K., Ishigami R., Yamagishi R., *J. of Nuclear Science and Technology*, 53, №6, 916-920, (2015).

ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ОКИСДА ЦИНКА С СЕРЕБРЯНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ, ИНИЦИИРОВАННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЕРИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Поляков Д.С., Гресько В.Р., Сергеев М.М.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

polyakovdmitry1988@mail.ru

В работе представлена тепловая модель взаимодействия серии ультракратких лазерных импульсов с пленкой оксида цинка с серебряными наночастицами на стеклянной подложке в условиях поглощения излучения наночастицами. Обсуждаются возможные механизмы модификации оптических и структурных свойств таких пленок.

Ключевые слова: оксид цинка, плазмонные наночастицы, ультракраткие лазерные импульсы.

Пленки оксида цинка с включениями в виде наночастиц серебра (ZnO:Ag) являются перспективным материалом для создания фотодетекторов ультрафиолетового диапазона, солнечных панелей и фотокаталитических устройств. Важной задачей является поиск технологических методов для управления положением пика плазмонного резонанса в наночастицах, внедренных в пленку. Воздействие лазерного излучения позволяет добиться модификации структурных и оптических свойств пленок ZnO:Ag без разрушения целостности пленки. Такая возможность была продемонстрирована в работах [1, 2] для случая воздействия на пленку серий ультракратких лазерных импульсов на длине волны 515 нм, соответствующей пику плазмонного резонанса в наночастицах. Однако механизмы такой модификации остаются не до конца понятными.

Важным этапом выявления физической природы модификации пленок является анализ тепловых процессов, вызванных воздействием серии ультракратких лазерных импульсов. Для этого в рамках данной работы была разработана модель нагрева пленок ZnO:Ag для экспериментальных условий работ [1, 2], позволяющая проследить динамику нагрева и охлаждения пленок на разных пространственных и временных масштабах (от сотен фемтосекунд – длительность импульса до сотен миллисекунд – полное время облучения), что дает полную и всеобъемлющую картину эволюции температурного поля. Пример расчета эволюции температурного поля в пленке на пикосекундной временной шкале показан на рисунке.

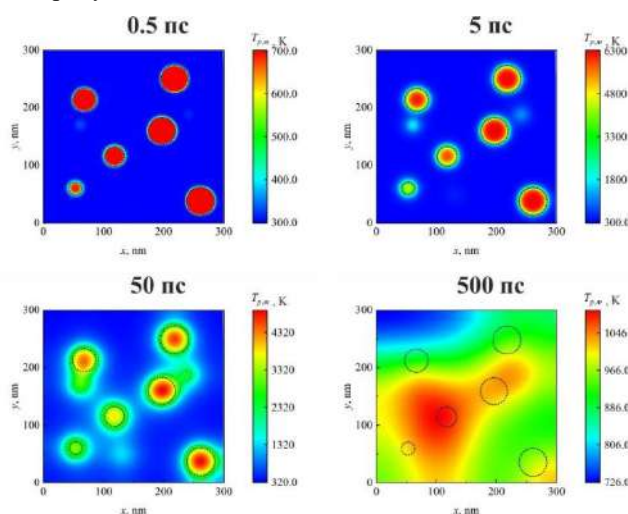


Рисунок. Эволюция температурного поля в пленке с наночастицами после воздействия ультракраткого лазерного импульса (пунктиры – контуры наночастиц, точки – контуры области плавления в матрице (для 50 пс))

Полученные результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными результатами. На основе проведенного сопоставления делаются выводы о вероятных механизмах модификации структурных и оптических свойств тонких пленок ZnO:Ag на стеклянной подложке при облучении ультракраткими лазерными импульсами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (проект № FSER-2025–0007).

[1] Гресько В.Р., Сергеев М.М., Смирнова В.В., Долгополов А.Д., Сокура Л.А., Костюк Г.К., Григорьев Е.А., *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, **24**, № 3, 384-398, (2024).

[2] Гресько В.Р., Сергеев М.М., Долгополов А.Д., Сокура Л.А., Григорьев Е.А., *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, **25**, № 1, 9-22, (2025).

**ГЕНЕРАЦИЯ ПЕРЕХОДНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЛАЗЕРНО УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ НА ГРАНИЦЕ
ВАКУУМ-ГАЗОКЛАСТЕРНАЯ СРЕДА**

Щеглов П.А., Чашин М.В., Таусенев А.А., Семенов Т.А., Назаров М.М.

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

sheglovpawel@yandex.ru

Получены лазерно ($I=5\cdot 10^{18}$ Вт/см²) ускоренные электроны в двух режимах: с малой расходимостью (8 мрад, 50 пКл) и большой (200 мрад, 3 нКл) в газокластерной плазме. От них получено ТГц излучение с энергией до 20 мкДж.

Ключевые слова: лазерное ускорение электронов, терагерцовое излучение.

При фокусировке мощного лазерного излучения ($I>10^{18}$ Вт/см²) на газокластерные мишени, в них может происходить лазерное ускорение электронов [1]. Когда ускоренные электроны покидают кластерную среду они генерируют переходное излучение в терагерцовом (ТГц) диапазоне.

Исследование проводилось на мультитераваттном Ti:Sa лазерном комплексе в НИИ «Курчатовский институт» (длительность импульсов $\Delta t = 30$ фс, энергия в импульсе $E = 150$ мДж, частота следования $\nu = 10$ Гц). Лазерные импульсы фокусировались в газокластерной струе, создавая плазму, в которой происходило ускорение электронов. Газокластерная среда образовывалась при расширении газа (кислорода или азота) высокого давления (5-30 бар, комнатная температура) через сверхзвуковое сопло (угол раствора 15°) в вакуум (10^{-7} бар). Ускоренные электроны регистрировались с помощью сцинтиллятора, магнитного спектрометра и цилиндра Фарадея. ТГц излучение, созданное ускоренными электронами, собиралось тефлоновой линзой и детектировалось ячейкой Голея.

Было получено, что свойства электронного сгустка меняются от начального давления расширяющегося газа в вакуум. При давлении до 10 бар электронный пучок имел малую расходимость (8 мрад) с зарядом до 50 пКл. При давлении газа больше 20 бар электронный сгусток имел расходимость 100-200 мрад, но с зарядом до 3 нКл. Электронный спектр в обоих случаях был экспоненциально спадающий с характерной энергией 1-4 МэВ.

ТГц излучение имело спектр до 3 ТГц, энергию до 20 мкДж и расходилось в конус с углом $\approx 20^\circ$ с круговой поляризацией. Выход ТГц излучения коррелирует с зарядом электронного сгустка.

ТГц излучение может использоваться для определения длительности электронного сгустка на выходе из кластерной струи. Полученный электронный сгусток можно использовать для получения бетатронного рентгеновского и тормозного гамма излучений.

[1] Mayr M.W., Spiers B., Aboushelbaya R., Paddock R.W., Sadler J.D., Sillett C., Wang R.H.W., Krushelnick K., Norreys P.A., *Phys. Rev. Accel. Beams*, **23**, №9, 093501, (2020).

НАНОФОТОНИКА

ЭКСИТОННЫЙ ЛАНДШАФТ В ДВУМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Баймуратов А.С.

Сколковский институт науки и технологий, Центр инженерной физики, Москва, Россия

a.baimuratov@skoltech.ru

В данной работе исследуются свойства экситонов в двумерных полупроводниках и гетероструктурах на основе дихалькогенидов переходных металлов.

Ключевые слова: двумерные полупроводники, оптика наноструктур.

Сочетание теоретического моделирования и экспериментальных наблюдений позволяет всесторонне понять фундаментальные механизмы, определяющие характеристики экситонов в этих материалах. В исследовании рассматривается сложный экситонный ландшафт [1], включающий светлые и тёмные экситонные состояния [2], а также влияние муаровых сверхрешёток на экситоны и их гибридизацию [3, 4]. Полученные результаты углубляют понимание физики экситонов в двумерных материалах и открывают новые перспективы их использования в оптоэлектронных и квантовых технологиях следующего поколения.

[1] Zhao S., Huang X., Li Z., Rupp A., Göser J., Vovk I.A., Kruchinin S.Yu., Watanabe K., Taniguchi T., Bilgin I., Baimuratov A.S., and Högele A., *Nat. Nanotech.*, **18**, 572, (2023).

[2] Förste J., Tepliakov N.V., Kruchinin S.Yu., Lindlau J., Funk V., Förg M., Watanabe K., Taniguchi T., Baimuratov A.S., and Högele A., *Nat. Comm.*, **11**, 4539, (2020).

[3] Polovnikov B., Scherzer J., Misra S., Huang X., Mohl C., Li Z., Göser J., Förste J., Bilgin I., Watanabe K., Taniguchi T., Högele A., and Baimuratov A.S., *PRL*, **132**, 076902, (2024).

[4] Zhao S., Huang X., Gillen R., Li Z., Liu S., Watanabe K., Taniguchi T., Maultzsch J., Hone J., Högele A., and Baimuratov A.S., *Nano Lett.*, **24**, 4917, (2024).

**DNA ORIGAMI: THE NANOFABRICATION TOOLBOX
WITH MOLECULAR PRECISION**

Martynenko I.M.

Assistant Professor, Center for Engineering Physics, Skoltech, Moscow, Russia

e-mail@mail.ru

I will describe our versatile and scalable method of nanofabrication that relies on DNA self-assembly at ambient temperatures and offers the potential to three-dimensionally position any inorganic and organic components compatible with DNA origami nanoarchitecture.

Keywords: molecular self-assembly, nanofabrication, electron-beam lithography.

Molecular self-assembly approaches, which offer near-atomic precision, ultimate design freedom, and scalability in nanofabrication, are projected to have a major impact on the engineering of future artificial light-managing surfaces. Structural DNA nanotechnology, particularly DNA origami self-assembly, allows the high-yield synthesis of a wide variety of hybrid organic-inorganic optical nanostructures at a resolution unachievable by top-down fabrication. However, the integration of these nanostructures into real devices remains a challenge. More than a decade ago, DNA origami placement was established as a technique based on the site- and shape-selective deposition of DNA origami objects onto lithographically patterned substrates, creating large-scale arrays of precisely placed DNA structures [1, 2]. However, the DNA origami placement methods developed so far were limited to planar DNA origami and could only fabricate two-dimensional arrays and patterns. We extend DNA origami placement to the third dimension by mounting three-dimensional DNA origami onto nanopatterned substrates, followed by silicification to provide hybrid DNA–silica structures with a height of ~50 nm exhibiting feature sizes in the sub-10-nm regime [3, 4]. Here, I will describe our versatile and scalable method of nanofabrication that relies on DNA self-assembly at ambient temperatures and offers the potential to three-dimensionally position any inorganic and organic components compatible with DNA origami nanoarchitecture. This near-nanometer-precise spatial positioning of nanoscale building blocks is crucial for applications of this method, such as scalable self-assembled optical metamaterials and quantum light sources.

[1] Kershner R., et al., *Nature Nanotechnology*, **4**, 557-61, (2009).

[2] Gopinath A., et al., *Nature*, **535**, 401-405, (2016).

[3] Martynenko I.V., et al., *Nature Nanotechnology*, **18**, 1456-1462, (2023).

[4] Martynenko I., *87th Annual Meeting of the DPG and DPG Spring Meeting 2024 of the Condensed Matter Section (SKM), Streumethoden*, (2024).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА С НАНОКРИСТАЛЛАМИ CuCl

Родина А.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

anna.rodina@mail.ioffe.ru

Представлен обзор экспериментальных данных по спектрам поглощения и новая теоретическая модель, описывающая размерное квантование и взаимодействие экситонов со светом в сферических нанокристаллах CuCl.

Ключевые слова: нанокристаллы, экситоны, размерное квантование.

Полупроводниковые нанокристаллы CuCl – первые в мире низкоразмерные полупроводниковые наносистемы, в которых наблюдался эффект размерного квантования. Первое экспериментальное наблюдение было сделано А.А. Каплянским и Е.Ф. Гроссом в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 1957 году [1]. Они наблюдали сдвиги поглощения экситонных линий в кристаллах NaCl, сильно легированных Cu, однако не связали результаты своих наблюдений с размерным квантованием экситонов образовавшихся кластерах CuCl. Экспериментальные исследования оптических свойств полупроводниковых нанокристаллов CuCl в стеклянной матрице А.И. Екимовым и сотрудниками в ГОИ им. С.И. Вавилова в Ленинграде, проводившиеся совместно с развитием теории оптических свойств сферических нанокристаллов теоретиками из ФТИ им. А.Ф. Иоффе Ал.Л и А.Л. Эфросами в начале восьмидесятых годов прошлого века, а также работы Л. Брюса с сотрудниками в лаборатории Белла (США), положили начало новой области – физики полупроводниковых нульмерных структур или квантовых точек [2-4].

В настоящее время квантовыми точками называют все низкоразмерные структуры, обеспечивающие пространственное ограничение носителей заряда или экситонов во всех трех направлениях. Эффект размерного квантования приводит к формированию дискретного спектра электронных или экситонных состояний, который и определяет зависимость их свойств от размера. При этом в исторически первых нанокристаллах CuCl, в силу очень маленького радиуса экситона $a_{ex} = 0.7$ нм, как правило реализуется режим квантования экситона как целого, а взаимодействие экситонов со светом характеризуется «гигантской силой осциллятора». В этом режиме увеличение силы осциллятора экситонного оптического перехода с увеличением радиуса нанокристалла описывается фактором $(a/a_{ex})^3$. При этом в спектрах поглощения нанокристаллов CuCl наблюдаются две экситонные линии, связанные с дырками из валентных подзон симметрии Γ_7 и Γ_8 . Эти линии, обычно обозначаемые в литературе как Z_3 и $Z_{1,2}$, отличаются на энергию спин-орбитального расщепления валентной зоны порядка 70 мэВ и сдвигаются в область больших энергий как $C(Z_i)/a^2$ при уменьшении радиуса нанокристалла.

Несмотря на длительную историю экспериментальных и теоретических исследований [2, 3, 5], до недавних пор не удавалось объяснить наблюдавшееся во множестве экспериментов соотношение $C(Z_{1,2}) > C(Z_3)$. Объяснение этого факта потребовало пересмотра теории размерного квантования экситонов и их взаимодействия со светом в нанокристаллах CuCl с учетом сложной структуры валентной зоны [6]. Рассмотрение проведено в рамках шестизонной модели Латтинжера, учитывающей смешивание состояний из валентных подзон симметрии Γ_7 и Γ_8 . Учтено распределение нанокристаллов по размерам, описываемое функцией Лифшица-Слезова, и эффекты гигантской силы осциллятора. Оказалось, что более резкое возрастание энергии экситонных переходов $Z_{1,2}$ с уменьшением радиуса нанокристалла по сравнению с основными переходами Z_3 можно объяснить сильным поглощением из возбужденного состояния экситона, обусловленным смешиванием легкой и тяжелой дырки в экситоне. Моделирование экспериментальных зависимостей экситонных переходов от радиуса нанокристалла на основе развитой теории впервые позволило определить параметры шестизонного гамильтониана Латтинжера, описывающего как кинетическую энергию экситона, так и дырки в CuCl. Развитая теоретическая модель подходит также для описания размерного квантования экситонов и их взаимодействия со светом в нанокристаллах перовскитов, активно исследуемых в настоящее время.

Исследование выполнено за счёт гранта РФФИ №23-12-00300.

- [1] Гросс Е.Ф., Каплянский А.А., *Опт. и спектр.*, **11**, №2, 204-209, (1957).
- [2] Екимов А.И., Онущенко А.А., *Письма в ЖЭТФ*, **34**, №6, 363-366, (1981).
- [3] Эфрос Ал.Л. Эфрос А.Л., *ФТП*, **16**, №7, 1209-1214, (1982).
- [4] Rossetti R., Nakahara S., Brus L.E., *J. Chem. Phys.*, **79**, 1086-1088, (1983).
- [5] Ekimov A.I., Efros Al.L., Onushchenko A.A., *Sol. St. Commun.*, **56**, №11, 921-924, (1985).
- [6] Kudlacik D., Zhukov E.A., Yakovlev D.R., Qiang G., Semina M.A., Golovatenko A.A., Rodina A.V., Efros Al. L., Ekimov A. I., Bayer M., *Phys. Rev. B*, **111**, №8, 085423, (2025).

**ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИЕ КВАНТОВЫЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ
В СЕНСОРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ**

Орлова А.О.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

a.o.orlova@itmo.ru

В работе рассмотрены основные фотофизические свойства коллоидных люминесцирующих квантовых нанокристаллов с точки зрения перспективности их использования в сенсорных приложениях. Обсуждаются достоинства и недостатки гибридных структур на основе квантовых нанокристаллов для детектирования газообразных и жидких аналитов.

Ключевые слова: сенсоры, квантовые нанокристаллы, маркеры заболеваний.

Наноструктурированные люминофоры представляют обширный класс новых материалов, различающихся по химическому составу, размерам, форме и архитектуре. Данные материалы способны успешно конкурировать с молекулярными люминофорами в сенсорных приложениях для обнаружения жидких и газообразных загрязнителей окружающей среды, биомолекул и биомаркеров различных заболеваний [1-5].

Люминесцирующие квантовые нанокристаллы (НК) (квантовые точки, стержни, тетраподы и нанопластины), объединяют в себе преимущества квантоворазмерных структур со свойствами молекулярных люминофоров и общими характеристиками коллоидных наночастиц (высокое отношение площади поверхности к объему, возможность модификации поверхности после синтеза различными молекулами, полимерами и биомолекулами). Это позволяет точно настраивать оптические и электрические свойства НК в зависимости от их химического состава, архитектуры, формы и размеров [6] и управлять эффективностью передачи энергии и заряда в структурах с их участием [7, 8].

В работе рассматриваются основные фотофизические свойства НК, обсуждаются влияние архитектуры и формы НК, а также их ближайшего окружения на процессы релаксации электронного возбуждения НК в составе гибридных структур с участием полимерных матриц и проводящих слоев наноструктурированного углерода [9-12]. Рассматриваются особенности взаимодействия гибридных структур на основе квантовых нанокристаллов и восстановленного оксида графена с газообразным аналитом. Обсуждаются перспективы создания селективных сенсорных систем на основе люминесцирующих квантовых нанокристаллов.

- [1] Chandra A. et al., *Chapter 6 - Fluorescent nanoparticles for sensing, Frontiers of Nanoscience, Elsevier*, **16**, 117-149, (2020).
- [2] Algar W.R. et al., *Chemical Reviews*, **121**, №15, 9243-9358, (2021).
- [3] Nam N.N. et al., *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc.*, **327**, 125347, (2025).
- [4] Dave R. et al., *ChemistrySelect*, **9**, e202402477, (2024).
- [5] Bodkhe M. et al., *BioNanoScience*, **14**, 1940-1960, (2024).
- [6] Efros A.L., Brus L.E., *ACS Nano*, **15**, 6192-6210, (2021).
- [7] Li Q. et al., *Chemical Reviews*, **124**, 5695-5763, (2024).
- [8] Moroz P., Romero L.R., Zamkov M., *Chem. Commun.*, **55**, 3033-3048, (2019).
- [9] Orlova A.O. et al., *J. Appl. Phys.*, **113**, 214305, (2013).
- [10] Reznik I. et al., *Nanomaterials*, **10**, 714, (2020).
- [11] Orlova A.O. et al., *Nanotechnology*, **24**, 335701, (2013).
- [12] Matiushkina A. et al., *Int. J. Mol. Sci.*, **23**, 4061, (2022).

ВТОРОЙ ПОРОГ ГЕНЕРАЦИИ СВЕРХИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ

Кочаровская Е.Р., Кочаровский В.В.

ФИЦ ИПФ РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород, Россия

katya@ipfran.ru

Установлен критерий перехода к нестационарной генерации сверхизлучающего лазера. Показано, что она является квазипериодической и демонстрирует либо слабое (автомодуляция), либо сильное (импульсное сверхизлучение) изменение интенсивности излучения и инверсии населённости активной среды.

Ключевые слова: сверхизлучающий лазер, порог генерации, автомодуляция.

На основе численного решения уравнений Максвелла-Блоха для двухуровневой среды с непрерывной накачкой в низкодобротном резонаторе Фабри-Перо при надлежащем учёте самосогласованной полуволновой решётки инверсии населённости энергетических уровней активных центров [1], неизбежно создаваемой биениями встречных волн, исследована неустойчивость стационарной генерации основной поляритонной моды сверхизлучающего лазера, для которого время жизни фотона в резонаторе T_E меньше времени фазовой релаксации поляризации активной среды T_2 , т.е. оптических дипольных колебаний активных центров.

Установлен критерий возникновения этой неустойчивости (т.е. второго порога генерации сверхизлучающего лазера), наступающей с увеличением уровня накачки p_r , длины резонатора L , коэффициентов отражения зеркал $R_{1,2}$ и других параметров лазера. Этот критерий связан с превышением так называемой кооперативной частоты активных центров, зависящей от средней инверсии населённости их энергетических уровней непосредственно перед порогом перехода от стационарной к нестационарной генерации, над скоростью релаксации поля в резонаторе.

Показано, что, в зависимости от параметров лазера, непосредственно выше второго порога режим генерации является квазипериодическим либо со слабым (квазимонохроматическая автомодуляция), либо с сильным (импульсное сверхизлучение) изменением амплитуды основной поляритонной моды и инверсии населённости энергетических уровней активной среды. Оба варианта продемонстрированы детальным анализом спектра излучения и пространственно-временной структуры поля, инверсии населённости и поляризации активной среды лазера (рисунок). Показано также, что, в отличие от обычных лазеров, решётка инверсии населённости сильно влияет на второй порог и на устанавливающийся после его превышения режим генерации.

Согласно [1-3], с дальнейшим превышением второго лазерного порога в генерацию в существенной мере вовлекаются другие электромагнитные и поляритонные моды лазера, которые либо сами становятся неустойчивыми, либо возбуждаются за счёт нелинейных эффектов. В заключении дан краткий обзор нестационарных режимов генерации сверхизлучающих лазеров.

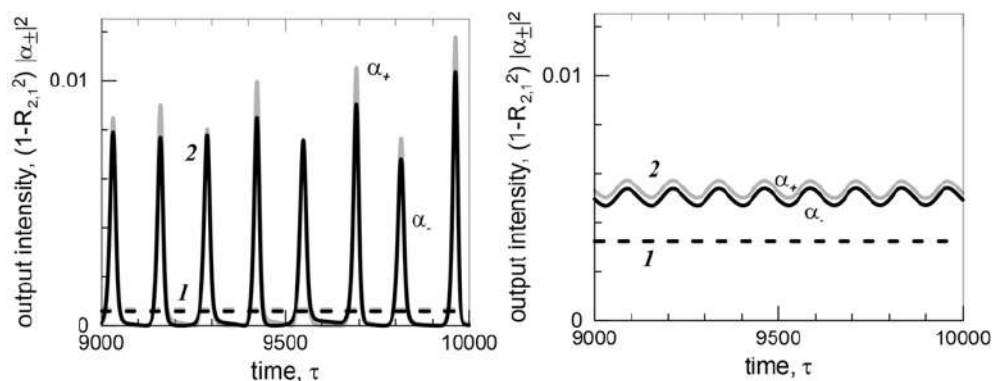


Рисунок. Переход от стационарного (1) к нестационарному (2) квазипериодическому излучению в режиме либо импульсов сверхизлучения (слева), либо автомодуляции (справа) при одинаковых параметрах активной среды и длине лазера $L=2$, но различных коэффициентах отражения зеркал и уровнях накачки: слева - $R_1=0.5$, $R_2=0.47$ при $p_r=0.05$ (1) и $p_r=0.1$ (2); справа - $R_1=R_2=0.3$ при $p_r=0.2$ (1) и $p_r=0.3$ (2). Показаны нормированные интенсивности излучения из противоположных торцов сверхизлучающего лазера в зависимости от нормированного времени (обозначения и определения см. в обзоре [1])

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания ИПФ РАН № FFUF-2023-0002.

[1] Кочаровский Вл.В., Железняков В.В., Кочаровская Е.Р., Кочаровский В.В., *УФН*, **187**, №4, 367-410, (2017).

[2] Кочаровская Е.Р., Кочаровский Вл.В., *ФТП*, **58**, №4, 202-209, (2024).

[3] Кочаровская Е.Р., Кочаровский Вл.В., *ФТП*, **58**, №4, 210-219, (2024).

ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ХРОМОФОРОВ TAGETES PATULA L. ПРИ КИСЛОРОДОНАСЫЩЕНИИ В ПРИСУТСТВИИ Yb^{3+}

Артамонов Д.А.¹, Цибульников А.В.¹, Землякова Е.С.^{1,2},
Кострина А.А.¹, Брюханов В.В.¹, Самусев И.Г.¹

¹БФУ им. И. Канта, Калининград, Россия

²КГТУ, Калининград, Россия

euromet2016ig98@icloud.com

Исследовано изменение спектров поглощения экстракта *Tagetes patula* L. с Yb^{3+} при насыщении кислородом. Рассчитана константа тушения, обсуждаются возможные механизмы деградации хромофоров.

Ключевые слова: спектры поглощения, тушение, редкоземельные ионы.

Для оценки фотохимической устойчивости хромофоров *Tagetes patula* L. в присутствии ионов Yb^{3+} были зарегистрированы спектры поглощения (рисунок б) раствора экстракта в этаноле при концентрации 0.121 мг/мл. Исследование проводилось в динамике в процессе насыщения системы молекулярным кислородом. Замеры выполнялись с шагом 5 минут в течение 60 минут.

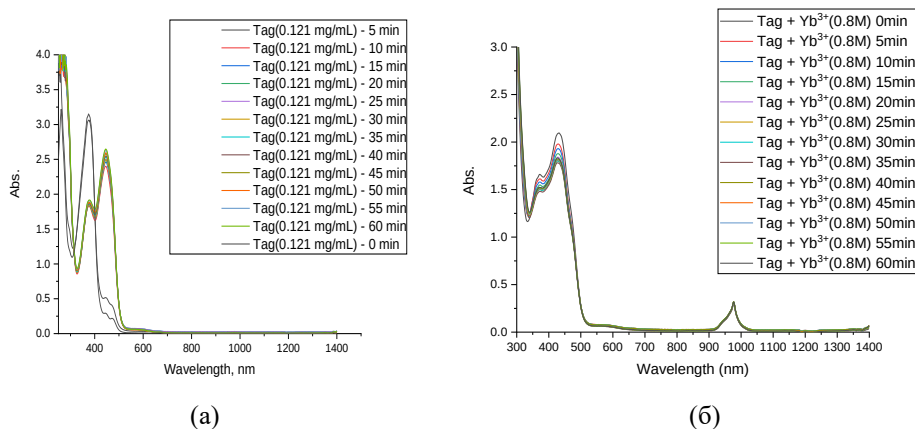


Рисунок. Спектры поглощения растворов Tag - (а), Tag+ Yb^{3+} - (б) при кислородонасыщении от 0 до 60 минут

На рисунке (а) наиболее выраженные изменения наблюдаются в диапазоне 330–450 нм, что соответствует $\pi \rightarrow \pi^*$ переходам в каротиноидной и флавоноидной системах, в первую очередь — лютеина [1-3]. Интенсивное снижение оптической плотности в области 450 нм указывает на разрушение сопряженной системы двойных связей, характерной для каротиноидов, что связано с образованием эпоксидов и апокаротиноидов при взаимодействии с активными формами кислорода, в частности синглетным кислородом ($^1\text{O}_2$) [4, 5].

Характер наблюдаемых изменений позволяет предположить диффузионный механизм дезактивации, обусловленный взаимодействием возбужденных хромофоров с кислородом. Расчёт по уравнению Штерна–Фольмера дал значение константы тушения $k_q \approx 6.23 \times 10^{10} \text{ M}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$, что близко к диффузионному пределу для органических растворителей [6-8].

Из рисунка (б) видно, что присутствие ионов Yb^{3+} в растворе не приводит к заметному изменению спектров поглощения, однако сохраняющееся излучение в ближнем ИК-диапазоне (~980 нм) указывает на устойчивость комплекса и отсутствие его разрушения в условиях фотохимического воздействия. Это позволяет рассматривать систему как перспективную модель для оптического сенсора кислорода или фотодинамических применений.

Исследование выполнено в рамках проекта, поддержанного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации № FZWM-2020-0003.

- [1] Goralczyk R., *J. Am. Coll. Nutr.*, **28**, №6, 595S-602S, (2009).
- [2] Taneja M., Dutta Gupta S., *Can. J. Chem.*, **66**, №10, 2462-2467, (1988).
- [3] Hammond B.R., Renzi L.M., *Nutr. Rev.*, **71**, №3, 195-204, (2012).
- [4] Gaujac A., Baranska M., Baranski R., *Food Funct.*, **2**, №5, 250-265, (2011).
- [5] Edge R., Truscott T.G., McGarvey D.J., *Free Radic. Res.*, **26**, №5, 469-477, (1997).
- [6] Sánchez J.F., Fernández-Sevilla J.M., Acién F.G., *Renew. Energy*, **85**, 105-112, (2016).
- [7] Eliseeva S.V., Bünzli J.-C.G., *Chem. Soc. Rev.*, **39**, №1, 189-227, (2010).
- [8] Lakowicz J.R., *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, 3rd ed., Springer, (2006).

**НАНОЧАСТИЦЫ $\text{YF}_3\text{-CeF}_3\text{:Tb}^{3+}$ И ИХ КОНЬЮГАТЫ
С НАНОЧАСТИЦАМИ Au И ХЛОРИНОМ e-6 В КАЧЕСТВЕ ПЛАТФОРМ
ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СЕНСОРОВ И ФДТ**
Низамутдинов А.С.¹, Миннебаев Т.М.¹, Астраханцева А.В.¹, Ахметзянова К.Э.¹,
Шамсутдинов Н.И.¹, Зеленихин П.В.¹, Лукинова Е.В.², Избасарова Э.А.¹,
Газизов А.И.¹, Буров А.М.³, Хлебцов Н.Г.³, Пудовкин М.С.¹

¹Казанский федеральный университет, Казань, Россия

²Белгородский государственный университет, Белгород, Россия

³Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН, г. Саратов, Россия

anizamutdinov@mail.ru

Изучены спектральные характеристики конъюгатов наночастиц $\text{YF}_3\text{-CeF}_3\text{:Tb}^{3+}$ (15%) с наночастицами Au и препаратами хлоринового ряда e-6. Показана сильная передача энергии к хлорину e6, эффективное токсическое действие конъюгатов под рентгеновским облучением.

Ключевые слова: наночастицы, хлорин e6, фотодинамическая терапия.

Комбинированная фотодинамическая терапия является перспективным подходом, который заключается в преобразовании энергии ионизирующего излучения в действие агентов ФДТ при их конъюгации со сцинтилляционными наночастицами [1, 2]. Также перспективным подходом к созданию функциональных нанокомпозитов с заданными спектрально-кинетическими характеристиками является конъюгация с плазмонными наночастицами [3]. Целью нашей работы было изучение спектрально-кинетических характеристик конъюгатов наночастиц (НЧ) $\text{YF}_3\text{-CeF}_3\text{:Tb}^{3+}$ (15%) и препаратов хлоринового ряда e6, их токсичность, а также их конъюгатов с наночастицами Au.

Синтез наночастиц $\text{YF}_3\text{-CeF}_3\text{:Tb}^{3+}$ (15%) осуществляли методом соосаждения [4]. Токсичность наночастиц оценивали с помощью МТТ-теста на клетках A549.

В результате исследования спектрально-кинетических характеристик конъюгатов наночастиц (НЧ) $\text{YF}_3\text{-CeF}_3\text{:Tb}^{3+}$ (15%) и препаратов хлоринового ряда e6 показан эффективный безызлучательный перенос энергии как от ионов церия к ионам тербия, так и от ионов тербия к хлорину e6, непосредственно были исследованы препараты Радахлорин и Фоторан. Максимальный коэффициент передачи энергии составил около 50% для наночастиц, конъюгированных с хлорином e6 посредством ПВП. Была исследована выживаемость клеток A549 в присутствии конъюгатов наночастиц (НЧ) $\text{YF}_3\text{-CeF}_3\text{:Tb}^{3+}$ (15%) и препаратов хлоринового ряда e6 в условиях резонансного ионам Ce^{3+} облучения, а также рентгеновского облучения. В условиях возбуждения ионов Ce^{3+} выживаемость клеток оказалась около 55%, тогда как для наночастиц без хлорина e6 она выше - 70%, что, по-видимому, является следствием способности красителя генерировать активные формы кислорода. В условиях рентгеновского облучения выживаемость составила также около 50% для дозы облучения 1 мЗв, что свидетельствует об эффективном преобразовании энергии рентгеновского излучения в генерацию активных форм кислорода предлагаемым конъюгатом.

В данной работе мы также обсуждаем экспериментальное усиление люминесценции ионов Tb^{3+} в наночастицах $\text{YF}_3\text{-CeF}_3\text{:Tb}^{3+}$ в присутствии наночастиц Au при возбуждении ионов Ce^{3+} . По результатам регистрации в интегрирующей сфере измерялось отношение значений квантового выхода люминесценции, измеренных для образца содержащего золотые наночастицы, и для образца без таковых. Для коллоидного раствора наночастиц максимальный коэффициент усиления был зарегистрирован на уровне 2,5 для концентраций наночастиц Au размером 95 нм 11 мг/л и наночастиц $\text{YF}_3\text{-CeF}_3\text{:Tb}^{3+}$ 1 мг/л. Показано, что при уменьшении размеров металлических наночастиц оптимум усиления смещается в область меньших концентраций. В работе обсуждаются механизмы увеличения квантового выхода, а именно, эффект Парселла в зависимости от конфигурации конъюгатов, увеличение эффективности безызлучательной передачи энергии, уменьшение эффективности концентрационного тушения. Кроме того, апробирован подход к созданию сенсора аналитов на основе исследованного конъюгата. При увеличении концентрации Радахлорина в коллоидном растворе конъюгатов наблюдается значительное уменьшение квантового выхода люминесценции ионов Tb^{3+} , которое может быть обусловлено связыванием наночастиц люминофоров и молекул препарата и Ферстеровским тушением люминесценции.

[1] Chen W., Zhang J., *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **6**, 4, 1159-1166, (2006).

[2] Daniel C.R., Capobianco J.A., Seuntjens J., *Nanoscale*, **10**, 16, 7821-7832, (2018).

[3] Ramírez-García G. et al., *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **384**, 112053, (2019).

[4] Pudovkin M.S., Ginkel A.K., Lukinova E.V., *Opt. Mat.*, **119**, 111328, (2021).

**РЕЗОНАНСНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ
НА ОСНОВЕ ЭКСИТОННОГО РЕЗОНАНСА**

Капитонов Ю.В.

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

yury.kapitonov@spbu.ru

Дифракционные оптические элементы могут быть сделаны резонансными, активными и перестраиваемыми при изготовлении путем модуляции резонансных свойств материала. В докладе будут представлены резонансные ДОЭ на основе экситонов в полупроводниках.

Ключевые слова: дифракционные оптические элементы, экситоны, полупроводники.

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) являются элементами планарной оптики, способными формировать заданное распределение рассеянного на них оптического поля за счет явления дифракции. Традиционные ДОЭ изготавливаются из пассивных в оптическом диапазоне материалов, таких как стекло, полимеры или кремний, и, обычно, выполняют свою функцию на одной расчетной длине волны. Однако, рассеяние света на ДОЭ происходит и на других длинах волн. Кроме того, ДОЭ из таких материалов обычно являются пассивными и неперестраиваемыми.

Возможности ДОЭ могут быть расширены при использовании материалов с резонансом, лежащим в видимой области спектра. К твердотельным материалам с эффективным взаимодействием со светом в этой области относятся прямозонные полупроводники, такие как гетероструктуры AlGaInAs , монослои дихалькогенидов переходных металлов и галогенидные перовскиты. Пространственная модуляция исключительно резонансных оптических свойств таких материалов позволяет создавать резонансные ДОЭ, выполняющие свою функцию на заданной длине волны, но не рассеивающих свет на других длинах волн. В качестве материального резонанса в полупроводниках может быть использован резонанс свободного экситона, обладающий большой силой осциллятора.

Пространственной модуляции могут быть подвергнуты сила осциллятора или спектральное положение экситонного резонанса, но наиболее удобной является модуляция спектрального уширения резонанса с помощью контролируемого введения дефектов. Локальное введение дефектов может быть выполнено, например, с помощью облучения полупроводников малыми дозами быстрых ионов [1]. При малых дозах возможно сохранение рельефа поверхности, что приводит к отсутствию нерезонансной дифракции на ДОЭ вдали от экситонного резонанса.

Резонансные ДОЭ на основе экситонов в полупроводниках были продемонстрированы для квантовых ям InGaAs/GaAs при облучении ионами He^+ с энергией 35 кэВ [2] и для монокристаллов галогенидных перовскитов CsPbBr_3 при облучении ионами Ga^+ с энергией 30 кэВ [3]. В последнем случае резонансная дифракция наблюдалась в зеленом диапазоне, и ширина линии дифракции составляла менее 0.5 нм. Угловой размер дифракционного рефлекса составлял менее 1 градуса. Элемент допускает перестройку с помощью температуры. Так, при температуре 16 К максимум дифракции наблюдается при 532 нм, а при 90 К – при 525 нм, при этом вторая длина волны оказывается полностью подавлена. Такое перестраиваемый резонансный ДОЭ может быть использован, например, в устройствах спектрального мультиплексирования/демультиплексирования. Интересным направлением для дальнейших исследований является создание активных резонансных ДОЭ, основанных на нелинейно-оптических свойствах экситонных резонансов в полупроводниках.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда № 25-12-20007. Работа выполнена на оборудовании ресурсных центров СПбГУ «Нанопотоника» и «Нанотехнологии».

[1] Kapitonov Yu.V., Shapochkin P.Yu., Petrov Yu.V., Efimov Yu.P., Eliseev S.A., Dolgikh Yu.K., Petrov V.V., Ovsyankin V.V., *Phys. Status Solidi B*, **252**, №9, 1950-1954, (2015).

[2] Kapitonov Yu.V., Shapochkin P.Yu., Beliaev L.Yu., Petrov Yu.V., Efimov Yu.P., Eliseev S.A., Lovtcius V.A., Petrov V.V., Ovsyankin V.V., *Optics Lett.*, **41**, №1, 104, (2016).

[3] Mamaeva M.P., Lozhkin M.S., Shurukhina A.V., Stroganov B.V., Emeline A.V., Kapitonov Yu.V., *Adv. Optical Mater.*, **11**, 2202152, (2023).

**ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ МАГНИТОПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ
ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ**

Лактионов А.А.¹, Попов А.А.^{1,2}, Климентов С.М.^{1,2}

¹НИИУ МИФИ, Инженерно-физический институт биомедицины, Москва, Россия

²Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

AALaktionov@mephi.ru

В ходе исследования оптимизированы условия лазерно-абляционного синтеза композитных наночастиц на основе золота и оксида железа, обладающих структурой ядро-спутники. Определены условия лазерного синтеза, позволяющие значительно увеличить их выход с 10% до 80%.

Ключевые слова: наночастицы, диагностика, плазмонный резонанс.

Работа посвящена лазерному синтезу магнитоплазмонных наночастиц (НЧ) Au@Fe со структурой "ядро-спутник" (core-satellite) методом импульсной лазерной абляции в жидкостях (ИЛАЖ). Методология основана на предыдущих разработках Лаборатории Бионанофотоники Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ" [1, 2]. Подход заключается в лазерной абляции мишени из Fe в присутствии предварительно синтезированных НЧ Au для получения необходимых наноструктур со сверхчистой поверхностью.

Процесс абляции позволил получить НЧ, состоящие из относительно крупных сферических ядер оксида железа, покрытых меньшими сферическими наночастицами-спутниками Au со средним размером 8 нм. Железосодержащее ядро обеспечивает магнитный отклик, а оболочка из Au-спутников делает материал перспективным для применения в компьютерной томографии. Оптимизация синтеза Au@Fe НЧ методом ИЛАЖ позволила значительно увеличить выход наноструктур до 80% от общего количества синтезированных НЧ. Оптимизация была достигнута с сохранением высокой производительности синтеза, размеров НЧ подходящих для *in vivo* применений, и высоких оптических свойств.

Сочетание магнитных и плазмонных свойств в композитах обеспечивает значительные преимущества по сравнению с односоставными НЧ, открывая широкие перспективы для разработки новых диагностических и терапевтических стратегий в онкологии. Их улучшенные характеристики позиционируют их как перспективное контрастное средство для диагностики методами КТ и МРТ, агента для фотоакустической визуализации и фотогипертермии, а также магнитной гипертермии и направленной доставки лекарств.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-1347). Авторы выражают признательность за предоставление научной инфраструктуры для исследований (Грант № FSWU-2023-0070).

[1] Попов А.А., Святковска-Варкока З., Маршалек М. и др., *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, **12**, №4, 649, (2022).

[2] Грязнова О.Ю., Беляев И.Б., Согомонян А.С. и др., *Pharmaceutics*, **14**, 994, (2022).

СПЕКТРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ НЕНАПРЯЖЕННЫХ
КВАНТОВЫХ ТОЧЕК GaAs/AlGaAs

Башегурова Е.А.

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия
e.bashegurova@spbu.ru

В работе исследован образец с квантовыми точками (КТ) GaAs/AlGaAs. Определена природа полос в спектре фотолюминесценции (ФЛ), исследованы характеристики двух типов КТ в образце. Изучены свойства экситонных комплексов в одиночной КТ.

Ключевые слова: квантовые точки, GaAs/AlGaAs, фотолюминесценция.

Метод создания полупроводниковых КТ, основанный на эпитаксиальном заполнении нанотверстий, протравленных под каплями галлия, не создает в образце гетероструктуры внутренних механических напряжений. Поэтому, на основе таких КТ возможно создание источников одиночных и запутанных фотонов.

В данной работе исследуются свойства одиночных КТ. В нашем прошлом исследовании изучались ансамбли КТ [1]. Пространственная плотность КТ в новом исследуемом образце была снижена путем уменьшения скорости потока Ga, при его нанесении на подложку GaAs.

При оптической накачке непрерывным лазером длиной волны излучения 532 нм и температуре образца 4 К был получен спектр ФЛ одиночной КТ (Рисунок (а)). В спектре выделены полосы излучения для КТ типа А и В, тяжелодырочных экситонов в квантовой яме (КЯ) и фоновых полос (*), относящихся к техническим слоям исследуемой гетероструктуры.

Путем изучения зависимости интенсивности ФЛ от мощности лазера накачки, для КТ в спектре ФЛ были выделены пики экситона (X) и биэкситона (XX). Полученная зависимость изменения площади под пиком XX от площади под пиком X является сверхлинейной (Рисунок (б)), то есть природа пиков в спектре КТ – рекомбинирующие X и XX.

Величина расщепления между пиками КТ А и В указывает на то, что это два отдельных объекта в образце, а не два возбужденных состояния или экситонных комплекса в одной КТ.

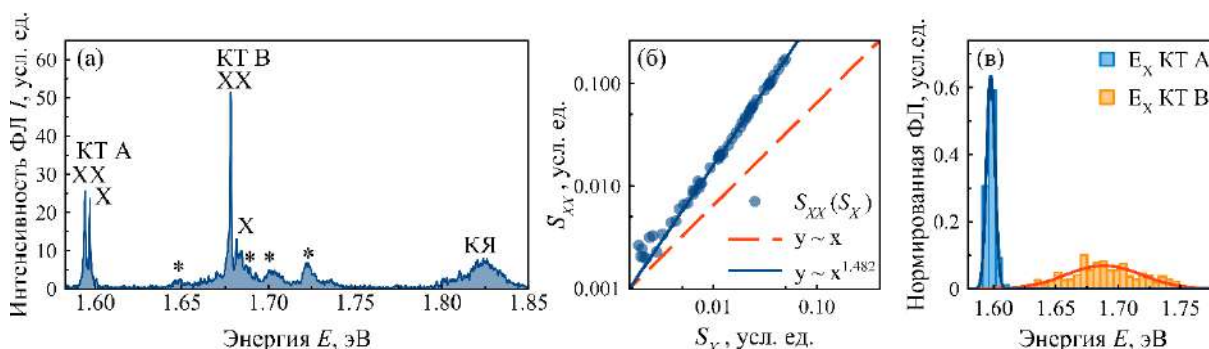


Рисунок. (а) Спектр ФЛ одиночной КТ, $T = 4$ К; (б) График зависимости площади под пиком XX S_{XX} в зависимости от площади под пиком X S_X ; (в) Гистограмма для значений энергии X в КТ А и В

При использовании шагового двигателя было проведено сканирование поверхности образца вдоль кристаллографической оси [110]. В результате, получена карта ФЛ, каждый из срезов которой – отдельный спектр ФЛ для разного участка образца. По полученной карте ФЛ был сделан вывод, что КТ А и В находятся рядом друг с другом, так как их ФЛ появляется и исчезает одновременно.

По данным из карты ФЛ были получены значения энергий X и XX для КТ в образце, построена гистограмма для распределения энергий X в КТ А и В (Рисунок (в)). Видно, что КТ А имеют более узкое распределение энергий X, чем КТ В. Таким образом, КТ А – эпитаксиально заполняемые нанотверстия, КТ В – меньшие квантоворазмерные объекты вблизи нанотверстия. Также, было замечено, что энергия связи биэкситона возрастает по мере увеличения энергии экситона в КТ, причем для КТ обоих типов зависимость одинакова. Было определено, что энергия X в КТ В не зависит от энергии X в КТ А.

Таким образом, методами оптической спектроскопии был исследован образец с одиночными ненапряженными КТ. Определена природа полос излучения в спектре ФЛ образца, исследованы свойства X и XX в КТ, получены статистические данные об ансамбле КТ в образце.

Работа выполнена на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Нанопотоника». Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда № 25-12-20007.

[1] Дерибина Е.И., Мурзин А.О., Башегурова Е.А., Самсонова А.Ю., Ложкин М.С., Ловцюс В.А., Елисеев С.А., Ефимов Ю.П., Капитонов Ю.В., *Phys. Rev. B*, **108**, 205305, (2023).

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ НИКЕЛЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag_2S , ПАССИВИРОВАННЫХ МОЛЕКУЛАМИ ТИОГЛИКОЛЕВОЙ КИСЛОТЫ

Кондратенко Т.С., Чевычелова Т.А., Гревцева И.Г.,
Овчинников О.В., Зябкина М.М., Смольянов Г.А.

Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

optichka@yandex.ru

В работе показано, что допирование квантовых точек Ag_2S , пассивированных молекулами тиогликолевой кислоты (КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$) ионами никеля, обеспечивает модификацию их интерфейса за счет взаимодействия Ni^{2+} с пассиватором и позволяет управлять люминесцентными свойствами КТ.

Ключевые слова: люминесценция, ионы никеля, квантовые точки Ag_2S .

Для разработки люминесцентного сенсора на основе квантовых точек (КТ) для детектирования антибиотиков тетрациклинового ряда важным является подбор условий координации тетрациклинов с рецептором. Известно, что тетрациклины хорошо координируются ионами переходных металлов [1], и для разработки сенсора актуальным является вопрос влияния ионов переходных металлов на люминесцентные свойства КТ. В работе рассмотрено влияние ионов Ni^{2+} на люминесценцию КТ Ag_2S , пассивированных молекулами тиогликолевой кислоты (КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$).

КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ средним размером 2.5 ± 0.3 нм были получены в рамках коллоидного синтеза согласно методике, описанной в [2]. Допирование Ni^{2+} осуществлялось введением водного раствора NiCl_2 на завершающем этапе синтеза в концентрациях, обеспечивающих процентное соотношение по объему $w(\text{Ni}/\text{Ag})=1\%, 2\%, 5\%, 8\%, 10\%$. Исследования выполнены абсорбционными и люминесцентными методами с использованием спектрометра USB2000+ (OceanOptics, USA) и спектрально-люминесцентного комплекса на базе дифракционного монохроматора МДР-4 (ЛОМО, Россия).

На рисунке (а) представлены спектры рекомбинационной люминесценции КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ с максимумом в области 1000 нм в присутствии Ni^{2+} . Показано, что спектры люминесценции испытывают смещение пиков и изменение их интенсивности в зависимости от концентрации никеля в коллоидном растворе: для $w(\text{Ni}/\text{Ag})=1\%, 2\%$ наблюдается снижение интенсивности в полосе 1000 нм и сдвиг максимума в коротковолновую область, при $w(\text{Ni}/\text{Ag})=5\%$ наблюдается разгорание люминесценции в коротковолновой полосе (930 нм), дальнейшее увеличение концентрации никеля ведет к полному тушению свечения.

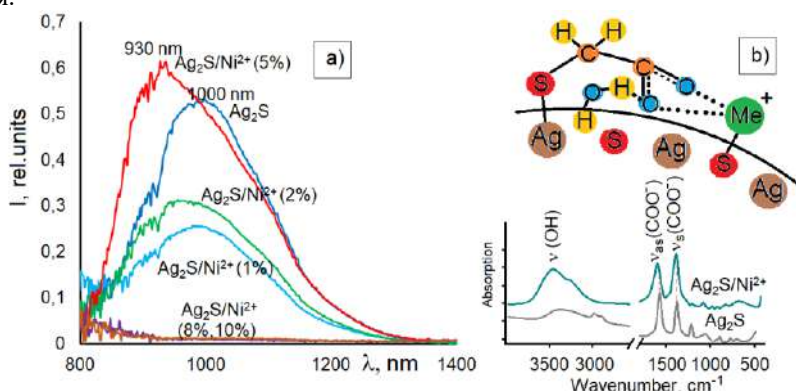


Рисунок. Спектры люминесценции КТ Ag_2S с различной концентрацией Ni^{2+} (а), ИК спектры образцов и схема взаимодействия Ni^{2+} с пассиватором (б)

Наблюдаемые изменения подтверждают интерфейсную природу рекомбинационной люминесценции КТ Ag_2S [2] и связаны с координацией металла на поверхности КТ посредством взаимодействия с лигандом, влияющей на локализованные состояния КТ.

Схема взаимодействия лиганда с ионами металла предложена на основании данных ИК спектроскопии, которые показывают изменение в области частот валентных колебаний ОН групп и карбоксилат-аниона (рисунок (б)).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00668).

[1] Wang Z.Y., Duan L., Zhu D.Q., Chen W., *J. Zhejiang Univ. A*, **15**, 653-661, (2014).

[2] Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., *J. Lumin.*, **227**, №117526, 1-8, (2020).

ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА С ЛАЗЕРНЫМ НАПЛАВЛЕНИЕМ ОСТРОВКОВОЙ ПЛЕНКИ ЗОЛОТА

Кострина А.А., Цибульников А.В., Лятун И.И., Артамонов Д.А., Самусев И.Г.

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта», Калининград, Россия

aakostrina@gmail.com

В результате воздействия ИК-лазером наблюдается рекристаллизация наноструктурированного материала с наплавлением золотой пленки. Полученная структура обладает плазмонным резонансом в области 440 и 610 нм.

Ключевые слова: плазмонный резонанс, лазерное наплавление, рекристаллизация.

Контроль морфологии является ключевым фактором для создания эффективных плазмонных поверхностей. Помимо классических подходов к созданию наноструктур для плазмонной генерации (LIPSS, ионная литография), особый интерес представляет ИК-лазерная обработка, приводящая к рекристаллизации и изменению фазового состава оксидного слоя титана. В результате локального термического воздействия возможно формирование кристаллической фазы анатаза на поверхности [1, 2]. В сочетании с золотыми наночастицами такие структуры демонстрируют усиление оптического отклика за счёт поверхностного плазмонного резонанса на шероховатой поверхности $\text{Ti/TiO}_2/\text{Au}$ [3, 4].

В рамках данной работы был использован наноструктурированный электрохимически анодированный титан. Полученная структура кольцевой морфологии представляет собой лазерно-модифицированную пленку TiO_2 (580 мДж/см^2). Поверхность на гребнях и между ними демонстрирует пористость и осаждение кластеров аблированного материала (вставка рисунка (а)). Образец был подвержен ультразвуковой очистке в течение 30 минут и электрохимическому осаждению островковой пленки золота ($t = 5 \text{ мин}$ при $j = 10 \text{ мА/см}^2$) с последующим лазерным воздействием (10.6 мкм) длительностью 8 минут.

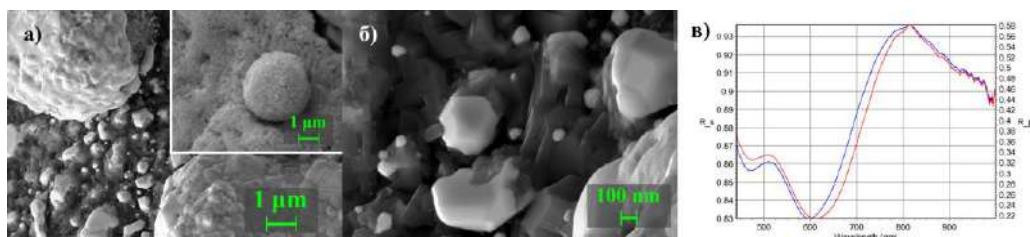


Рисунок. Результаты исследования образца методами СЭМ и эллипсометрии: а) отдельный участок гребня после лазерного воздействия (вставка – до осаждения и наплавления золота); б) кристаллические образования различной морфологии; в) спектры отражения поляризованного излучения

На рисунке (а) представлен результат СЭМ ранее рассмотренной области одного из гребней в результате воздействия непрерывным CO_2 лазером. Можно заметить локальное сплавление осажденного золота в равномерно покрывающую структуру пленку, в отличие от пограничных областей. Рисунок (б) демонстрирует кристаллические образования (от 80 до 400 нм – сопоставимо с длинами волн видимого диапазона), указывающие на локальный нагрев выше температур рекристаллизации титана и плавления золота. Дендритные и гексагональные образования указывают на комплексный состав подложки и неравномерный характер кристаллизации. Следовательно, плазмонные свойства определяются не только крупномасштабной геометрией, но и наноразмерными кристаллами с золотой пленкой.

Минимум отражения р-поляризованного излучения $R_p \sim 0.22$ в области 610 нм (рисунок (в)) обусловлен наличием поверхностного плазмонного резонанса. При рассмотрении спектров функций диэлектрической проницаемости можно заметить Переход $\text{Re}(\epsilon)$ через нулевое значение в области 530 нм и непрерывный рост $\text{Im}(\epsilon)$, что подтверждает наличие ENZ-перехода и характерного плазмонного поглощения [4]. Наблюдаемый спектральный отклик свидетельствует об эффективном взаимодействии электромагнитного поля с полученными наноструктурами, генерируя резонансные моды в области 440 и 610 нм.

Таким образом, лазерное воздействие на наноструктурированную поверхность с наплавлением тонкой золотой плёнки, повторяющей кристаллический рельеф подложки, формирует эффективную морфологию, обладающую свойствами плазмонного поглощения, альтернативную пористым или кластерным структурам.

[1] Podrazký O., Vařák P., Bartoň I., Probošková J., Mrázek J., *EPJ Web Conf.*, **309**, 06002, (2024).

[2] Murzin S.P., Kazanskiy N.L., *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **302**, 012070, (2018).

[3] Soldo-Olivier Y., Zhang S., Novelli F., Radenovic N., Combe N., Allouche A., *Nanoscale Adv.*, **2**, 2448-2461, (2020).

[4] Tcibulnikova A.V., Khankaev A.A., Samusev I.G., Slezhkin V.A., Bryukhanov V.V., Demin M.V., Myslitskaya N.A., Lyatun I.I., Medvedskaya P.N., *Mater. Res. Express*, **7**, 125802, (2020).

**ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС В ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ
НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА**

**Рубаник Д.С., Срабионян В.В., Дурыманов В.А.,
Викленко И.А., Авакян Л.А., Бугаев Л.А.**

ЮФУ, физический факультет, г. Ростов-на-Дону, Россия

rubanik@sfedu.ru

Представлен метод, позволяющий получать теоретические спектры экстинкции и усиления интенсивностей локального электрического поля в окрестности агломератов наночастиц серебра. Данный подход применен к периодическим структурам, состоящим из агрегатов наночастиц.

Ключевые слова: локальное электрическое поле, плазмонный резонанс, наночастицы серебра.

Наночастицы (НЧ) серебра в диэлектрических матрицах широко изучаются благодаря их уникальным оптическим свойствам, связанным, в том числе, с наличием локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР) в видимой области спектров оптического поглощения, позволяющего локализовать и концентрировать энергию света в нанометровом масштабе и фемтосекундном временном диапазоне [1]. Особый интерес представляют оксидные стекла, содержащие наночастицы Ag и редкоземельные (РЗ) ионы. Такие стёкла являются перспективными для задач оптоэлектроники и нанолазники благодаря способности НЧ усиливать люминесценцию РЗ ионов. Исследования показали [2], что для НЧ размером больше 3-5 нм ключевым механизмом усиления люминесценции РЗ ионов является усиление интенсивности локального электрического поля (ЛЭП) вблизи агрегатов НЧ серебра, вызванное их ЛППР.

В данной работе исследованы формирование и особенности ЛЭП и решёточного плазмонного резонанса (РПР) в периодических структурах, в узлах которых присутствуют агрегаты НЧ серебра. Рассмотренные структуры моделируют модификацию стеклянных матриц под воздействием лазерных записей [3], поскольку параметры 1D- и 2D-массивов выбраны в соответствии с используемыми экспериментальными условиями лазерных записей.

Особое внимание при моделировании уделяется выбору параметров периодических структур из НЧ, таких как период повторяемости агломератов, количества НЧ в них, размеры и плотность НЧ в агломерате. Полученные результаты способствуют развитию метода лазерных записей для пространственного проектирования плазмонных наноструктур желаемого размера и степени агломерации в стеклах, со-допированных ионами плазмонных и РЗ металлов.

Исследование выполнено в Южном федеральном университете при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00102 (<https://rscf.ru/project/23-12-00102/>).

[1] Stockman M.I., *Opt. Express*, **19**, №22, 22029, (2011).

[2] Sraibionyan V.V., Vetchinnikov M.P., Rubanik D.S., Durymanov V.A., Viklenko I.A., Avakyan L.A., Zinina E.M., Shakhgildyan G.Y., Sigaev V.N., Bugaev L.A., *J. Non. Cryst. Solids*, **631**, 122927, (2024).

[3] Shakhgildyan G.Y., Lipatiev A.S., Fedotov S.S., Vetchinnikov M.P., Lotarev S.V., Sigaev V.N., *Ceram.Int.*, **47**, 14320-14329, (2021).

ОПТОМЕХАНИЧЕСКАЯ СОРТИРОВКА МИ-РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТИЦ ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СРЕД

Бородулин С.С., Петров М.П., Костина Н.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, физический факультет

natalia.kostina@metalab.ifmo.ru

В работе рассмотрены оптические силы, действующие на ми-резонансные частицы вблизи металлической поверхности. Показано, что резонансный отклик частицы влияет на направление поверхностного плазмона-поляритона и на величину и направление оптической силы.

Ключевые слова: резонансы Ми, поверхностный плазмон-поляритон, оптические силы.

В последнее время достижения фотоники и оптики рассматриваются с точки зрения их практического применения, а дальнейшие исследования носят все более прикладной характер [1]. Соответственно, требуются механизмы для работы со стандартными объектами таких исследований (микро и наночастицами различных форм, размеров и показателей преломления). Одними из самых востребованных остаются частицы из материалов с высоким показателем преломления [2, 3], к примеру, кремниевые или германиевые. Эффективность использования объектов с резонансными свойствами напрямую зависит от возможности контролировать его размер и положение в пространстве.

В данной работе предложен метод оптомеханической сортировки резонансных кремниевых частиц при помощи направленного возбуждения поверхностных плазмонов-поляритонов ближними полями частицы (рисунок 1). Как видно из графика, в зависимости от радиуса кремниевой частицы, направление силы может меняться в диапазоне углов $[-\pi; \pi]$ в плоскости раздела сред. Это объясняется изменением диаграммы направленности рассеяния частицы, и, следовательно, плазмона-поляритона. Надо отметить, что в данном случае опущен вклад давления падающей волны, который следует скомпенсировать встречным пучком с длиной волны меньшей резонанса металла. Только в таком случае может наблюдаться сортировка частиц во всем диапазоне углов, в противном случае направление будет изменяться $[-\pi/2; \pi/2]$.

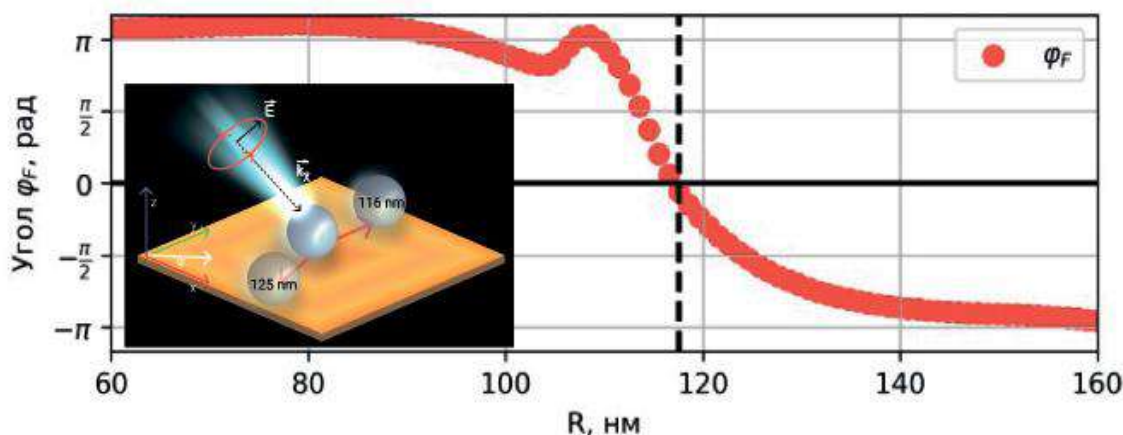


Рисунок. Направление действия оптической силы в зависимости от радиуса частицы. Угол ϕ_F отсчитывается от оси OX. На вставке схема сортировки ми-резонансных частиц. Частицы из кремния радиусом 116 и 125 нм, соответственно, расположены вблизи металлической (золото) поверхности.

На систему под углом падает эллиптически поляризованное излучение. В зависимости от размера частицы изменяется направление ее движения в плоскости границы раздела сред

Результаты были получены для частиц, поддерживающих только электрический и магнитный дипольные резонансы. Аналитическая модель была адаптирована из работы [4], а численное моделирование проводилось в пакете прикладных программ COMSOL Multiphysics.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда № 25-22-20034.

[1] Babicheva V.E., Evlyukhin A.B., *Advances in Optics and Photonics*, **16**, 3, 539-658, (2024).

[2] Kivshar Y., *Nano Letters*, **22**, 9, 3513-3515, (2022).

[3] Barati Sedeh H., Litchinitser N.M., *Photonics Research*, **12**, 608-624, (2024).

[4] Wang S.B., Chan C.T., *Nature communications*, **5**, 3307, (2014).

ЛИТОГРАФИЧЕСКИ-КОНТРОЛИРУЕМОЕ ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАССИВОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОКОЛОНН С ВЫСОКИМ АСПЕКТНЫМ ОТНОШЕНИЕМ НА КРЕМНИИ

Марков Д.П., Павлов С.И., Ермина А.А.,
Большаков В.О., Пригода К.В., Жарова Ю.А.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
markovdan@mail.ioffe.ru

Представлен новый подход к формированию вертикальных периодических нанокolonн серебра с высоким аспектным соотношением на кремниевой подложке с использованием электронно-лучевой литографии и химического осаждения. Проведена их морфологическая и оптическая характеристика.

Ключевые слова: нанокolonны серебра, электронно-лучевая литография, спектральная эллипсометрия.

Вертикальные металлические наноструктуры, особенно упорядоченные в периодические массивы, представляют значительный интерес для различных применений в нанопотонике и плазмонике. Периодичность позволяет возбуждать коллективные плазмонные резонансы и управлять дифракционными эффектами, что открывает возможности для создания метаповерхностей, элементов для управления светом на наномасштабе и высокочувствительных сенсоров [1]. Однако контролируемое формирование металлических структур с высоким аспектным соотношением часто сопряжено с использованием сложных и дорогостоящих технологий, например, фокусированных ионных пучков [2].

В настоящей работе предложен и исследован подход к получению вертикальных нанокolonн серебра, упорядоченных в квадратную решетку, на подложке из монокристаллического кремния (с-Si), легированного бором. Процесс изготовления включал формирование массива наноразмерных отверстий (с периодом 150-190 нм) в слое электронного резиста (полиметилметакрилат (ПММА)) методом электронно-лучевой литографии с последующим химическим осаждением серебра методом гальванического вытеснения из раствора на основе 0.02 М AgNO_3 и 5 М HF (в соотношении 1:10) в течение 5 сек. После осаждения слой резиста удалялся в ацетоне, в результате чего на подложке оставались вертикально ориентированные нанокolonны серебра.

Морфология полученных структур исследовалась методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Наблюдалось формирование вертикально ориентированных колонн с диаметром ~50-60 нм и высотой ~160 нм (аспектное отношение ~3) (рисунок). Анализ РЭМ-изображений указывает на локальное подтравливание кремниевой подложки под формирующимися наноструктурами в процессе химического осаждения серебра, что способствует удержанию колонн в вертикальном положении после удаления резиста.

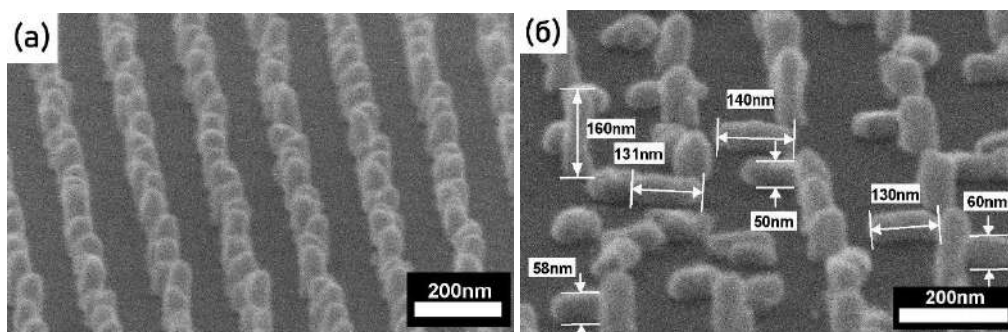


Рисунок. РЭМ-изображения вертикальных нанокolonн серебра: (а) – общий вид массива с периодом 150 нм, (б) – упавшие колонны с периодом 190 нм

Исследования оптических свойств созданных структур были проведены методами спектральной эллипсометрии и поляризационной спектрофотометрии при наклонных углах падения света (45° - 75°). Измерения проводились при разных ориентациях решетки (0° и 45°) относительно плоскости падения света. Обнаружена зависимость спектров комплексной псевдодиелектрической функции, а также коэффициентов отражения р- и s-поляризованного света от ориентации структуры и угла падения света, что указывает на оптическую анизотропию полученных массивов нанокolonн.

Представленная методика является технологичным способом получения массивов вертикальных металлических наноструктур с контролируемыми параметрами, не требующая вакуумных методов напыления. Продемонстрированная оптическая анизотропия открывает перспективы для их использования в поляризационной оптике и для создания анизотропных метаповерхностей.

[1] Butt M.A., *Nanotechnology*, **36**, 18, 182501, (2025).

[2] Jiang X., Hu S., Li Z., Lv J., Si G., *Optical Materials*, **58**, 323-326, (2016).

**ЛОКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ИОНОВ Nd^{3+} И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ЦИНК-ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИЙ
ИОНОВ В СОСТАВЕ МАТЕРИАЛА**

**Срабионян В.В.¹, Дурыманов В.А.¹, Ветчинников М.П.², Викленко И.А.¹,
Зинина Е.М.², Игнатьева Е.С.², Рунина К.И.², Панкин И.А.¹, Рубаник Д.С.¹,
Авакян Л.А.¹, Шахгильдян Г.Ю.², Сигаев В.Н.², Бугаев Л.А.¹**

¹ЮФУ, физический факультет, г. Ростов-на-Дону, Россия

²РХТУ имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия

yvsrab@sfedu.ru

Исследованы цинк-фосфатные стекла, допированные Nd^{3+} (0.25–1.5 мол.%), с целью установления связи между концентрацией ионов Nd^{3+} и их локальной структурой ближнего окружения, параметрами Джадда-Офелята и люминесцентными свойствами.

Ключевые слова: цинк-фосфатные стёкла, параметры Джадда-Офелята, концентрационное тушение люминесценции.

Стекла, допированные ионами редкоземельных (РЗ) металлов, широко используются в фотонике, оптоэлектронике, для создания высокоэффективных лазерных сред с повышенными люминесцентными характеристиками [1]. Оптические свойства таких стекол во многом зависят от концентрации РЗ ионов в образце, и такая зависимость часто имеет сложный, немонотонный характер, в частности, повышение концентрации РЗ ионов в ряде оксидных стекол с целью получения максимального усиления фотолюминесценции (ФЛ) оказывается ограниченным из-за начала концентрационного тушения ФЛ, которое определяется как свойствами поглощения-излучения конкретного РЗ иона, так и структурой его ближнего окружения, меняющейся с увеличением концентрации таких ионов. Поэтому установление изменений структуры ближнего окружения РЗ ионов, вызванное ростом их концентрации, и ее связи с оптическими характеристиками стекол остается сложной актуальной задачей.

Среди РЗ ионов, Nd^{3+} являются одними из наиболее широко используемых для создания таких сред, что обусловлено возможностью генерации излучения в синем, зеленом и красном цветах оптического спектра, а также возможностью генерации инфракрасного излучения в спектральном диапазоне 1.5 – 1.6 мкм (1064 нм) [2]. В качестве матрицы стекла для размещения Nd в данной работе использовались цинкофосфатные (PZ) стекла ($\text{ZnO-P}_2\text{O}_5$) в силу установленной перспективности фосфатных стекол для разработки лазерных сред [3].

В данной работе исследуются зависимости структуры ближнего окружения ионов Nd^{3+} от их концентрации в однократно допированных этими ионами цинк-фосфатных стеклах, и устанавливается связь таких структурных изменений с изменением спектрально-люминесцентных свойств стекла. Определяется связь выявленных структурных изменений с величинами параметров Джадда-Офелята, рассчитанных для изучаемых PZ стекол, позволяющая осуществить привязку значений этих параметров к особенностям изменений локальной атомной структуры излучающего иона. Установлено, что при допировании PZ стекла ионами Nd^{3+} в концентрационном интервале от 0.25 до 1.5 моль.% ярко выраженный порог концентрационного тушения PL отсутствует.

Исследование выполнено в Южном федеральном университете при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00102.

[1] Koepke C., Wisniewski K., Sikorski L., Piatkowski D., Kowalska K., Naftaly M., *Opt. Mater.*, **28**, 129-136, (2006).

[2] Cheng Y., Sun K., *J. Nanoparticle Res.*, **20**, 168, (2018).

[3] Dong J., Bass M., Walters C., *J. Opt. Soc. Am. B*, **21**, 454, (2004).

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

Керечанина М.Ф., Лизунова А.А., Вершинина О.В., Иванов В.В.

Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, Россия
vlasova.mf@mipt.ru

Исследовано влияние времени отжига на размерные и оптические характеристики наночастиц алюминия. Показан сдвиг пика поглощения и увеличение толщины оксидной оболочки вокруг металлического ядра с увеличением времени отжига.

Ключевые слова: плазмонные структуры, наночастицы алюминия, ультрафиолет.

Наночастицы алюминия проявляют плазмонные свойства в ультрафиолетовой (УФ) области и являются перспективным материалом для создания биологических и химических сенсоров [1]. Благодаря доступности и дешевизне по сравнению с благородными металлами, ультрадисперсный алюминий может иметь широкие коммерческие применения в фотокатализе, фотонике и композитных материалах. Одной из задач плазмоники является управление пиком поглощения металлических наноструктур, что позволяет настраивать устройства плазмоники для конкретных применений. На резонансную частоту поглощения влияют такие параметры как размер частиц, форма, толщина оболочки, степень агломерации [2]. Наночастицы алюминия в естественных условиях представляют собой структуру ядро-оболочка, с металлическим ядром и оболочкой из естественного аморфного оксида алюминия, толщина которой стабильна при длительном хранении и составляет около 3 нм [3]. Изменение толщины и элементного состава дополнительных слоёв позволяет сдвигать пики плазмонного поглощения металлических наноструктур.

Задачей данной работы является исследование влияния температуры и времени отжига в воздушной атмосфере на толщину оксидной оболочки и положение пика поглощения. Для эксперимента использовались наночастицы алюминия, синтезированные методом электровзрыва проводника, со средним размером 55 нм, которые были нанесены на кварцевое стекло методом микроплоттерной печати из стабильных суспензий в изопропиловом спирте. Сформированные плазмонные структуры с размером $1 \times 1,5$ см², а также исходный нанопорошок подвергались термической обработке в печи в атмосфере воздуха при 400 °С в течение 3, 6, 9 и 24 часов. Полученные образцы исследовались методами УФ-видимой спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Показан равномерный рост средней толщины оболочки от 3 до 8 нм при увеличении температуры до 400 °С и времени хранения до 24 часов (рисунок а). Исходные пленки алюминия характеризовались резонансным поглощением в ультрафиолетовой области с максимумом в положении 248 нм. После продолжительного отжига пленок спектр экстинкции описывается единичным пиком поглощения, который плавно сдвигается в длинноволновую область с увеличением времени отжига (рисунок б). При выдержке в течение суток резонансная частота поглощения соответствует длине волны 265 нм.

В результате работы предложена методика роста естественного оксида на наночастицах алюминия и сдвиг полосы поглощения на 7% путем регулирования времени термического отжига при 400 °С.

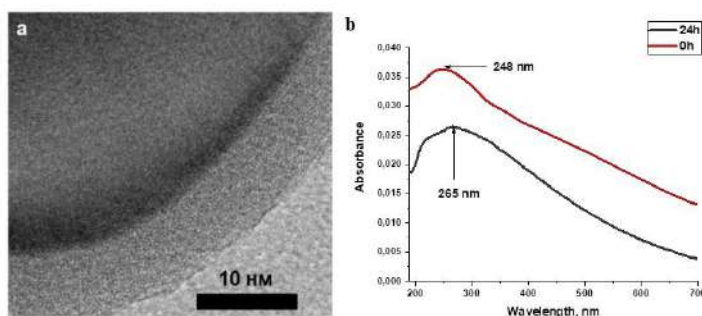


Рисунок. Характеризация наночастиц алюминия: (а) ПЭМ изображение высокого разрешения наночастиц алюминия после отжига в течение 24 часов, (б) спектры поглощения плазмонных структур до и после отжига в течение 24 часов при 400 °С

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00311-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00311/>.

[1] Knight M.W. et.al., *ACS Nano*, **8**, 834-840, (2014).

[2] Klimov V., *Jenny Stanford Publishing*, 1 ed., (2013).

[3] Gromov A.A. et.al., *Russian Journal of Physical Chemistry B*, **4**, 156-169, (2010).

ВЫСОКОДИСПЕРСИОННАЯ ЛИНИЯ ЗАДЕРЖКИ НА ОСНОВЕ МИКРОЦИЛИНДРА ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ ДИСПЕРСИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Апрелов Н.А., Колесникова А.Ю., Макарова Н.А., Редюк А.А., Ватник И.Д.

Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

n.aprelov@ngs.ru

Предложен новый тип компактной дисперсионной линии на основе волоконного микроцилиндра мод шепчущей галереи. Продemonстрировано увеличение длительности волнового пакета с пикосекунд до нескольких наносекунд.

Ключевые слова: дисперсия, микроцилиндр, моды шепчущей галереи.

Одной из основных научных задач фотоники является создание интегральных миниатюрных оптических устройств, позволяющих проводить измерения различных физических величин. Такими элементами могут являться оптические микрорезонаторы с высокой добротностью, способные резко увеличивать оптическое поле внутри себя, что позволяет создавать на их основе сенсоры и датчики биологических объектов. Специальным видом микрорезонаторов являются цилиндрические микрорезонаторы мод шепчущей галереи (МШГ) на поверхности кварцевых волокон. Возможность управления аксиальным распространением МШГ в таких микроцилиндрах открывают путь для создания разнообразных оптических элементов, не реализуемых в традиционных микрорезонаторах из-за особенностей геометрии. Например, одним из таких элементов может являться высокодисперсионная линия задержки с нелинейной аномальной зависимостью дисперсии от частоты. Такая линия может быть использована в спектроскопии методом дисперсионного преобразования Фурье (ДПФ) [1], обеспечивая разрешение вблизи резонанса менее 10 пм [2]. Нами была исследована возможность использования микроцилиндра, изготовленного на основе стандартного оптического волокна, в качестве диспергирующей системы для ДПФ, позволяющей восстанавливать исходный спектр без использования калибровочных измерений. Теоретическая зависимость групповой скорости v_g от частоты ω может быть представлена в виде [3]:

$$\frac{1}{v_g} = \frac{\partial k_z}{\partial \omega} = \frac{n^2}{c^2} \frac{\omega}{k_z}, \quad (1)$$

где n – показатель преломления, c – скорость света, k_z – константа распространения вдоль оси z .

Прохождение через дисперсионную линию на основе микроцилиндра с двумя элементами связи, расщепляет входящий ультракороткий импульс на две части. Одна уширяется до нескольких наносекунд под влиянием дисперсионной линии, вторая не подвержена влиянию микроцилиндра. Расщепление между двумя частями зависит от расстояния между элементами связи (рисунок), уширенная часть может быть использована в спектроскопии ДПФ, а ультракороткая может быть опорным сигналом для однозначного восстановления спектра.

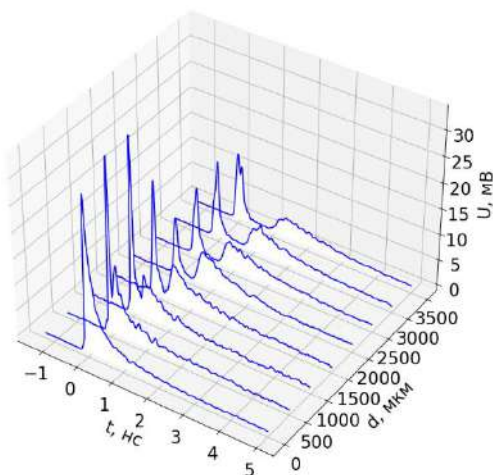


Рисунок. Осциллограмма ультракороткого импульса на выходе из дисперсионной линии на основе микроцилиндра при различных расстояниях между возбуждающими элементами

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (FSUS-2021-0015).

[1] Goda K. and Jalali B., *Nat. Photonics*, **7**, №2, 102-112, (2013).

[2] Апрелов Н.А. и др., *Труды 10-й Всероссийской Диановской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2025)*, Пермь, 07-10 октября 2025 года, 217-218, (2025).

[3] Sumetsky M., *Prog. Quantum Electron.*, **64**, 1-30, (2019).

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ПОСТРОЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНО ЗАДАННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ОТКЛИКА ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Свяховский С.Е., Емельянцева П.С., Пышков Н.И.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
sse@shg.ru

При помощи комбинирования периодических брэгговских решеток в обратном пространстве был найден способ построения фотонного кристалла с произвольным спектральным откликом. Экспериментально изготовлены фотонные кристаллы, спектр которых имеет наперед заданную форму.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, обратная задача.

Фотонные кристаллы (ФК) — это твердотельные структуры с периодическим изменением показателя преломления, что приводит к образованию фотонных запрещённых зон (ФЗЗ). В этих зонах свет не распространяется, что позволяет наблюдать необычные оптические эффекты, такие как усиление Рамановского рассеяния, эффект Парселла и генерацию гармоник.

Гибкость ФК в управлении светом открывает возможности для создания компактных и эффективных фотонных устройств, что важно для развития фотонных технологий. Однако возникает задача обратного проектирования — поиска структуры ФК с заданными свойствами. Для этого применяют различные методы, включая градиентную оптимизацию, генетические алгоритмы, нейронные сети, оптимизацию на основе математической инверсии и выпуклую оптимизацию, и др., которые позволяют находить оптимальные параметры (толщину слоёв и показатели преломления), чтобы спектральный отклик соответствовал заданной форме [1].

В этой работе представлен метод восстановления структуры одномерных фотонных кристаллов (ФК) по заданному спектру отражения, основанный на мультигармоническом разложении. Этот подход позволяет создавать ФК с произвольными оптическими характеристиками, что значительно расширяет область их применения. Проведены численные расчёты для различных спектров отражения, а также изготовлены экспериментальные образцы одномерных ФК.

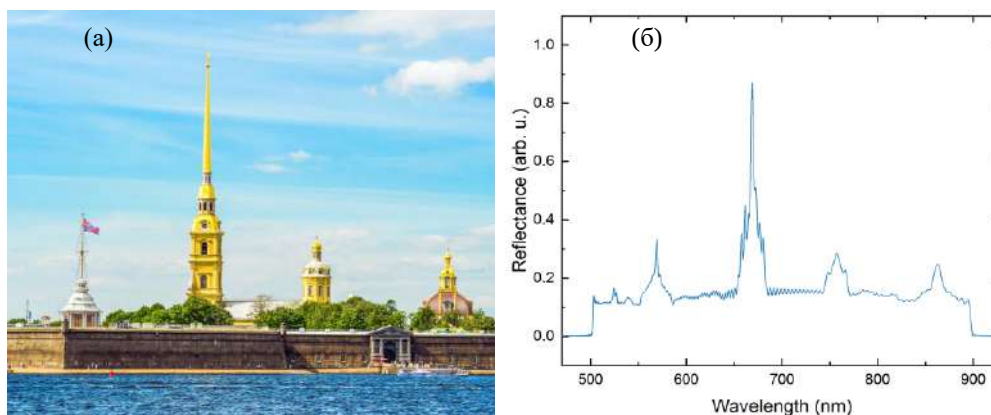


Рисунок. (а) – пример произвольного профиля, используемого в качестве заданной функции спектрального отклика, (б) – пример расчета спектра отражения фотонного кристалла с данной функцией спектрального отклика

На рисунке представлен результат работы метода: желаемая функция задается в виде профиля (а). После дискретизации и вычисления спектральных амплитуд гармоник происходит вычисление структуры фотонного кристалла, подробно изложенное в [1], итоговый спектр коэффициента отражения показан на рисунке (б).

Для проверки предложенного метода были созданы одномерные фотонные кристаллы и исследованы их оптические свойства. В работе применялся метод электрохимического травления кремния [2], позволяющий формировать ФК с тысячами слоёв. Эксперименты показали, что оптические потери в таких структурах в основном обусловлены рэлеевским рассеянием и не превышают нескольких процентов в средней части оптического диапазона даже для 100-микрометровых образцов, причём потери быстро уменьшаются с увеличением длины волны. Экспериментальный метод изготовления позволяет реализовать все спектральные особенности теоретического спектрального отклика.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-72-10008.

[1] Emeliantsev P.S., Pyshkov N.I., Svyakhovskiy S.E., *JETP Letters*, **117**, №11, 821-826, (2023).

[2] Svyakhovskiy S.E., Maydykovsky A.I., and Murzina T.V., *J. Appl. Phys.*, **112**, №1, 013106, (2012).

**ВЛИЯНИЕ ИНДУЦИРОВАННОЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ
ИЗОТРОПИЗАЦИИ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В НЕМ**

**Дериков Я.И.^{1,2}, Шандрюк Г.А.^{1,2}, Карпов О.Н.^{1,2}, Мерекалов А.С.¹, Ежов А.А.^{1,2},
Нестеров В.Ю.², Преснов Н.Д.², Соколовская О.И.², Головань Л.А.²**

¹Институт нефтехимического синтеза имени А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

физический факультет, Москва, Россия

golovan@physics.msu.ru

С целью изучения возможности управлять пространственным распределением полупроводниковых квантовых точек было исследовано их перераспределение в нематическом жидком кристалле с азохромофорами, фазовый переход в котором происходил при ультрафиолетовом освещении.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, квантовые точки, оптическая диагностика.

Возможность управлять пространственным распределением полупроводниковых квантовых точек (КТ) представляется весьма важной для создания разнообразных устройств фотоники. Обеспечить управление положением квантовых точек возможно, поместив их в жидкий кристалл (ЖК) и изменяя его фазовое состояние. Для этого можно использовать ЖК с внедренными в них молекулами хромофоров, испытывающих E-Z переход при освещении ультрафиолетовым (УФ) излучением, что, в свою очередь, приводит к переходу ЖК в изотропное состояние при температуре ниже температуры изотропизации в темноте. Полупроводниковые КТ могут растворяться в изотропной фазе ЖК, однако при его переходе в организованную фазу происходит их вытеснение из нее [1]. Это дает возможность, управляя УФ излучением, формировать структуры КТ. Однако для этого необходимо детальное знание о процессах перераспределения КТ при изменении температуры и УФ освещении ЖК с хромофорами. Такое исследование и составляло цель настоящей работы.

Нами были использованы КТ CdSe/ZnS, а в качестве ЖК матрицы – нематическая смесь НМ2 [2] с добавленными азобензолсодержащими молекулами (азохромофоры) АХ7 и АХ8, имеющие протяженную и разветвленную структуру, соответственно [3]. Температуры изомеризации, определенные как методом пропускания в скрещенных поляризаторах, так и измерением диэлектрической проницаемости составили 82°C и 58°C для НМ2 с АХ7 10 масс.% и НМ2 с АХ8 10 масс.%, соответственно, тогда как для исходной НМ2 она составляла 64°C. Добавление КТ в композитные смеси в количестве до 1 масс.% не приводили к существенному изменению температуры перехода. Фотоиндуцированный переход из ЖК в аморфную фазу занимает не более 30 с.

Фотолюминесцентная микроскопия свидетельствует, что в ЖК фазе КТ агломерируются, образуя области высокой концентрации КТ размером в десятки мкм, тогда как при светоиндуцированном переходе ЖК в изотропную фазу КТ распределены однородно по всему объему. Время, за которое устанавливается однородное распределение КТ, превышает 100 с.

Нелинейно-оптические сигналы, генерируемые в композитах ЖК с азохромофорами [4] и КТ, включали в себя вторую и третью оптические гармоники и сигнал ап-конверсии – трехфотонной фотолюминесценции. Возбуждение осуществлялось излучением лазера на кристалле Сг:форстерита (1250 нм, 80 фс, 80 МГц, 1,5 нДж в импульсе), контроль фазового состояния ЖК осуществлялся с помощью излучения полупроводникового лазера с длиной волны 780 нм, прошедшего через скрещенные поляризаторы. Температурные зависимости указанных сигналов демонстрируют их существенный спад, достигающий минимума при температурах ниже температуры перехода в изотропную фазу, что указывает на возможные структурные изменения в композитной среде даже без ее изотропизации.

Таким образом, показано, что индуцированный УФ излучением переход в изотропную фазу сопровождается существенным перераспределением КТ в пространстве, которое приводит к изменениям нелинейно-оптических сигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00246, <https://rscf.ru/project/23-19-00246/>).

[1] Osipov M.A., Gorkounov M.V., In: *Liquid Crystals with Nano and Microparticles*, World Scientific, Singapore, (2016).

[2] Карпов О.Н., Дериков Я.И., Финько А.В., Савельев А.И., Михалёнок С.Г., Кузьменок Н.М., Безбородов В.С., Тальрозе Р.В., *Жидк. крист. и их практич. использ.*, **23**, №3, 23-35, (2023).

[3] Шандрюк Г.А., Егоров Ю.А., Дериков Я.И., Безбородов В.С., Финько А.В., Головань Л.А., Тальрозе Р.В., *Жидк. крист. и их практич. использ.*, **24**, №1, 5-21, (2024). Беспалов В.Г., Макаров Н.С., *Опт. и спектр.*, **90**, №6, 1034-1037, (2001).

[4] Соколовская О.И. и др., *Жидк. крист. и их практич. использ.*, **25**, №1, 90-98, (2025).

РЕШЁТКА ИНВЕРСИИ НАСЕЛЁННОСТЕЙ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ В ЛАЗЕРАХ С НИЗКО- И ВЫСОКОДОБОТНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Кочаровский Вл.В., Кочаровская Е.Р.

ФИЦ ИПФ РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород, Россия

kochar@ipfran.ru

Аналитическим решением уравнений Максвелла-Блоха показано, что самосогласованная полуволновая решётка инверсии населённости активных центров в сверхизлучающем лазере существенно влияет на структуры поля, а также асимметрию излучения при различных зеркалах на торцах.

Ключевые слова: одномодовый лазер, решётка инверсии населённости, низкодобротный резонатор.

Одномодовая генерация лазера с резонатором Фабри-Перо, обладающим в общем случае разными коэффициентами отражения $R_{1,2}$ противоположных зеркал, неизбежно сопровождается формированием нелинейной полуволновой решётки инверсии населённости энергетических уровней активной среды. В большинстве лазеров, имеющих высокодобротные резонаторы, влияние этой решётки на свойства генерируемых (и создающих её) встречных волн является слабым, и поэтому она не учитывается в расчётах профилей поля, инверсии населённости и поляризации активной среды; см., например, [1, 2].

Однако оказывается [2, 3], что если время фазовой релаксации T_2 поляризации активной среды, т.е. плотности оптических дипольных моментов активных центров, больше или порядка времени жизни T_E фотонов в резонаторе (низкодобротный резонатор), то указанная самосогласованная решётка может существенно влиять на взаимодействие и конкуренцию встречных волн. Эта решётка играет роль распределённого в пространстве неоднородного брэгговского зеркала, обладающего периодической модуляцией действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости активной среды. В результате, например, в асимметричном резонаторе с разными коэффициентами отражения зеркал R_1 и R_2 она приводит к многократному усилению асимметрии излучению из противоположных торцов.

В докладе на основе оригинального аналитического решения стационарных уравнений Максвелла-Блоха дан обзор нелинейных эффектов, обусловленных согласованной полуволновой решёткой инверсии населённости, и указаны требования, при выполнении которых эти эффекты являются значительными.

Представлены характерные примеры, прежде всего для сверхизлучающих лазеров, в которых указанная решётка качественно изменяет свойства асимметричной генерации лазера и пространственные структуры поля, поляризации, инверсии населённости. Проведено сравнение этих структур, найденных с учётом и известных ранее без учёта данной решётки (см. рисунок (а) и (б); обозначения следуют обзору [2]).

Таким образом, не учитывавшаяся ранее нелинейная полуволновая решётка инверсии населённости активных центров в лазерах с низкодобротными резонаторами может иметь решающее значение в реализации уникальных режимов генерации - как стационарных, так и нестационарных.

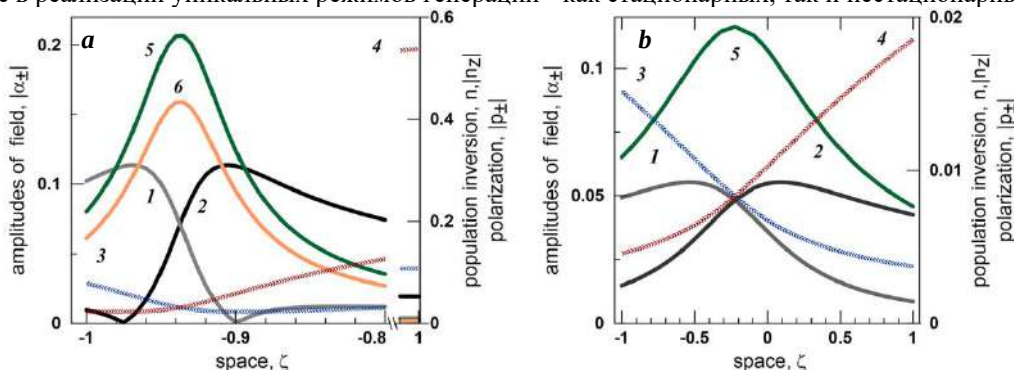


Рисунок. Типичные пространственные структуры встречных волн поляризации (1)-(2) и поля (3)-(4), а также двух компонент инверсии населённости – плавно неоднородной (5) и периодической (6) (полуволновая решётка) – для одномодовой стационарной генерации сверхизлучающего лазера с нормированной длиной $L=2$, коэффициентами отражения зеркал $R_1=0.3$, $R_2=0.2$ и уровнем непрерывной накачки $p_r=0.5$. Профили построены согласно аналитическим решениям, найденным с учётом решётки инверсии населённости (а) и без её учёта (б); шкалы на рисунках различны в 2 (левая) и 30 (правая) раз

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания ИПФ РАН № FFUF-2023-0002.

[1] Ханин Я.И., Основы динамики лазеров, М. Наука, (1999).

[2] Кочаровский Вл.В., Железняков В.В., Кочаровская Е.Р., Кочаровский В.В., *УФН*, **187**, №4, 367-410, (2017).

[3] Кочаровская Е.Р., Кочаровский Вл.В., *ФТП*, **57**, №5, 348-356, (2023).

**МУЛЬТИФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАНОАЛМАЗНЫЕ АГЕНТЫ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ФОТОТЕРМАЛЬНОЙ ТЕРАПИИ**

Богданов К.В.¹, Грудинкин С.А.², Каляя И.Е.¹, Баранов А.В.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

kirw.bog@gmail.com

Представлен терапевтический агент для локальной фототермической терапии, использующий слоистые алмазные нано- и субмикрочастицы со структурой типа «ядро/оболочка» с разной функциональностью слоев.

Ключевые слова: алмазные наночастицы ядро/оболочка, люминесцирующие SiV центры, локальная фототермальная терапия.

В настоящее время локальная фототермическая терапия (ФТТ) рассматривается как многообещающий метод лечения злокачественных раковых опухолей, основанный на избирательном уничтожении опухолевых клеток путем их нагрева. Благодаря значительному поглощению в ближней инфракрасной области спектра, бор-допированные наноалмазные частицы обладают перспективами для применения в фототермической терапии [1]. Для такого применения в область пораженных биологических тканей вводятся наночастицы с высоким коэффициентом поглощения света, которые при воздействии, например, лазерного излучения, нагреваются до нужной температуры (40–45 °С). Преимущество наноалмазных частиц связано с их биосовместимостью и возможностью модификации поверхности. Для параллельного дистанционного локального контроля температуры тканей во время нагрева эффективно используется метод оптической термометрии, основанный на измерении и анализе температурной зависимости спектральных характеристик фотолюминесценции оптически активных центров, состоящих из алмазной фазы другой функционализации. Такая фаза наращивается на поверхности бор-допированных частиц и содержит Si-V центр, излучающий на 738 нм, что находится в окне прозрачности биологических тканей [2].

В данной работе представлены наноалмазные multifunctional наночастицы с бор-допированным ядром, обладающим высокой способностью к поглощению, покрытые прозрачной алмазной оболочкой с внедренными центрами окраски кремний-вакансия (SiV), которые проявляют интенсивную узкополосную фотолюминесценцию. Такие частицы были синтезированы методом химического газофазного осаждения с использованием горячей нити [3]. Бор-допированное ядро обеспечивает эффективное поглощение лазерного излучения и нагрев наночастицы, в то время как люминесцентные центры в прозрачной оболочке служат чувствительными сенсорами температуры. Центр окраски SiV выделяется тем, что максимум его бесфоновой линии фотолюминесценции (738 нм) находится в области прозрачности биологических тканей. Анализ температурной зависимости спектров фотолюминесценции показал изменение температуры синтезированных наноалмазных частиц в зависимости от длины волны и интенсивности лазерного облучения. Эти исследования позволили оптимизировать структуру и люминесцентные свойства наночастиц для максимального поглощения и повышения температурной чувствительности люминесцентного сигнала центров окраски [4]. Полученные люминесцентные наноалмазные частицы представляют собой перспективный функциональный материал для биоимиджинга и нанотераностики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда грант № 25-15-00068.

[1] Vervald A.M., et.al, *Sci. Eng.*, **6**, 8, 4446-4453, (2020).

[2] Golubewa L., et.al, *Adv. Optical Mater.*, **10**, 2200631, (2022).

[3] Грудинкин С.А., et.al, *ФТТ.*, **64**, 10, 1525-1530, (2022).

[4] Grudinkin S.A., et al., *Nanomaterials*, **13**, 24, 3124, (2023).

**СПИН—ЗАВИСИМАЯ ДИНАМИКА ЭКСИТОНОВ В ДУГООБРАЗНО
РАСТЯНУТЫХ МОНОСЛОЯХ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ
ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ**

Шубник А.А.¹, Шахназарян В.А.^{1,2}, Шелых И.А.^{1,3}, Ростами Х.⁴

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²МФТИ, Москва, Россия

³Исландский университет, Рейкьявик, Исландия

⁴NORDITA, Королевский технологический институт и Стокгольмский университет, Стокгольм, Швеция

anton.shubnic@metalab.ifmo.ru

Спин-зависимая динамика экситонов представляет большой интерес для нанофотоники и спинтроники. В данной работе мы рассматриваем дугообразно растянутые монослои дихалькогенидов переходных металлов как перспективную платформу для реализации данного эффекта.

Ключевые слова: экситон, спиновая динамика, дихалькогениды переходных металлов.

Генерация спин-поляризованных экситонов представляет большой интерес для таких областей как нанофотоника, спинтроника и квантовые вычисления. Реализация эффектов, основанных на данном принципе, откроет возможности как оптического управления спиновыми состояниями, так и реализации сверхбыстрой оптической памяти. Спиновый экситонный эффект Холла (SHE, spin Hall effect), заключающийся в пространственном разделении экситонов с разными спинами, наблюдался [1] в 1T' структурах дихалькогенидов переходных металлов (TMDs, transition metal dichalcogenides) при умеренных температурах. Например, в 1T'-WTe₂ значение температуры составило 100 К [2, 3]. Однако, для реализации устройств, основанных на данном эффекте, необходимо повысить рабочую температуру.

Дихалькогениды переходных металлов являются перспективной платформой для изучения разнообразных экситонных эффектов. Однако, реализация спиновой динамики при помощи магнитного поля в свободных слоях TMDs затруднено из-за того, что сила Лоренца действует на электрон и дырку в противоположных направлениях, приводя к нулевому суммарному вкладу. В данной работе мы предлагаем дугообразно растянутые монослои дихалькогенидов переходных металлов как перспективную платформу для реализации спин—зависимой динамики экситонов.

В дугообразно растянутых монослоях TMDs возникает эффективное псевдомагнитное поле, имеющее разный знак для K и K' долин. Если рассмотреть междолинные экситоны в данной системе, то силы Лоренца, действующие на электрон и дырку, будут не вычитаться, а складываться, что приведёт к ненулевому суммарному эффекту. Межслоевые экситоны в дихалькогенидах переходных металлах состава MoX₂ (X=S, Se) обладают нулевым суммарным спином, однако если рассмотреть материалы состава WX₂ (X=S, Se) оказывается возможной реализация спин-зависимой динамики.

Для количественной оценки данного эффекта мы вывели дрефт-диффузионное уравнение для экситонов с учётом вклада эффективного псевдомагнитного поля и провели моделирование динамики экситонного газа. Наши результаты показывают, что спиновое разделение экситонов может наблюдаться на достижимых в эксперименте временных и пространственных масштабах при комнатной температуре.

Таким образом, в данной работе мы показали, что междолинные экситоны в дугообразно растянутых монослоях дихалькогенидов переходных металлов могут рассматриваться как перспективная платформа для реализации спин—зависимой динамики экситонов при комнатной температуре.

[1] Qian X. et al., *Science*, **346**, №6215, 1344-1347, (2014).

[2] Shi Y. et al., *Science Advances*, **5**, №2, (2019).

[3] Garcia J. H. et al., *Physical Review Letters*, **125**, №25, 256603, (2020).

ИНТЕГРАЦИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ МИКРОЧАСТИЦ В ПЛАНАРНЫЕ КРЕМНИЙ-НИТРИДНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОМ ДИАПАЗОНЕ

Обыденнов Д.В., Ашарчук И.М., Мумляков А.М., Шибалов М.В., Вовк Н.А., Филиппов И.А., Волкова Л.С., Тархов М.А.

ИНМЭ РАН, Москва, Россия

obydenovdv@my.msu.ru

Предложен и экспериментально реализован метод интеграции С-диапазонного излучателя на наночастицах $\text{NaYF}_4:\text{Yb},\text{Er}$ в планарную фотонную структуру на нитриде кремния с эффективным волноводным выводом.

Ключевые слова: нитрид кремния, планарная интеграция, интегральные источники излучения.

Интеграция активных компонентов в планарные фотонные схемы на базе нитрида кремния остаётся актуальной задачей ввиду высокой термостабильности платформы и низких оптических потерь [1, 2], однако её несовместимость с традиционными источниками излучения накладывает существенные ограничения. В настоящей работе представлена технология создания интегрированного генератора спонтанного излучения на длинах волн телекоммуникационного диапазона, основанного на свойствах микрочастиц $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+},\text{Er}^{3+}$.

Микрочастицы были размещены в сформированных литографией углублениях поверх кремний-нитридной структуры (тейпера) толщиной 200 нм. Структура изготавливалась на кремниевой подложке с использованием последовательных этапов термического окисления, PECVD-осаждения, электронной литографии, сухого травления и планаризации. При фокусировке на область частиц лазерного пучка ($\lambda = 950$ нм) на выходе фотонного чипа наблюдалось ИК-излучение с пиковым максимумом при 1532 нм и шириной спектра около 60 нм. Спектральные характеристики излучения были зарегистрированы с использованием спектрометра и ИК-камеры. Полученная выходная мощность составила до 48 пВт. Наблюдалась типичная для конверсии вниз зависимость излучения от мощности накачки с насыщением при ~ 50 мВт, что продемонстрировано на рисунке. Численное моделирование методом FDTD, предполагающее дипольные источники внутри частиц, показало среднюю эффективность ввода излучения в волноводную ТЕ-моду порядка 0,25%.

Анализ результатов подтвердил как эффективность применённого метода, так и направления его возможной оптимизации — улучшение формы адаптера, ориентации частиц и добавление резонаторных структур. Данная технология открывает путь к созданию масштабируемых активных компонентов в фотонных чипах на платформе нитрида кремния.

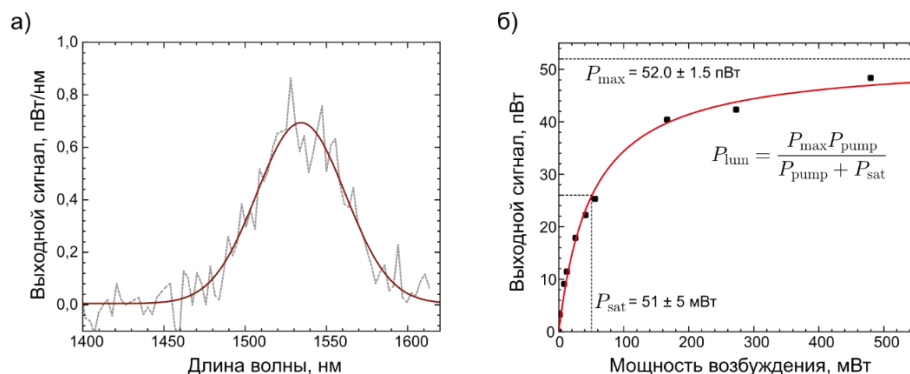


Рисунок. Заведение излучения в волновод. а) Спектр мощности люминесцентного излучения на выходе из чипа. Серая кривая – экспериментальные значения, красная – аппроксимация гауссовой функцией. б) Зависимость интегральной мощности люминесценции на выходе из чипа от мощности возбуждения. Точки – экспериментальные значения, кривая – аппроксимация законом насыщения люминесценции.

$P_{\max}$ и P_{sat} – максимальная мощность люминесценции и мощность насыщения, соответственно

Исследование выполнено при поддержке проекта № 125020501540-9 Министерства образования и науки Российской Федерации. Изготовление и определение характеристик технологии проводилось на крупномасштабном комплексе для технологий гетерогенной интеграции и нанотехнологий «кремний + углерод».

[1] Xiang C., Jin W., Bowers J.E., *Photonics Research*, **10**, 6, A82, (2022).

[2] Gardes F. et al., *Sensors*, **22**, 11, 4227, (2022).

ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ФОТОНИКИ

**ЕДИНИЧНЫЕ КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ АНСАМБЛИ,
ОБРАЗУЕМЫЕ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕДАХ
ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ И ЖЁСТКОЙ РАДИАЦИЕЙ**

Мартынович Е.Ф., Дресвянский В.П.

Иркутский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Россия

femto@bk.ru

Люминесцирующие квантовые системы индуцировались в кристаллах оптической и жесткой радиацией. Проведены эксперименты на одиночных центрах по лазерной фотохимии и переключению. Ансамбли характеризуются через свойства входящих в них одиночных центров.

Ключевые слова: одиночная квантовая система, люминесценция, микроспектроскопия.

Люминесцирующие квантовые системы, которые можно создавать в кристаллах под действием ионизирующего излучения, включая лазерное, это центры окраски, обнаруженные впервые около 100 лет тому назад Робертом Полем в щёлочно-галоидных кристаллах. За это время их свойства и структура были хорошо исследованы; они нашли достаточно широкое применение в науке и технике. Однако, мы знакомы с этими квантовыми системами, фактически, лишь по свойствам их ансамблей. Свойства одиночных центров окраски, в частности, в названных выше щёлочно-галоидных кристаллах, почти не изучены. Вместе с тем, интерес к изучению свойств одиночных квантовых систем сейчас нарастает [1].

Для создания центров в объёме кристаллической среды мы использовали рентгеновское и гамма-излучение, и быстрые нейтроны. Пространственно-селективное адресное формирование обеспечивалось остросфокусированным электронным пучком растрового микроскопа с литографической приставкой, а также сфокусированным излучением титан-сапфирового фемтосекундного лазера, иттербиевого субпикосекундного лазера и пикосекундных диодных лазеров видимого и ближнего УФ диапазонов в кристаллах LiF, NaF, MgF₂, Al₂O₃ и активированных кристаллах KCl. Регистрация и исследование характеристик одиночных центров производились с помощью конфокального люминесцентного сканирующего микроскопа с временным разрешением MicroTime 200, работающего в режиме время-коррелированного счёта фотонов.

Обоснован и реализован метод спектроскопического различения одиночных люминесцирующих квантовых систем и их ансамблей, основанный на использовании полной или частичной совокупности следующих спектроскопических признаков одиночных квантовых систем: 1 - параметры спектрального контура, если они могут быть измерены, или спектральные области возбуждения и регистрации; 2 - значения величин постоянные времени затухания люминесценции; 3 - относительный выход люминесценции (интенсивность люминесценции одиночного центра при фиксированной интенсивности возбуждающего излучения); 4 - характеристики траекторий интенсивности люминесценции одиночных центров при фиксированной интенсивности возбуждения.

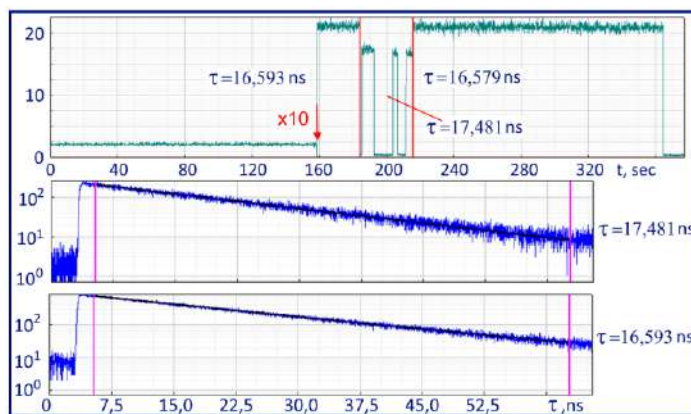


Рисунок. Лазерная фотохимия на одиночной квантовой системе

На рисунке для примера показана траектория интенсивности одиночного центра, характеризующегося величиной постоянной времени затухания 16,593 нс, его преобразование в момент времени 183 с в другой центр с иной постоянной времени затухания 17,481 нс и с другой траекторной характеристикой, и обратное переключение в момент времени 216 с, что подтверждается восстановлением вида траектории и совпадением в пределах погрешности измерения значения времени затухания 16,579 нс с первоначальным значением.

[1] Xu X., Gao C., Emusani R., Jia C., Xiang D., *Adv. Sci.*, **11**, 2400877, (2024).

**ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА
МЕТОДОМ Na-Ag ИОННОГО ОБМЕНА ДЛЯ ХЕМО- И БИОСЕНСОРОВ**

**Сгибнев Е.М.¹, Докукин М.Е.¹, Шелаев А.В.¹, Иноземцев В.А.²,
Шведов М.А.², Кандрашина С.С.², Шерстюкова Е.А.²,
Никоноров Н.В.³, Сергунова В.А.², Барышев А.В.¹**

¹ФГУП «ВНИИА», Москва, Россия

²НИИОР имени В.А. Неговского, ФГБНУ «ФНКЦ РР», Москва, Россия

³Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

sgibnevem@yandex.ru

В работе исследованы усиление сигналов комбинационного рассеяния и флуоресценции массивом наночастиц, сформированных методом Na⁺-Ag⁺ ионного обмена и термообработки на воздухе на поверхности стекла. Обсуждаются перспективы использования предложенного метода в сенсорике.

Ключевые слова: ионный обмен, серебряные наночастицы, усиление флуоресценции.

С момента своего открытия в 1974 году явление гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) активно исследуется по всему миру для детектирования различных веществ в сверхмалых концентрациях, вплоть до одиночных молекул [1]. Наиболее перспективными для ГКР являются плазмонные наноструктуры, которые за счёт локального усиления поля могут обеспечить высокие коэффициенты усиления ГКР. С другой стороны, использование плазмонных наноструктур позволяет отслеживать динамику внутриклеточных процессов и все чаще применяется для исследований в областях биомедицины, биосенсорики, разработки лекарств и для клеточной клинической диагностики [2]. Однако, широкое практическое использование ГКР спектроскопии ограничивается требованиями к ГКР-активным подложкам по воспроизводимости характеристик, долговременной стабильности и равномерности усиления.

В настоящее время разработаны методы роста наночастиц серебра на поверхности стекла методом Na⁺-Ag⁺ низкотемпературного ионного обмена (НИО) с последующим использованием термической обработки в водородной атмосфере или химического травления [3, 4]. Стоит отметить, что при этом возможен рост наночастиц и в поверхностном слое стекла. В данной работе предложен метод формирования nanoостровковых плёнок серебра на поверхности силикатного стекла при использовании технологии Na⁺-Ag⁺ НИО и последующего отжига на воздухе. В работе исследовалась матрица силикатного стекла на основе системы Na₂O-Al₂O₃-ZnO-SiO₂-F синтезированное при 1500 °C в воздушной атмосфере с использованием платинового тигля и мешалки. Na⁺-Ag⁺ НИО проводился в расплаве нитратов серебра и натрия (5мол.%AgNO₃/95мол.%NaNO₃) при 320 °C. После процесса НИО образцы подвергались термической обработке на воздухе при температурах 300-500 °C для формирования серебряных наноструктур на поверхности. Образцы характеризовались с помощью абсорбционной спектроскопии, атомно-силовой микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния.

Показано, что свойствами nanoостровковых плёнок серебра (средний размер, высота, среднее расстояние между частицами) можно эффективно управлять путём изменения параметров отжига. Полученные таким образом плёнки позволяют достигать коэффициента усиления сигнала ГКР до 10⁶, что соответствует коммерческим аналогам. Кроме того, предложенный метод позволяет многократно формировать nanoостровковую плёнку после однократной процедуры ионного обмена. В работе также проводились эксперименты по исследованию усиления флуоресцентного отклика мембран нейтрофилов при использовании стеклянных подложек с серебряной nanoостровковой плёнкой, изготовленной методом Na⁺-Ag⁺ НИО и отжига в воздушной атмосфере. Результаты проведённых исследований показывают, что интенсивность флуоресценции от окрашенной с помощью WGA конъюгированного с Alexa Fluor 594 мембраны нейтрофилов может увеличиваться более чем на порядок по сравнению со стеклянной подложкой без наночастиц.

Таким образом, в работе продемонстрировано, что оптимизация состава стекла позволяет существенно упростить методику формирования массива наночастиц серебра на поверхности, преодолев требования к восстановительной атмосфере при отжиге и необходимости химического травления. Nanoостровковые плёнки серебра на поверхности стекла могут использоваться для создания сенсоров на основе ГКР с коэффициентом усиления до 10⁶ и усиления флуоресцентного отклика в исследованиях биологических объектов.

[1] Wang X., Huang S.C., Hu S., Yan S., Ren B., *Nat. Rev.*, **2**, 253-271, (2020).

[2] Kumar A., Kim S., Nam J.M., *J. Am. Chem. Soc.*, **138**, 14509-14525, (2016).

[3] Zhurikhina V.V., Brunkov P.N., Melehin V.G., Kaplas T., Svirko Y., Rutckaia V.V., Lipovskii A.A., *Nanoscale Res. Lett.*, **7**, 676, (2012).

[4] Chen Y., Karvonen L., Saynatjoki A., Ye C., Tervonen A., Honkanen S., *Opt. Mater. Express*, **2**, 164-172, (2011).

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА (g - C_3N_4) РАЗНОЙ РАЗМЕРНОСТИ (1D, 2D, 3D) И МОДИФИЦИРОВАННОГО ИОНАМИ МЕТАЛЛОВ Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Pt^{4+} , Au^+ , НАХОДЯЩИХСЯ В СОСТОЯНИИ «SINGLE ATOM»

Шурухина А.В.¹, Рудакова А.В.¹, Жаровов Д.А.¹, Емелин А.В.¹,
Орешонков А.С.², Немцев И.В.²

¹Санкт-Петербургский государственный Университет, Лаборатория КристаллоФотоники,
Санкт-Петербург, Россия

²Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Красноярск, Россия
a.shurukhina@spbu.ru

Синтезированы образцы графитоподобного нитрида углерода разной размерности и проведена модификация поверхности образцов ионами металлов. Также были проведены DFT расчеты, демонстрирующие изменения в электронной структуре и спектрах комбинационного рассеяния света при понижении размерности g - C_3N_4 .

Ключевые слова: графитоподобный нитрид углерода, single atom, модифицирование поверхности.

Уникальные свойства нитрида углерода C_3N_4 известны еще с 2009, когда Ванг и др. [1] открыли возможность этого соединения расщеплять воду на водород и кислород при облучении видимым светом. C_3N_4 -структуры включают α -, β -, кубический, псевдокубический и графитоподобный нитрид углерода. В данной работе предметом исследования является графитоподобный g - C_3N_4 . Такой выбор обусловлен нетоксичностью, низкой стоимостью и простотой синтеза данного соединения [2], эффективной фотолюминесценцией, возможностью модифицировать поверхность и способностью разлагать органические соединения [3]. Все эти свойства напрямую зависят от функциональных групп, расположенных на поверхности, заряженности и пространственной конфигурации поверхности C_3N_4 [4].

Слои графитоподобного g - C_3N_4 соединены слабыми ван-дер-ваальсовыми связями, поэтому они легко разделяются при термической, ультразвуковой и химической обработке с получением двумерных листов и одномерных «нитей» с большими значениями площади поверхности и запрещенной зоной по сравнению с объемным материалом [3].

Нами в работе разработаны методы получения образцов g - C_3N_4 с размерностью 1D, 2D, 3D и 3D с поверхностью, модифицированной 1D и 2D структурами. Также была проведена модификация поверхности образца g - C_3N_4 ионами переходных (Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+}) и благородных (Au^+ , Pt^{4+}) металлов, находящихся в одиночном состоянии (single atom) (рисунок).

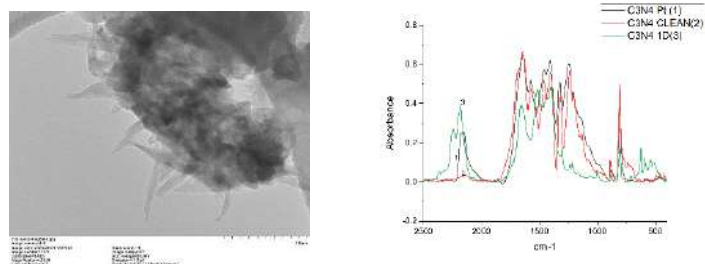


Рисунок. ТЕМ изображение g - C_3N_4 Pt и его FTIR спектры (1) g - C_3N_4 Pt, (2) g - C_3N_4 clean, (3) g - C_3N_4 1d

Полученные образцы охарактеризованы методами рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, ИК спектроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Оптические свойства изучены методами спектроскопии диффузного отражения и фотолюминесценции. Спектры фотолюминесценции регистрировали при возбуждении светом с $\lambda_{ex}=320$ нм. Также были проведены DFT расчеты, демонстрирующие изменения в электронной структуре и спектрах комбинационного рассеяния света при понижении размерности g - C_3N_4 .

Работа выполнена в рамках деятельности лаборатории Фотоактивные Нанокмпозитные Материалы СПбГУ и Международного совместного Центра СПбГУ и Университета Гуанси по разработке решений в области нейтрализации углерода. Благодарим ресурсные Центры СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследований», «Методы анализа состава вещества», «Нанотехнологии», «Физические методы исследования поверхности», «Геомодель» за оказанную помощь в характеристике образцов.

[1] Wang X., Maeda K., Chen X., et al., *JACS*, **131**, №5, 1680-1681, (2009).

[2] Zhu J., Xiao P., Li H., et al., *Applied Materials & Interfaces*, **6**, №19, 16449-16465, (2014).

[3] Zhurenok A.V., Larina T.V., et al., *Mendeleev Commun.*, **31**, №2, 157-159, (2021).

[4] Zhang Y., Thomas A., Antonietti M., et al., *JACS*, **131**, №1, 50-51, (2009).

**КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ПЕРОВСКИТОВ CsPbBr₃ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА
ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

**Миронов Л.Ю.¹, Харисова Р.Д.¹, Лютикова О.А.², Сгибнев Е.М.²,
Ратова А.Д.¹, Шерemet В.Г.¹, Зырянова К.С.¹, Барышев А.В.²**

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²ФГУП «ВНИИА», Москва, Россия

leonid_mironov@itmo.ru

Показана возможность кристаллизации перовскитов CsPbBr₃ на поверхности борогерманатного стекла при механическом воздействии. Продемонстрирована возможность детектирования NO₂ в концентрации менее 1 ppm. Квантовый выход люминесценции материала составляет ~0,3.

Ключевые слова: перовскиты, борогерманатное стекло, газовые сенсоры.

Нанокристаллы металлогалогенидных перовскитов обладают яркой узкополосной люминесценцией, перестраиваемой изменением состава в видимом диапазоне, и являются перспективными материалами для фотоники, оптоэлектроники, фотовольтаики и сенсорики [1]. Было обнаружено, что нанокристаллы CsPbHal₃ могут быть сформированы на поверхности стекла, содержащего прекурсоры перовскитов, при раскалывании или механическом воздействии [2]. Существует всего несколько работ, посвященных механосинтезу нанокристаллов перовскитов на поверхности стекла, поэтому механизм формирования и границы условий, при которых это происходит, на данный момент не установлены. Было предложено несколько применений для стекла, способного к кристаллизации перовскитов на поверхности: сенсоры ионов свинца [2] и температурные сенсоры [3]. В данной работе показана возможность использовать кристаллы перовскитов на поверхности стекла в качестве газовых сенсоров, чувствительных к NO₂.

Было синтезировано борогерманатное стекло состава 41,29 GeO₂ – 25,57 B₂O₃ – 6,95 Na₂O – 5,87 Cs₂O – 5,45 ZnO – 2,45 PbO – 4,14 K₂O – 8,28 Br, синтез стекла проходил при 950 °C, отжиг проводился от 470 °C. Для формирования кристаллов перовскитов после синтеза стекло было предварительно расколото в прессе, а затем измельчено в шаровой мельнице со скоростью 300 об./мин в течение 1 – 40 мин.

После синтеза стекло не обладает характерной люминесценцией перовскитов, однако после размалывания у стекла наблюдается зеленая люминесценция с максимумом ~515 нм. При нанесении на молотое стекло полярных растворителей (глицерин или изопропиловый спирт) наблюдается необратимое тушение люминесценции перовскитов, в то время как нанесение неполярного толуола не оказывает такого эффекта, что согласуется с расположением ионных кристаллов перовскитов на поверхности стекла. Максимальный квантовый выход люминесценции перовскитов составил порядка ~0,3 при возбуждении на длине волны 390 нм, при этом длительное размалывание стекла в мельнице приводит к падению квантового выхода люминесценции перовскитов. Для изучения газочувствительных свойств кристаллов перовскитов на поверхности стекла было исследовано влияние NO₂ на спектрально-люминесцентные свойства перовскитов. При воздействии NO₂ наблюдалось тушение фотолюминесценции и небольшой сдвиг ее спектра в пределах ~3-5 нм. Установлено, что образцы обладают высокой чувствительностью к NO₂ и позволяют детектировать концентрации на уровне менее 1 ppm, с пределом обнаружения 100 ppb.

[1] Shamsi J., Urban A.S., Imran M., De Trizio L., Manna L., *Chem. Rev.*, **119**, №5, 3296-3348, (2019).

[2] Xiang X., Lin H., Li R., Cheng Y., Huang Q., Xu J., Wang C., Chen X., Wang Y., *Nano Res.*, **12**, 1049-1054, (2019).

[3] Lu C., Duan Y., Li P., Lu Y., Xu S., Zhang J., *Ceram. Int.*, **48**, №10, 13826-13832, (2022).

**ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЁВ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА
ИЗ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

**Пятнов М.В.^{1,2}, Соколов М.М.², Волкова И.Р.^{1,3}, Бузин Д.С.¹,
Рыжков И.И.^{2,4}, Ветров С.Я.^{1,2}, Тимофеев И.В.^{1,2}**

¹Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Россия

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

³Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН, г. Красноярск, Россия

⁴Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, Россия

mpyatnov@iph.krasn.ru

Анализ спектров пропускания фотонного кристалла из анодного оксида алюминия позволяет определить толщины и эффективные показатели преломления слоёв образца.

Ключевые слова: анодирование, фотонный кристалл, эффективный показатель преломления.

В последние годы метод электрохимического анодирования часто используется для синтеза фотонных кристаллов [1]. Образцы, выращиваемые этим методом, обладают пористой структурой, в результате чего их спектральные свойства могут быть легко изменены с помощью материалов, внедренных внутрь их пор. Актуальной методикой характеристики таких структур является определение их параметров без использования микроскопии, только на основе спектров пропускания или отражения образца.

Работа посвящена определению толщин и эффективных показателей преломления слоёв синтезированного фотонного кристалла с цилиндрическими порами [2], которые могут быть заполнены жидкостями. Метод базируется на использовании приближения эффективной среды для нахождения диэлектрической проницаемости оптических слоёв и использовании закона Брегга для нахождения их толщин. С помощью моделирования на основе полученных значений рассчитано пропускание в зависимости от длины волны падающего света, произведено сравнение с измеренными спектрами.

[1] Shang G., Bi D., Gorelik V.S., Fei G., Zhang L., *Mat. Today. Comm.*, **34**, 105052, (2023).

[2] Пятнов М.В., Волкова И.Р., Бузин Д.С., Ветров С.Я., Волочаев М.Н., Рыжков И.И., Тимофеев И.В., *Письма в ЖЭТФ*, **121**, 184-188, (2025).

СТРУКТУРНЫЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА

КЕРАМИКИ $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{:Mn}$

Валиев Д.Т.¹, Шарафеев Ш.М.¹, Степанов С.А.¹, Шеховцов В.В.²

¹Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия
rubinf@tpu.ru

Целью настоящей работы является получение с использованием метода электродугового плазменного плавления керамики на основе алюмомагниевого шпинели, активированной переменной концентрацией ионов марганца. Люминесцентная и структурная характеристика керамических материалов.

Ключевые слова: алюмомагневый шпинель, ионы марганца, люминесцентные свойства.

Алюмомагневый шпинель (MgAl_2O_4) является широко распространенным материалом, который выступает в качестве матрицы в различных оптических, лазерных и фотонных приложениях [1]. Значительный практический интерес представляют материалы, легированные ионами переходных металлов из-за возможности направленно регулировать спектральные характеристики материалов за счет варьирования вида и концентрации допантов [2]. В частности, большое количество исследований посвящено разработкам керамики на основе $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{:Mn}$, поскольку данный класс материалов является перспективным для применения в качестве детекторов рентгеновского излучения, оптических элементов приборов ночного видения, флуоресцентных термометров и дисплеев [3].

В MgAl_2O_4 ионы марганца могут иметь заряд Mn^{2+} и Mn^{4+} , которые ассоциируются с зеленым и красным излучением, соответственно. Особенностью керамики $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{:Mn}^{2+}$ является их способность к эффективной люминесценции и фосфоресценции, которая может возбуждаться многими распространенными методами, в т.ч. УФ, рентгеновским и электронно-пучковым излучением.

Оптические, люминесцентные и физико-механические свойства материалов на основе шпинели, в частности $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{:Mn}^{2+}$ являются в значительной степени структурно зависимыми. Вследствие этого в настоящее время активно исследуются различные способы получения шпинели с марганцем методами горения, термобарического синтеза и твердофазного синтеза. Применение данных методов сопряжено либо с использованием дорогостоящих реактивов и сложного оборудования, либо с технологическими сложностями, связанными с созданием восстановительной среды при обжиге для стабилизации Mn^{2+} .

Перспективным способом синтеза керамики на основе MgAl_2O_4 является метод электродугового плазменного плавления. Данный метод позволяет за короткое время синтезировать шпинель из MgO и Al_2O_3 за счет быстрого плавления и протекания реакции в среде расплава. Данный подход характеризуется простотой технологических операций и оборудования и показал хорошие результаты при синтезе $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{:Tb}^{3+}$ и $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{:Cr}^{3+}$ люминесцентных керамики [4].

Исследование процессов метода электродугового плазменного плавления в приложении синтеза марганца активированной MgAl_2O_4 керамики представляет практический интерес, поскольку позволяет значительно сократить временные затраты на получение материала, а также потенциально обеспечивает стабилизацию Mn^{2+} в материале за счет образования слабой восстановительной атмосферы.

Целью настоящей работы являлось подробное исследование люминесцентных и структурных свойств алюмомагниевого шпинели, активированной переменной концентрацией марганца, полученной методом электродугового плазменного плавления, а также системное изучение зависимости оптических свойств керамики от технологических параметров их синтеза.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Проект №25-29-00590).

[1] Ganesh I., *Int. Mater. Rev.*, **58**, 63-112, (2013).

[2] Izumi K., Miyazaki S., Yoshida S., Mizokawa T., Hanamura E., *Phys. Rev. B*, **76**, 075111, (2007).

[3] Katsumata T., Takeuchi H., Komuro S., Aizawa H., *Rev. Sci. Instrum.*, **89**, 095104, (2018).

[4] Valiev D., Shekhovtsov V., Sharafiev Sh., Stepanov S., *Ceram. Int.*, **51**, 21546-21553, (2025).

ОСОБЕННОСТИ ДИФфуЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ МЕДЬЮ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ

Анисимов Р.И., Колмаков А.А., Комов Э.,
Кистенёва М.Г., Акрестина А.С., Шандаров С.М.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, Россия
roman.anisimov.00@mail.ru

Представлены результаты исследования распределения концентрации ионов Cu^+ и Cu^{2+} после легирования конгруэнтного образца ниобата лития X-среза методом термической диффузии из медной плёнки, нанесённой на X-грань, в атмосфере аргона при температуре 750°C в течение 12 часов.

Ключевые слова: ниобат лития, термическое легирование, концентрация примеси.

Использование фоторефрактивных примесей позволяет генерировать в кристаллах ниобата лития сильные электрические поля благодаря фотоиндуцированному перераспределению зарядов между дефектными центрами. Эти поля являются, в частности, основой для реализации технологии фотовольтаического пинцета [1]. Методом термической диффузии из медных плёнок могут быть созданы образцы с высокой концентрацией донорных (Cu^+) и акцепторных (Cu^{2+}) центров вблизи их границ, на которых и реализуется захват управляемых микро- и нанобъектов [2].

В настоящем сообщении использована описанная в работе [2] методика термодиффузии в образцы ниобата лития X-среза конгруэнтного состава, изготовленные в АО «Фомос-Материалы». В развитие данной методики медная плёнка наносилась только на одну из X-граней образца магнетронным распылением, а температура диффузии, при скорости нагрева 11 К/мин , была увеличена до 750°C .

Исследование распределений концентраций ионов меди $C_{\text{Cu}^+}(x)$ и $C_{\text{Cu}^{2+}}(x)$ в полученной структуре $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ проводилось измерением оптического пропускания на длинах волн 532 и 808 нм при зондировании распространяющимися вдоль оси Y кристалла сфокусированными лазерными пучками, что позволило провести расчёты зависимостей показателей поглощения $k_{532}(x)$ и $k_{808}(x)$, линейно связанных с соответствующими концентрациями [2]:

$$C_{\text{Cu}^+}(x) = 4,72 \times 10^{21} [\text{м}^{-2}] \times k_{532}(x), \quad (1)$$

$$C_{\text{Cu}^{2+}}(x) = 1,56 \times 10^{23} [\text{м}^{-2}] \times k_{808}(x). \quad (2)$$

Результаты расчётов из экспериментальных данных представлены на рисунке точками, а полученные подгонкой аппроксимирующие зависимости – сплошными кривыми.

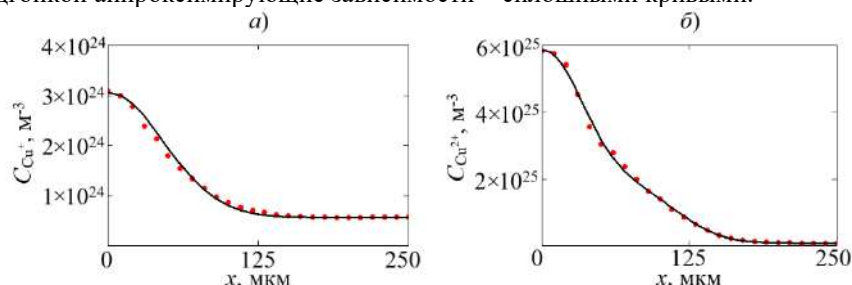


Рисунок. Распределения концентраций ионов меди $C_{\text{Cu}^+}(x)$ (а) и $C_{\text{Cu}^{2+}}(x)$ (б) в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза: точками обозначены экспериментальные результаты, сплошной линией – аппроксимация

Для аппроксимации распределений концентраций $C_{\text{Cu}^+}(x)$ и $C_{\text{Cu}^{2+}}(x)$ вблизи границы $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ использованы функции Гаусса, а соответствующие выражения могут быть записаны как

$$C_{\text{Cu}^+}(x) = C_{\text{Cu}^+}^m \exp \left[-\frac{(x-x_1^+)^2}{(\Delta x_1^+)^2} \right] + C_{\text{Cu}^+}^0, \quad (3)$$

$$C_{\text{Cu}^{2+}}(x) = C_{\text{Cu}^{2+}}^{m1} \exp \left[-\frac{(x-x_1^{2+})^2}{(\Delta x_1^{2+})^2} \right] + C_{\text{Cu}^{2+}}^{m2} \exp \left[-\frac{(x-x_2^{2+})^2}{(\Delta x_2^{2+})^2} \right] + C_{\text{Cu}^{2+}}^0, \quad (4)$$

с максимальными значениями $C_{\text{Cu}^+}^m = 2,5 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $C_{\text{Cu}^{2+}}^{m1} = 5,68 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$ и $C_{\text{Cu}^{2+}}^{m2} = 1,29 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$; пространственными параметрами $x_1^+ = 0 \text{ мкм}$, $\Delta x_1^+ = 65 \text{ мкм}$, $x_1^{2+} = 0 \text{ мкм}$, $x_2^{2+} = 84,2 \text{ мкм}$, $\Delta x_1^{2+} = 52,4 \text{ мкм}$ и $\Delta x_2^{2+} = 50 \text{ мкм}$; постоянными составляющими $C_{\text{Cu}^+}^0 = 0,56 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и $C_{\text{Cu}^{2+}}^0 = 0,08 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023–2025 гг. (задание FEWM-2023-0012).

[1] Мамбетова К.М., Шандаров С.М., Татьянников А.И., Смирнов С.В., *Известия вузов. Физика*, **62**, №4, 89-93, (2019).

[2] Колмаков А.А., Анисимов Р.И., Комов Э., Шандаров С.М., Буримов Н.И., *Оптич. журнал*, **92**, №7, 26-34, (2025).

СВОЙСТВА ПЛАЗМОНОВ С ПЕРЕНОСОМ ЗАРЯДА НА ГРАФЕНЕ

Еремкин Е.В.^{1,2}, Фёдоров А.С.^{1,2}

¹Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

²МНИЦ спектроскопии и квантовой химии СФУ, г. Красноярск, Россия

eremkin.e.v@yandex.ru

Плазмоны с переносом заряда в комплексах наночастиц на графене исследованы гибридной квантово-классической моделью, показавшей их резонансы в терагерцовом диапазоне для перспективных терагерцовых миниатюрных наноустройств.

Ключевые слова: плазмоны с переносом заряда, наночастицы, графен.

Разработана общая теория плазмонов с переносом заряда в системах «металлические наночастицы – графен», где поверхность графена выполняет роль проводящего материала. Модель учитывает кинетическую энергию носителей в графене, кулоновское взаимодействие заряженных частиц и рассеяние энергии; на её основе получены линейные уравнения, определяющие собственные частоты плазмонных колебаний и пространственное распределение зарядов.

При исследовании различных наноструктур показана зависимость резонансных частот плазмонов от концентрации носителей в графене (рисунок (а)) и геометрии комплекса [1]. Кроме того, для периодических [2] массивов наночастиц на графене была рассчитана зонная структура $\omega(k,n)$ с двумя типами ветвей: акустическими (низкие частоты при малых k) и слабо дисперсионными оптическими, аналогичными фононным модам в кристаллах (рисунок (б)).

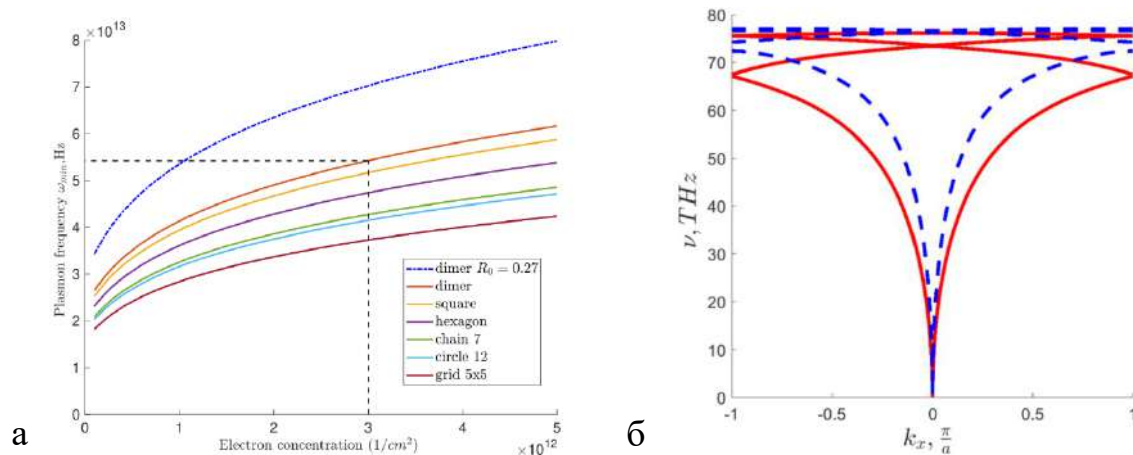


Рисунок. (а) Зависимость минимальных частот плазмонов с переносом заряда $\nu_{\min}$ от концентрации электронов ρ в графене для различных систем. Черная пунктирная линия соответствует параметрам, используемым в расчетах методом конечных элементов; (б) - Зонная структура $\nu(k)$ вдоль k_x для двух структур наночастиц на графене. Красная линия - цепочка из четырех наночастиц; синяя линия - четырех наночастиц в квадратной элементарной ячейке

Результаты показывают, что предлагаемые системы на основе наночастиц лежащих на слое графена могут быть перспективны для современных, быстро развивающихся терагерцовых технологий [3, 4] — сверхбыстрых переключателей, сенсоров и фотонных компонентов для связи нового поколения. Использование наночастиц малых размеров обеспечивает масштабирование и функциональность, недостижимые в чистом графене или графеновых нановолокнах.

Исследование поддержано Российским научным фондом, Соглашение № 23-12-20007, а также Правительством Красноярского края и Красноярским краевым фондом поддержки научной и научно-технической деятельности, Соглашение № 256.

[1] Fedorov A.S. et al., *The Journal of Chemical Physics*, **160**, №4, (2024).

[2] Fedorov A.S., et al., *Journal of Applied Physics*, **136**, №4, (2024).

[3] Tonouchi M., *Nature photonics*, **1**, №2, 97-105, (2007).

[4] Yang X. et al., *Trends in biotechnology*, **34**, №10, 810-824, (2016).

**СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ
С НАНОКРИСТАЛЛАМИ ПЕРОВСКИТА CsPbX_3 ($\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$)**

Колобкова Е.В.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(Технический Университет), Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

kolobok106@rambler.ru

В работе рассмотрено влияние катионного и анионного замещения в нанокристаллах галогидных перовскитов CsPbX_3 , сформированных в стекле в процессе кристаллизации, на их спектрально-люминесцентные свойства. Показано влияние состава стекла на рост нанокристаллов.

Ключевые слова: перовскит, стекло, люминесценция.

Нанокристаллы (НК) перовскита, сформированные методами коллоидной химии, являются одним из самых приоритетных направлений современного оптического материаловедения. НК CsPbX_3 обладают высоким квантовым выходом фотолюминесценции (PL QY, до 90%), узким спектром излучения, регулируемым анионным и катионным замещением, а также размерным квантовым эффектом [1, 2]. Они являются перспективными материалами для создания солнечных батарей, лазеров, светодиодов, сцинтилляторов, спинтроники и широкого круга других направлений. Однако, коллоидных НК имеют низкую химическую устойчивость и для успешной работы требуют создания защитной оболочки. Одним из вариантов стабилизации свойств НК является их рост в стекле в результате процесса кристаллизации. Процесс формирования НК в стеклах принципиально отличается от коллоидного синтеза, что приводит к ограничению возможностей модификации НК. На сегодняшний день обнаружен ограниченный круг стеклообразных систем, в которых можно сформировать НК CsPbX_3 (борогерманатная, боросиликатная, боратная, силикофосфатная и фторофосфатная) при сохранении оптического качества материала [3]. Влияние анионного и катионного замещения в структуре НК CsPbX_3 для изменения спектральных характеристик нанокристаллов перовскитов стало предметом многочисленных исследований.

В нашем исследовании рассмотрено влияние, анионного ($\text{Cl} \leftrightarrow \text{Br} \leftrightarrow \text{I}$) и катионного ($\text{Pb} \leftrightarrow \text{Cd} \text{—} \text{Ni} \text{—} \text{Cu}$) замещения спектрально-люминесцентные характеристики сформированы НК фторофосфатных стекол, излучающие в сине-зеленой области спектра (450-530 нм). Показано влияние состава НК и размера на энергию запрещенной зоны и люминесценцию. Обнаружена зависимость квантового выхода НК от состава и размера и дано объяснение наблюдаемым изменениям на основании модели зонной структуры. Показано, что квантовый выход люминесценции уменьшается из-за образования глубоких ловушечных состояний, которые при криогенных температурах проявляются в виде полосы люминесценции в диапазоне энергий 1,6-2,5 эВ. Предложена простая модель, объясняющая характер люминесценции в зависимости от температуры в диапазоне от 30 до 300 К. Рассматривается упрощенная энергетическая структура НК, состоящая из начального (вакуумного) состояния, «яркого (или свободного) экситонного состояния» и темного (или локализованного) экситонного состояния, а также широкой полосы захваченных состояний (акцепторов).

Рассмотрены особенности роста НК в боратной и фторофосфатной матрице. Проведено сравнение спектрально-люминесцентных характеристик нанокристаллов CsPbX_3 ($\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) в боратном и фторофосфатном стекле. Представлен анализ недостатков и преимуществ НК в стеклах по сравнению с коллоидными НК.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-43-20020).

[1] Akkerman Q.A., D'Innocenzo V., Accornero S., Scarpellini A., Petrozza A., Prato M., Manna L., *J. Am. Chem. Soc.*, **137**, 10276-10281, (2015).

[2] Protesescu L., Yakunin S., Bodnarchuk M.I., Krieg F., Caputo R., Hendon C.H., Yang R. X., Walsh A., Kovalenko M.V., *Nano Lett*, **15**, 3692-3696, (2015).

[3] Kolobkova E.V., Kuznetsova M.S., Nikonorov N.V., *J. of Non-Cryst. Solids*, **563**, 120811, (2021).

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМОН-ЭКСИТОННЫХ СТРУКТУР СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ХАЛЬКОГЕНИДОВ МЕТАЛЛОВ

Гревцева И.Г., Овчинников О.В., Смирнов М.С., Кондратенко Т.С., Дерепко В.Н.

Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

grevtseva_ig@inbox.ru

Продemonстрирована возможность управления люминесцентными свойствами квантовых точек (КТ) халькогенидов металлов в плазмон-экситонных наноструктурах сложной геометрии. Наблюдаемые эмпирические закономерности обусловлены участием в эффектах плазмон-экситонного взаимодействия мелких локализованных состояний структурно-примесных дефектов КТ, а также фотоиндуцированного переноса заряда.

Ключевые слова: квантовая точка, металлическая наночастица, плазмон-экситонное взаимодействие.

В последнее время разработка ИК-люминесцирующих плазмон-экситонных наноструктур направлена на развитие технологий термооптической сенсорики, систем фототермического катализа, тепловых метаповерхностей для вычислительных систем, систем модуляции для хранения и записи оптической информации, тепловых систем маскировки излучения и т.д. [1, 2]. Ключевой задачей в рамках данного направления является управление спектрально-люминесцентными свойствами излучателей, находящихся в непосредственном контакте с металлическими наночастицами (НЧ) [1-4].

В рамках данной работы исследованы эффекты влияния металлических НЧ Au на люминесцентные свойства квантовых точек (КТ) халькогенидов металлов (на примере КТ Ag_2S и PbS) в конструкции ядро/оболочка (КТ/ SiO_2 /НЧ Au и НЧ SiO_2 /Au/КТ) (рисунок (а)).

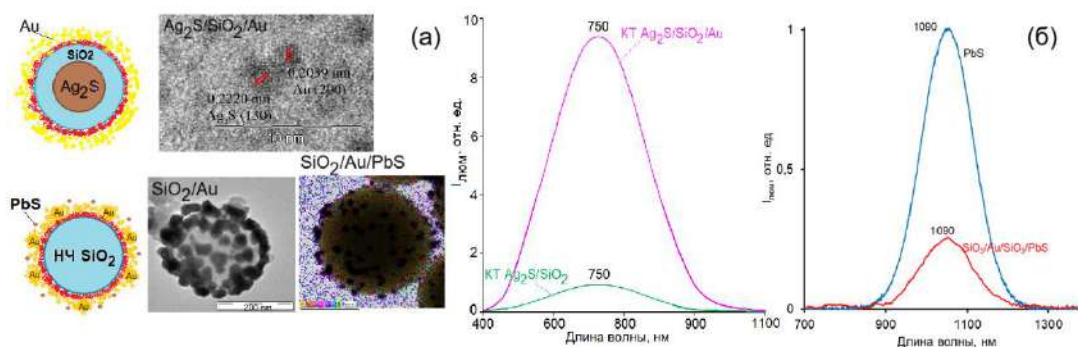


Рисунок. Структурные (а) и спектрально-люминесцентные (б) свойства плазмон-экситонных структур КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ и НЧ $\text{SiO}_2/\text{Au}/\text{SiO}_2/\text{PbS}$

Экспериментально установлено изменение глубины (на 0.08 эВ) локализованных состояний структурно-примесных дефектов КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ в присутствии сферических НЧ Au. В связи с этим, наблюдаемое 10-ти кратное увеличение квантового выхода люминесценции КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ и 60-ти кратное увеличение времени ее затухания в ближнем поле металлических НЧ Au может быть обусловлено изменением энергии активации мелких ловушек, высвобождение носителей заряда с которых под действием ближнего поля НЧ Au приводит к увеличению среднего времени жизни люминесценции КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ (рисунок (б)). Формирование подобного рода структур на основе КТ PbS приводит к потере их люминесцентных свойств. При формировании структур НЧ $\text{SiO}_2/\text{Au}/\text{KT PbS}$ сохранение люминесцентных свойств КТ PbS достигается при формировании дополнительного слоя SiO_2 между НЧ Au и КТ PbS (НЧ $\text{SiO}_2/\text{Au}/\text{SiO}_2/\text{PbS}$). Такие экспериментальные закономерности указывают в пользу эффективного фотоиндуцированного переноса носителей заряда между НЧ Au и КТ PbS , который блокируется в присутствии диэлектрического слоя (рисунок (б)).

[1] Лебедев В.С., Кондорский А.Д., *Успехи физических наук*, **195**(1), 50-93, (2025).

[2] Поволоцкий А.В., Смирнова О.С., Солдатова Д.А., Лукьянов Д.А., *Известия РАН. Серия физическая*, **87**(11), 1631-1636, (2023).

[3] Grevtseva I.G., Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S., Perepelitsa A.S., et. al., *Optics Express*, **30**(4), 4668-4679, (2022).

[4] Grevtseva I.G., Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S., Turishchev S.Y., et. al., *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.*, **86**(6), 692-695, (2022).

ФОТОУПРАВЛЯЕМАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРЫ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Долганов П.В.¹, Максимов Е.А.¹, Долганов В.К.¹, Баленко Н.В.²

¹Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна Российской академии наук, г. Черноголовка, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

pauldol@issp.ac.ru

Приготовлены фотонные кристаллы на основе хиральных нематиков, структуру и спектральные характеристики которых можно перестраивать с помощью освещения. Обсуждаются индуцированные освещением переходы между различными фазами, сопровождающиеся изменением положения фотонных зон.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, хиральность, фотоуправляемые фотонные кристаллы.

Фотонные кристаллы с перестраиваемыми характеристиками представляют существенный интерес для современных приложений. Перспективным направлением исследований является создание таких фотонных структур на основе фоточувствительных хиральных жидких кристаллов. В холестерических (хиральных нематических) жидких кристаллах хиральность молекул индуцирует образование одномерного геликоидального упорядочения. Уникальными жидкокристаллическими трехмерными фотонными кристаллами с кубической структурой являются Голубые фазы или кристаллические жидкости. Причина их образования – геометрическая фрустрация. Голубые фазы могут рассматриваться как трехмерные упорядоченные структуры скирмионов [1]. Жидкокристаллические структуры с многоуровневым упорядочением также образуются из конфокальных доменов [2].

Для получения светуправляемых фотонных кристаллов нами приготовлены смеси на основе нехирального нематического жидкого кристалла, хирального вещества и фоточувствительного хирального допанта [3, 4]. В исследованных смесях, кроме холестерической структуры, образуется Голубая фаза ВРІ с объёмно-центрированной кубической структурой и Голубая фаза ВРІІ с простой кубической структурой. Образцы фотонных кристаллов изучались в плоских оптических ячейках. Проводились измерения спектров пропускания и отражения, исследования с использованием поляризованной оптической микроскопии.

При воздействии светом ультрафиолетового диапазона (365 нм) фоточувствительные молекулы испытывают Е-Z конфигурационный переход, в результате чего уменьшается их закручивающая способность и увеличиваются параметры ячейки жидкокристаллических фаз. Изменение периода структуры приводит к смещению спектрального положения фотонных зон (рисунок). Освещение светом видимого диапазона (455 нм) приводит к обратному переходу.

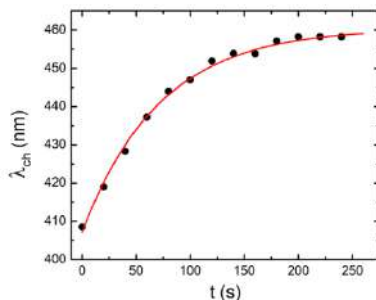


Рисунок. Зависимость спектрального положения фотонной зоны холестерика от времени освещения (длина волны 365 нм, мощность 0.8 мВт/см²). Толщина образца 9 мкм

Помимо непрерывного смещения спектрального положения фотонных зон, происходят переходы между различными жидкокристаллическими фазами, сопровождающиеся скачкообразным изменением фотонных характеристик. Проведенные исследования позволили построить для полученных фотонных кристаллов фазовые диаграммы температура – освещение. Нетривиальная геометрия фазовой диаграммы приводит к возможности реализации возвратных переходов между жидкокристаллической и изотропной фазами.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИФТТ РАН и Государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

[1] Selinger J.V., *Introduction to Topological Defects and Solitons in Liquid Crystals, Magnets, and Related Materials*, Springer Nature Switzerland, (2024).

[2] Dolganov P.V., Baklanova K.D., Dolganov V.K., *Phys. Rev. E*, **106**, 014703, (2022).

[3] Bobrovsky A., Ryabchun A., Cigl M., Hamplová V., Kašpar M., Hampl F., Shibaev V., *J. Mater. Chem.*, **2**, 8622, (2014).

[4] Balenko N.V., Bobrovsky A.Yu., Dolganov P.V., *Liq. Cryst.*, **51**, 471-477, (2024).

**ДНК-ОРИГАМИ ДЛЯ НАНОФОТОНИКИ:
МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОМ АСМ**

**Аржанов А.И.^{1,2}, Степанов М.Е.¹, Егорова Т.В.¹, Магарян К.А.¹,
Акасов Р.А.¹, Хайдуков Е.В.², Наумов А.В.^{1,2}**

¹Московский педагогический государственный университет (МПГУ), Москва, Россия

²Троицкое обособленное подразделение ФИАН им. П.Н. Лебедева, Троицк, Москва, Россия
ai.arzhanov@mpgu.su

Современные задачи оптоэлектроники и биофотоники требуют создания и точной характеристики наноструктур с контролируемой морфологией и функцией. Одной из таких универсальных технологий является метод ДНК-оригами, позволяющий синтезировать структуры с нанометровой точностью. В данной работе представлены результаты синтеза и атомно-силовой микроскопии (АСМ) двумерных апертурных ДНК-оригами (размер плитки $\sim 61 \times 52$ нм с апертурой $\sim 15 \times 9$ нм).

Ключевые слова : ДНК-оригами, атомно-силовая микроскопия, деконволюция.

Метод ДНК-оригами позволяет создавать наноструктуры с высокой точностью позиционирования и геометрии, что открывает широкие перспективы для приложений в нанофотонике и сенсорике [1, 2]. Такие структуры используются в задачах создания оптических антенн, гибридных нанокомпозитов и метаматериалов [3]. Ключевым этапом для дальнейшего использования ДНК-оригами платформ является их надёжная морфологическая характеристика.

Для анализа структуры ДНК-оригами применяются различные методы: электронная микроскопия, флуоресцентная наноскопия, атомно-силовая микроскопия (АСМ). Среди них АСМ обеспечивает прямую визуализацию морфологии с высоким пространственным разрешением [4], но требует учёта инструментальных искажений. В данной работе проведён морфологический анализ плоских апертурных ДНК-оригами плиток ($\sim 61 \times 52$ нм, апертюра $\sim 15 \times 9$ нм), синтезированных с использованием коммерческих наборов (Tilibit Nanosystems), методом АСМ с последующей 2D-деконволюцией.

Изображения (рисунок) получены в режиме Constant Force Tapping; для повышения точности применена деконволюция с учётом аппаратной функции зонда. Это позволило скорректировать искажения, связанные с радиусом кривизны зонда (~ 10 нм), и получить достоверные профили структур. Показана высокая стабильность и воспроизводимость морфологии. Метод АСМ с деконволюцией демонстрирует высокую эффективность для точной характеристики ДНК-оригами в задачах нанофотоники.

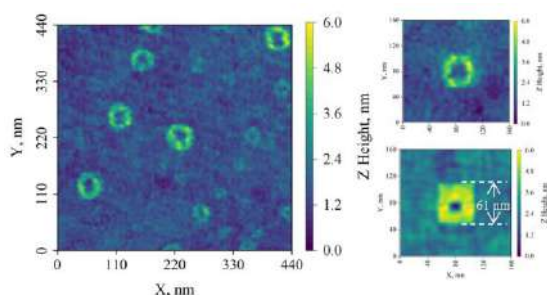


Рисунок. АСМ-изображение апертурных ДНК-оригами структур: общий скан области 440×440 нм (слева), фрагмент с одиночной ДНК-оригами (справа сверху), восстановленный профиль структуры после 2D-деконволюции (справа внизу)

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства просвещения Российской Федерации «Физика наноструктурированных материалов и высокочувствительная сенсорика: синтез, фундаментальные исследования и приложения в фотонике, науках о жизни, квантовых и нанотехнологиях» (тема № 124031100005-5).

[1] Stepanov M.E., Khokhryakova U.A., Egorova T.V., Magaryan K.A., Naumov A.V., *PHOTONICS Russia*, **18**, №2, 166-174, (2024).

[2] Stepanov M.E., Khokhryakova U.A., Egorova T.V., Magaryan K.A., Naumov A.V., *PHOTONICS Russia*, **18**, №5, 398-405, (2024).

[3] Kuzyk A., Jungmann R., Acuna G.P., Liu N., *ACS Photonics*, **5**, №4, 1151-1163, (2018).

[4] Kolbeck P.J. et al., *Nano Letters*, **23**, №4, 1236-1243, (2023).

БРЭГГОВСКАЯ ДИФРАКЦИЯ ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ НА РЕГУЛЯРНЫХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУРАХ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ
**Шандаров С.М.¹, Савченков Е.Н.¹, Бельская Д.Е.¹, Дубиков А.В.¹, Буримов Н.И.¹,
Ахматханов А.Р.², Чувакова М.А.², Шур В.Я.²**

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, Россия

²Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия
stanislavshandarov@gmail.com

Представлены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований линейной дифракции Брэгга для зондирующих гауссовых пучков на регулярных доменных структурах, сформированных методом электрической переполаризации в кристаллах ниобата лития, танталата лития и титанил-фосфата калия.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические кристаллы, доменные структуры, дифракция Брэгга.

Регулярные доменные структуры (РДС) в сегнетоэлектрических кристаллах широко используются для спектральных, пространственных и временных преобразований характеристик лазерного излучения [1]. Для неразрушающего контроля их качества, определения параметров и исследования новых физических явлений эффективно используется линейная дифракция света на создаваемых доменными стенками РДС возмущениях оптических свойств кристаллов, в которых они сформированы [2-8].

В настоящем сообщении рассмотрена модель возмущений диэлектрического тензора кристаллов LiNbO_3 , LiTaO_3 и KTiOPO_4 , создаваемых 180-градусными доменными стенками РДС и обусловленные как спонтанным квадратичным электрооптическим эффектом, так и упругими деформациями, связанными с электрострикционным и флексоэлектрическим вкладами. Показано, что в этих кристаллах на РДС может быть реализована изотропная и анизотропная дифракция Брэгга и выделены материальные параметры, определяющие ее эффективность. Получены соотношения, описывающие вклад в различные пространственные гармоники возмущений диэлектрического тензора, создаваемых РДС с конечной толщиной доменных стенок, которые могут быть ненаклонными и наклонными к полярной оси, а также искривленными. Для РДС с ненаклонными доменными стенками рассмотрены уравнения связанных мод, позволившие провести анализ вырожденной дифракции Брэгга, экспериментально наблюдаемой в кристалле $1\%\text{MgO}:\text{LiTaO}_3$. С использованием Фурье-разложения по пространственным гармоникам световых полей зондирующего эллиптического гауссова пучка и пучка, дифрагированного на m -й пространственной гармонике оптических возмущений, получены соотношения, позволяющие описать в приближении слабой связи эффективность данного дифракционного процесса для случая РДС с симметрично искривленными доменными стенками.

Полученные теоретические и расчетные данные использованы для описания результатов экспериментальных исследований дифракции Брэгга на РДС в кристаллах $5\%\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ и $1\%\text{MgO}:\text{LiTaO}_3$ для гауссовых зондирующих пучков с круговым и эллиптическим поперечным сечением, в температурном диапазоне от 30 до 110 °С. Из их сравнения проведены оценки для компонент тензора флексоэлектрической связи кристалла $1\%\text{MgO}:\text{LiTaO}_3$, определена возможная форма симметрично искривленных стенок в кристалле $5\%\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ и отмечено различие во вкладе в оптические возмущения для двух стенок, расположенных в пределах одного периода РДС.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023–2025 гг. (задание FEWM-2023-0012).

- [1] Ferraro P., Grilli S., De Natale P. (Eds.), *Ferroelectric Crystals for Photonic Applications*, Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, (2014).
- [2] Александровский А.Л., Наумова И.И., Прялкин В.И., *Квант. электрон.*, **23**, №7, 657-659, (1996).
- [3] Shandarov S.M., Mandel A. E., Smirnov S.V. et al., *Ferroelectrics*, **496**, №1, 134-142, (2016).
- [4] Shandarov S.M., Mandel A.E., Akylbaev T.M. et al., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **867**, №1, 012017, (2017).
- [5] Савченков Е.Н., Шандаров С.М., Смирнов С.В. и др., *Письма в ЖЭТФ*, **110**, №3, 165-169, (2019).
- [6] Савченков Е.Н., Дубиков А.В., Шараева А.Е. и др., *Письма в ЖЭТФ*, **112**, №10, 644-649, (2020).
- [7] Savchenkov E.N., Dubikov A.V., Kuzmich D.E. et al., *Opt. Materials*, **122**, 111813, (2021).
- [8] Savchenkov E.N., Dubikov A.V., Belskaya D.E. et al., *Bull. Rus. Acad. Sci.: Phys.* **88**, Suppl 3, S413, (2024).

МЕХАНИЗМ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ БИНАРНЫХ АССОЦИАТОВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag_2S И PbS

Возгорькова Е.А., Овчинников О.В., Смирнов М.С.

Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

kosya-kate@yandex.ru

Разгорание люминесценции бинарной смеси коллоидных квантовых точек $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$ / $\text{PbS}_{2\text{MPA}}$ в области, характерной для $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$, и тушение в области, соотносимой с $\text{PbS}_{2\text{MPA}}$, объяснены фотостимулированным переносом горячих носителей заряда от PbS к Ag_2S .

Ключевые слова: квантовая точка, фотолюминесценция, фотоперенос заряда.

На основе разного рода ассоциатов с участием квантовых точек (КТ) возможно создание фотонных устройств – фотодетекторов, люминесцентных сенсоров, биомаркеров, устройств солнечной энергетики и т.д. Принцип работы подобных устройств базируется на процессах переноса электронного возбуждения между компонентами ассоциата за счет резонансного обмена энергией или фотопереноса носителей заряда. При этом возможность управления оптическими свойствами КТ за счет квантово-размерного эффекта делает их перспективными для описанных выше устройств.

Бинарные ассоциаты получали смешиванием водных коллоидных растворов КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$ и $\text{PbS}_{2\text{MPA}}$, синтез которых осуществлен по стандартной методике. Основная обнаруженная экспериментальная закономерность в люминесценции – разгорание свечения в полосе КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$ при 900 нм и тушение в полосе КТ $\text{PbS}_{2\text{MPA}}$ при 1100 нм (рисунок а). При этом наиболее ярко эффект проявляется для бинарных растворов, соотношение числа КТ $[n(\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}):n(\text{PbS}_{2\text{MPA}})]$ в которых составляет [1:3]. С увеличением концентрации $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$ в смеси наблюдается ускорение кинетики затухания люминесценции КТ $\text{PbS}_{2\text{MPA}}$ в полосе 1100 нм, что также свидетельствует в пользу сборки бинарных ассоциатов КТ.

Наблюдаемые спектральные закономерности не удается объяснить в рамках резонансного безызлучательного переноса энергии между КТ. Спектр поглощения КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$ практически не перекрывается со спектром излучения КТ $\text{PbS}_{2\text{MPA}}$. Нами была установлена пороговая энергия возбуждающего излучения, ниже которой каждая из компонентов КТ, входящая в ассоциат, люминесцирует согласно своему собственному спектру, а характерного разгорания не происходит. На основании анализа комплекса экспериментальных данных, а также имеющихся в литературе сведений о положении уровней размерного квантования для КТ Ag_2S [1] и PbS [2], была предложена модель, показанная на энергетической схеме (рисунок б).

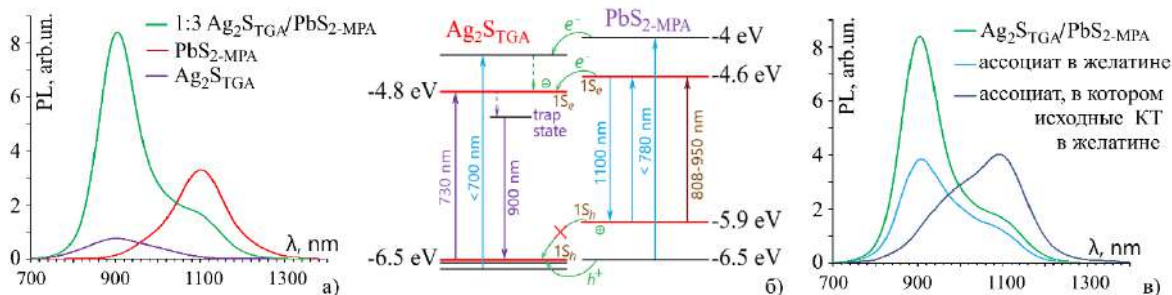


Рисунок. Спектры люминесценции коллоидных КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$, $\text{PbS}_{2\text{MPA}}$ и их смесей в различном соотношении (а); энергетическая схема взаимного расположения уровней энергии КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$ и $\text{PbS}_{2\text{MPA}}$ (б); влияние добавления раствора желатины на спектры люминесценции ассоциата $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$ / $\text{PbS}_{2\text{MPA}}$ (в)

Согласно этой модели, возникновение люминесценции в бинарных ассоциатах КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$ / $\text{PbS}_{2\text{MPA}}$ происходит за счет фотостимулированного переноса горячих носителей заряда от возбужденных КТ $\text{PbS}_{2\text{MPA}}$ к КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$ с последующим высвечиванием в КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$. В пользу справедливости данной гипотезы свидетельствует исчезновение характерной для бинарной смеси КТ спектральной картины в люминесценции, и проявление полос исходных компонентов с максимумами при 900 нм и 1100 нм в случае увеличения вязкости коллоидных растворов отдельных КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$ и $\text{PbS}_{2\text{MPA}}$ за счет добавления раствора инертной фотографической желатины (рисунок в). Повышение вязкости растворов исходных КТ, используемых бинарных ассоциатов, приводит к затруднению связывания компонентов и блокировке транспорта зарядов между ними.

[1] Yang J., Ying J.Y., *Angewandte Chemie International Edition*, **50**(20), 4637-4643, (2011).

[2] Yeon D.H., *J. Mater. Chem. A.*, **2**(47), 20112-20117, (2014).

**СИНТЕЗ И ПРИМЕНЕНИЕ СОПОЛИФЛУОРЕНОВ
В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ И ХЕМОСЕНСОРИКЕ**

**Чулкова Т.Г.¹, Якиманский А.А.¹, Ильина К.И.¹, Митрошин А.М.^{1,2}, Жукова Е.В.¹,
Милицев С.А.¹, Жданов А.П.³, Лыпенко Д.А.⁴, Тамеев А.Р.⁴, Якиманский А.В.¹**

¹Филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИВС, Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

³ИОНХ им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

⁴ИФХЭ РАН, Москва, Россия

t.chulkova@hq.macro.ru

Предложен новый подход к синтезу сополифлуоренов методом поликонденсации Сузуки с использованием в качестве катализатора диаминокарбеновых комплексов палладия(II). Синтезированы сополифлуорены, обладающие высокой эффективностью электролюминесценции. Изучена возможность их использования в хемосенсорике.

Ключевые слова: сополифлуорены, оптоэлектроника, хемосенсорика.

Сополифлуорены широко изучаются как материалы для светоизлучающего слоя светодиодов [1-3]. Благодаря включению в состав сополимера различных люминофоров можно варьировать в широких пределах цветность люминесценции и добиваться высоких яркостей электролюминесценции.

Нами предложен новый подход к синтезу сополифлуоренов с помощью поликонденсации Сузуки с использованием в качестве катализаторов диаминокарбеновых комплексов палладия(II), позволяющий проводить реакцию в присутствии кислорода воздуха в протонных растворителях, либо в двухфазной системе толуол/вода. Синтезированы сополифлуорены, содержащие полиметиновые красители, дицианостильбеновые и дицианофенантреновые фрагменты. Изучены фотофизические и электролюминесцентные характеристики сополимеров, определены подвижности носителей зарядов методом CELIV, а также энергии ВЗМО и НСМО методом ЦВА. Рассмотрена возможность использования полученных сополимеров в качестве материалов для pH-сенсоров и сенсоров на туберкулез.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 23-43-00060).

[1] Yakimanskiy A.A., Mitroshin A.M., Chulkova T.G., Miltsov S.A., Yakimansky A.V., *Mendeleev Commun.*, **34**, 609-629, (2024).

[2] Lypenko D.A., Nosova G.I., Berezin I.A., Tameev A.R., Mal'tsev E.I., *Mendeleev Commun.*, **30**, 165-167, (2020).

[3] Dos Santos J.M. *et al.*, *Chem. Rev.*, **124**, 13736-14110, (2024).

ОПТИЧЕСКИЙ СЕНСОР МЕТАНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Салихов Х.М.¹, Малинин Ю.Г.¹, Буляков Б.Р.^{1,3}, Ахметова Э.М.^{1,3,4},
Шарафетдинов Д.И.^{1,3}, Тагиров Л.Р.¹, Салахов М.Х.¹, Стоянов Н.Д.²,
Молчанов С.С.²

¹ГБНУ Академия наук Республики Татарстан, Институт прикладных исследований,
Казань, Россия

²ООО «ЛЕД Микросенсор НТ», Санкт-Петербург, Россия

³Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, Россия

⁴ООО «НТПИ», Казань, Россия

smolch@mail.ru

Работа посвящена созданию современных и надежных оптических сенсоров метана для точного контроля и мониторинга утечек газов с учетом всех требований высокой чувствительности, быстродействия, пожаробезопасности, низкого энергопотребления и невысокой цены.

Ключевые слова: сенсор, углеводороды, светодиоды.

Метан содержит наименьшее количество углерода в расчете на единицу выделяемой при сжигании энергии, поэтому является наиболее экологически чистым из ископаемых топлив, используемых в быту и в газовой технике. Целью нашей работы является создание современных и надежных оптических сенсоров метана для точного контроля и мониторинга утечек газов с учетом всех требований высокой чувствительности, быстродействия, пожаробезопасности, низкого энергопотребления и невысокой цены.

Газообразный метан поглощает свет в диапазоне среднего ИК излучения в полосе длин волн 3,25-3,40 мкм [1]. В качестве источника излучения с такой длиной волны используются полупроводниковые гетероструктуры на базе твердых растворов в системе InAs-GaSb-InP. Наш партнёр, компания ООО «ЛЕД Микросенсор НТ», производит светодиоды и фотодиоды с длиной волны максимума инфракрасного (ИК) излучения в диапазоне 1.0-5.0 мкм [2]. Основой сенсора метана является оптическая ячейка, состоящая из светодиода и спектрально согласованных с ним двух фотодиодов: опорного и измерительного. Цифровой контроллер сенсора выполнен на интегральной элементной базе высокой плотности и включает в себя блок гармонически-модулированного питания светодиода, блок усиления сигналов опорного и измерительного фотодиодов, аналогово-цифровой преобразователь, блок цифровой фильтрации и обработки сигналов. Прототип сенсора метана в составе оптической ячейки и цифрового контроллера обеспечивает итоговую чувствительность сенсора ≥ 500 ppm в смеси метана с азотом в лабораторных условиях (см. рисунок) [3].

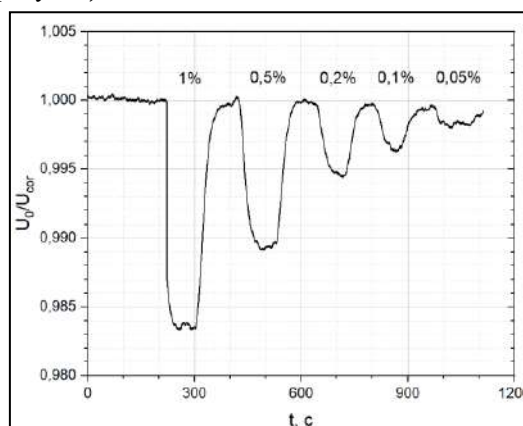


Рисунок. Отклик прототипа сенсора метана на подачу в испытательную ячейку импульсов калиброванных смесей метана в азоте

Концентрация метана в подаваемой смеси указана в объемных процентах над кривой записи выходного сигнала, условия измерений – комнатная температура в климатической камере лаборатории испытаний и калибровки газовых сенсоров ИПИ АН РТ.

[1] Plyler E.K., Tidwell E.D., Blaine L.R., *Journal research of the National bureau of standards -A. Physics and Chemistry*, **64A**, №3, 201-212, (1960).

[2] URL: <https://ru.lmsnt.com/>; <https://lmsnt.com/> (дата обращения 13.03.2025).

[3] Салихов Х.М., Малинин Ю.Г., Буляков Б.Р., Шарафетдинов Д.И., Тагиров Л.Р., Салахов М.Х., Стоянов Н.Д., Молчанов С.С., *Вестник Академии наук Республики Башкортостан*, **54**, №1, 35-41, (2025).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ТОНКИХ ПЛЕНОК
ОКСИДА БОРА НА ВОЗДУХЕ**

Акашев Л.А., Попов Н.А., Шевченко В.Г., Конюкова А.В.

Институт химии твердого тела УрО-РАН, г. Екатеринбург, Россия
shevchenko@ihim.uran.ru

Методами одноволновой и спектральной эллипсометрией исследовано изменение толщины и оптических постоянных плёнок оксида бора, осажденных на подложке из лейкосапфира, ситалла и поликристаллического алюминия, непосредственно в процессе их нагрева на воздухе в интервале температур 24-700°C. В процессе эксперимента установлено, что в исследуемом температурном диапазоне, происходит непрерывное уменьшение толщины плёнки. На наш взгляд, это указывает на наличие фазовых переходов в пленке и процесс дегидратации, снижающий плотность материала и, следовательно, оптические характеристики.

Ключевые слова: эллипсометрия, термическое испарение, оксид бора, испарение, дегидратация.

Исследование процесса изменения толщины и оптических свойств тонких пленок оксида бора представляет собой важную область материаловедения. Непосредственно, после напыления, плёнки оксида бора являлись полностью аморфными. В процессе нагрева в интервале температур 100-150°C толщина плёнки резко уменьшается, что объясняется удалением из неё химически связанной воды. При нагреве плёнки в интервале температур 200-300°C наблюдается уменьшение показателя преломления плёнки, что связано с увеличением её пористости в процессе дегидратации. При температуре выше 300°C процесс уменьшения толщины пленки замедляется, но продолжается вплоть до максимальной температуры 700°C. Это указывает на наличие фазовых переходов в пленке. Наблюдаемое нами дальнейшее постепенное снижение толщины пленки при температуре плавления B_2O_3 (450°C) и выше, до полного ее исчезновения с поверхности подложки, обусловлено испарением борной кислоты, образованной в пленке как до нагрева, так и образующейся непрерывно на поверхности в процессе нагрева. В процессе изучения окисления бора [1] нами показана роль борной кислоты, появление которой вызвано высокой гигроскопичностью его оксида. Методом синхротронного излучения (СИ), с использованием рентгеновского фазового анализа, установлена динамика процессов фазообразования в ходе окисления аморфного бора. Показано, что до 400° H_3BO_3 теряет основную часть воды после перехода в жидкое состояние при 171°C. При этом, при разложении образуются летучие компоненты, а процесс завершается образованием B_2O_3 . Это позволяет объяснить резкое уменьшение толщины пленки B_2O_3 в процессе ее нагрева при исследовании методом эллипсометрии. В настоящее время нами подготовлены образцы пленок, для изучения их поведения при нагреве в газовых средах, с использованием СИ, непосредственно в ходе процесса.

[1] Shevchenko V.G., Eselevich D.A., Krasil'nikov V.N., Konyukova A.V., *Сборник тезисов докладов XVII Международной конференции «Забабахинские научные чтения»*, 211, (2025).

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ И СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ, ИНДУЦИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ МИКРОКРИСТАЛЛОВ И РАДИАЦИОННОЙ НАНОКЕРАМИКИ Ga₂O₃

Полисадова Е.Ф., Карнаухова А.А., Лисицын В.М.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

elp@tpu.ru

Методом время-разрешенной люминесцентной спектроскопии проведен анализ спектров и кинетики затухания свечения образцов Ga₂O₃ при температурах 80 и 300 К. Изучено влияние структурного состояния оксида галлия (микropорошок и нанокерамика) на катодолюминесценцию.

Ключевые слова: оксид галлия, люминесценция, радиационная нанокерамика.

Оксид галлия (Ga₂O₃) с большой шириной запрещенной зоны 4,5~5,3 эВ в последнее время привлекает все больший интерес из-за своих уникальных электрических и оптических свойств. Ga₂O₃ подходит для многочисленных научных и промышленных применений, таких как прозрачные электронные устройства, солнечные слепые фотодетекторы глубокого ультрафиолета, устройства спинтроники, устройства резистивной оперативной памяти, мощные и высоковольтные электронные устройства, газовые датчики, ультрафиолетовые излучатели света, фотокатализ и т. д. [1]. Многообразие форм и методов использования оксида галлия диктует необходимость совершенствования методов синтеза Ga₂O₃ и модификации его оптических и электрических свойств. В работе [2] описан метод синтеза оксидной тугоплавкой керамики с помощью высокоэнергетического мощного электронного пучка на стенде ЭЛВ-6 на базе ускорителя ЭЛВ-8 в ИФЯ СО РАН (г. Новосибирск). В данной работе исследовались образцы пористой керамики Ga₂O₃, полученной методом радиационного синтеза, и исходные необлученные порошки оксида галлия со средним размером частиц 5-10 мкм. Синтез нанокерамики осуществляется путем облучения шихты, состоящей из порошка оксида галлия в медном тигле электронами с энергией 1,4 МэВ, с плотностью мощности пучка 26 кВт/см². Образцы представляли из себя пористую керамику произвольной формы. XRD-анализом подтверждена кристаллическая структура керамики в виде β-фазы, с размерами кристаллитов порядка 80 нм.

Катодолюминесценция (КЛ) исследовалась на импульсном оптическом спектрометре на базе сильноточного малогабаритного ускорителя электронов ГИН-600 методом спектроскопии с наносекундным временным разрешением. Методика детально описана в [3].

Исследования катодолюминесценции нанокерамики Ga₂O₃ выявили наличие двух пиков свечения — ультрафиолетового (375 нм, быстро затухающего) и синего (440 нм, медленно затухающего), соответствующих различным дефектам структуры материала. Со временем спектр сдвигается из УФ-области в синюю, отражая эволюцию возбужденных состояний. Кинетика процесса хорошо аппроксимируется суммой экспоненциального с характеристическим временем 65 нс и двух гиперболических компонентов, что подтверждает сложный механизм рекомбинационных процессов. При низкой температуре (80 К) наблюдается смещение максимума спектра в сторону коротких волн и снижение интенсивности «медленного» крыла.

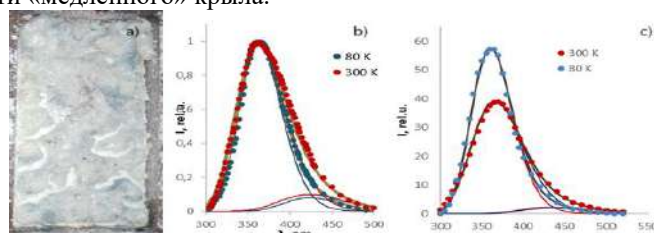


Рисунок. а) – образец нанокерамики Ga₂O₃, б) - спектры КЛ порошка, с) - спектры нанокерамики, измеренные через 40 нс при 300 и 80 К

Сравнение спектрально-кинетических характеристик катодолюминесценции исходного порошка и синтезированной радиационным методом керамики показало качественное подобие спектров (рисунок). Однако наблюдается смещение положения максимумов (365 нм для керамики и 360 для порошка), что может быть связано с различиями в механизмах захвата и миграции носителей заряда вследствие различной плотности дефектов и пористости материалов в виде отдельных микрокристаллов и керамики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-73-00108, <https://rscf.ru/project/23-73-00108/>.

[1] Stepanov S.I., Nikolaev V.I., Bougrov V.E., Romanov A.E., *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **44**, 63-86, (2016).

[2] Lisitsyn V., Tulegenova A., Golkovski M., Polisadova E., Lisitsyna L., Mussakhanov D., Alpyssova G., *Micromachines*, **14**, 2193, (2023).

[3] Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., *Известия вузов. Физика*, **43**, №3, 22, (2000).

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОДНЫХ РОДАМИНА 6Ж ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИОНОВ Ni И Pd В ВОДНЫХ СРЕДАХ

Леонов А.А.¹, Сергеев А.А.², Мироненко А.Ю.³

¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

²Гонконгский университет науки и технологии, Гонконг, Китай

³Институт химии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

andreileonov@inbox.ru

Исследованы хемосенсоры на основе производных родамина 6Ж, обладающие высокой чувствительностью и селективностью к ионам Ni²⁺ и Pd²⁺ в водном растворе. Достигнутый предел обнаружения Ni²⁺ и Pd²⁺ составил 0.11 и 0.13 мкМ, соответственно.

Ключевые слова: хемосенсор, родамин 6ж, ионы металлов.

Разработка люминесцентных сенсоров для обнаружения ионов тяжелых и переходных металлов имеет важное практическое значение, поскольку эти ионы играют ключевую роль в биологических процессах различных живых систем [1]. Ионы тяжелых металлов относят к токсичным загрязнителям, которые часто встречаются в потоках промышленных химических отходов. Палладий и никель широко используются в промышленных и коммерческих областях, таких как каталитические преобразователи, электроника, топливные элементы, машинное оборудование, красящие пигменты и т.д. Однако избыток Ni²⁺ и Pd²⁺ в организме может вызывать астму, аллергию, дерматит, пневмонию, расстройства ЦНС, рак носовой полости и легких [2, 3].

Исследования показали, что при хелатировании ионов никеля производными родамина 6Ж происходит существенный рост полосы поглощения при 530 нм по сравнению с полосой поглощения при 500 нм (рисунок (а)). Это свидетельствует об изменении электронной конфигурации комплекса 1 при хелатировании ионов никеля, что связано с изменением соотношения концентраций димеров Н- и J-типа. В результате происходит практически трехкратное увеличение интенсивности люминесценции комплекса, что делает его перспективным для создания оптических сенсоров ионов никеля в жидкой среде. Как видно на рисунке (а), сенсорный отклик комплекса 1 на присутствие ионов никеля обладает неплохой селективностью.

В свою очередь, комплекс 2 продемонстрировал селективный сенсорный отклик на присутствие ионов палладия (рисунок (б)). Поскольку комплекс изначально находится в мономерной форме, хелатирование ионов палладия не оказывает существенного влияния на форму спектра поглощения, а приводит только к увеличению интенсивности люминесценции.

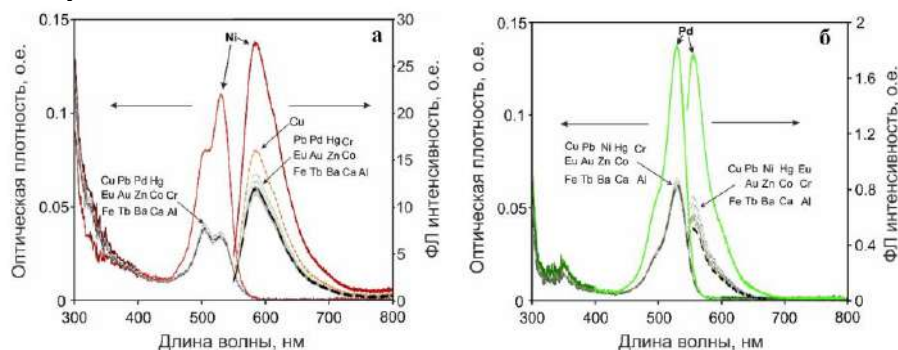


Рисунок. Изменения интенсивности поглощения и флуоресценции ионочувствительных индикаторов при воздействии с ионами различных металлов: (а) комплекс 1; (б) комплекс 2

Созданные комплексы на основе производных родамина 6ж, позволяют селективно определять присутствие ионов никеля и палладия в водной среде на уровне ниже предельно допустимой концентраций, с уровнем pH максимально приближенным к нейтральному. Широкий диапазон определяемых концентраций ионов никеля и палладия сенсорами, является вполне достаточным для определения их концентрации не только в водопроводной и питьевой воде, лекарственных средствах, но также и в сточных водах. Предел обнаружения для ионов никеля составил 0.11 мкМ, что соответствует 0.02 ПДК, а для ионов палладия составил 0.13 мкМ, что соответствует 0.002 ПДК [4].

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FFW-2021-0001).

[1] Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Patlolla A.K., Sutton D.J., *Mol. Clin. Environ. Toxicol.*, **101**, 133-164, (2012).

[2] Li R., He Q., Hu Z., Zhang S., Zhang L., Chang X., *Anal. Chim. Acta*, **713**, 136-144, (2012).

[3] Sunderman F.W., Morgan L., Andersen A., Ashley D., Forouhar F., *Ann. Clin. Lab. Sci.*, **19**, 44-50, (1989).

[4] Леонов А.А., диссертация ... к.ф.-м.н.: 1.3.19, Владивосток, (2024).

ОПТИЧЕСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ Мынбаев К.Д.^{1,2}, Дорогов М.В.¹, Коротаев А.Г.³, Войцеховский А.В.³,
Варавин В.С.⁴, Ремесник В.Г.⁴, Якушев М.В.⁴¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия² ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия³ ТГУ, г. Томск, Россия⁴ ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В работе представлены результаты исследования оптического отражения эпитаксиальных пленок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ составов $x \approx 0.2$ и $x \approx 0.3$, подвергнутых имплантации ионами бора и мышьяка. Обнаружены и обсуждаются особенности в спектрах отражения для образцов после имплантации с различными энергиями и флюенсами ионов.

Ключевые слова: теллуриды кадмия-ртути, ионная имплантация, оптическое отражение.

Твердые растворы теллуридов кадмия-ртути (КРТ, $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$) широко применяются для создания фотоприемников, работающих в среднем и дальнем (длины волн $\lambda = 3\text{--}12$ мкм) инфракрасных диапазонах. Для создания фотодиодов необходимо формирование электронно-дырочных переходов, и одним из основных методов их создания в КРТ остается ионная имплантация [1]. Применение данного метода приводит к внесению в материал большого числа радиационных дефектов, которые могут существенно влиять на параметры приборных структур. Для оценки структурного совершенства поверхности КРТ и распределения дефектов по толщине имплантированной области может быть использован метод оптического отражения (ОО) [2]. В настоящей работе сообщается о результатах исследования ОО, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии пленок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, подвергнутых имплантации ионами B^+ или As^+ для создания n^+-p - и p^+-n -переходов, соответственно.

Исследовались ОО выращенных в ИФП СО РАН пленок КРТ с $x \approx 0.2$ и $x \approx 0.3$. Состав и толщина пленок определялись в ходе роста с помощью *in situ* эллипсометрии и контролировались *ex situ* измерениями оптического пропускания. Спектры ОО записывались при температуре 300 К с использованием спектрометров Shimadzu UV-3600, PerkinElmer Lambda1050 и InfraLum-801. Спектры ряда исследованных образцов до и после имплантации с флюенсом 10^{14} см⁻² приведены на рисунке.

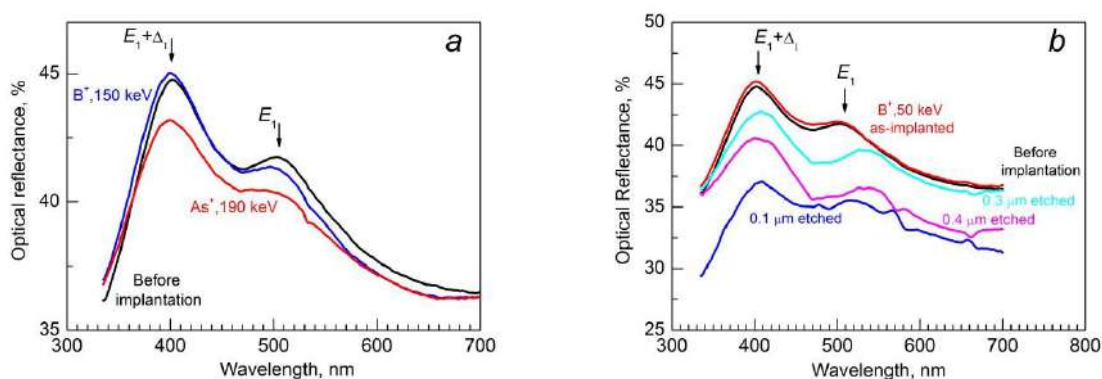


Рисунок. Спектры оптического отражения пленок до и после имплантации с энергией $E \geq 150$ кэВ (a), и до и после имплантации ионами бора с $E = 50$ кэВ и послойного химического травления (b)

Оценка структурного совершенства поверхности проводилась по величине “резкости пиков” Q характерного дублета пиков E_1 и $E_1 + \Delta_1$ $Q = \Delta R / R_1$ (ΔR – величина прогиба между пиками, R_1 – отражение в максимуме пика E_1) [2]. После имплантации с энергией $E \geq 150$ кэВ наблюдалось заметное уменьшение Q , что свидетельствовало о существенном нарушении структурного совершенства (рисунок a). После имплантации ионов B^+ с $E = 50$ кэВ значение Q изменилось слабо, что свидетельствовало о незначительных нарушениях (рисунок b); здесь наблюдалось увеличение x (сдвиг пика E_1) в приповерхностном слое вследствие его обеднения ртутью из-за распыления материала и её диффузии вглубь образца. Измерение спектров ОО при послойном химическом травлении позволило оценить распределение дефектов по толщине имплантированной области (рисунок b). В докладе также будет обсуждаться изменение структурного совершенства поверхности в результате пост-имплантационных отжига, и оптимизация режимов имплантации и отжига для минимизации радиационных нарушений.

Работа в Университете ИТМО выполнена в рамках государственного задания FSER-2025-0005.

[1] Huang Z., Lin C., Xie H., Xin R., Li X., Li T., *AIP Advances*, **14**, 045206, (2024).

[2] Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Ремесник В.Г., Талипов Н.Х., *Автометрия*, №5, 73-77, (1998).

УЗКОПОЛОСНЫЕ ИНФРАКРАСНЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ NDIR-СЕНСОРОВ

Тропин А.Н.

АО «НИИ «Гириконд», Санкт-Петербург, Россия

216@giricond.ru

Исследовано влияние спектральных характеристик узкополосных инфракрасных интерференционных фильтров на чувствительность NDIR-сенсоров. Для детектирования методом инфракрасной абсорбционной спектроскопии некоторых широко применяемых технических газов сформулированы требования к параметрам спектральных характеристик пропускания таких фильтров.

Ключевые слова: NDIR-сенсор, интерференционный фильтр, инфракрасный спектр.

В основе принципа работы NDIR – сенсора (nondispersive infrared sensor) лежит свойство газов селективно ослаблять инфракрасное излучение на определенных длинах волн вследствие резонансного поглощения. За исключением симметричных двухатомных молекул, молекулы большинства газов поглощают инфракрасное излучение при определенных энергиях, связанных с колебательными и вращательными модами этих молекул [1]. Выделение узких спектральных линий в сенсорах для детектирования таких газов осуществляется за счет применения узкополосных интерференционных фильтров, максимум пропускания которых совпадает с линией поглощения анализируемого газа [2].

На рисунке приведены спектры пропускания некоторых технических газов, имеющих линии поглощения в спектральном диапазоне от 7 мкм до 12 мкм [3].

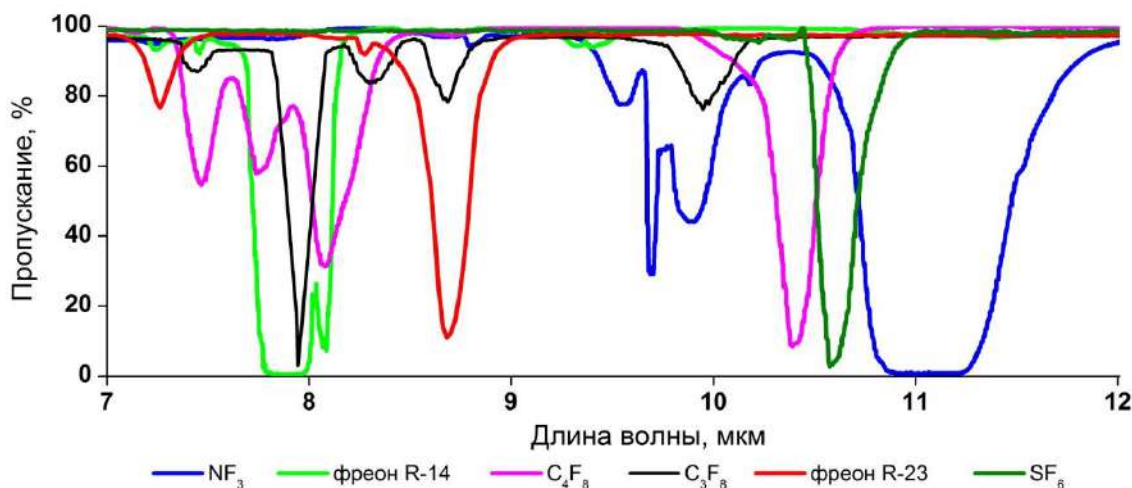


Рисунок. Инфракрасные спектры пропускания газов

Расчетным методом в работе проведено исследование влияния параметров спектральных характеристик узкополосных интерференционных фильтров на чувствительность сенсоров. При этом в качестве параметров оптических фильтров рассмотрены следующие: длина волны максимального пропускания (λ_{max}) и полуширина – спектральная ширина на полувывоте ($\Delta\lambda_{0,5Tmax}$).

Расчет эффективности спектрального согласования сенсора осуществлялся с использованием выражения:

$$S = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A(\lambda)F(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A(\lambda)d\lambda}, \quad (1)$$

где $A(\lambda)$ – спектр поглощения анализируемого газа, $F(\lambda)$ – спектральная характеристика пропускания узкополосного фильтра, описываемая нормальным распределением Гаусса:

$$F(\lambda) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lambda-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

Для таких технологических газов, как элегаз (SF_6), трифторид азота (NF_3), октафторпропан (C_3F_8), октафторциклобутан (C_4F_8), а также для некоторых разновидностей фреонов определены оптимальные значения λ_{max} и $\Delta\lambda_{0,5Tmax}$, обеспечивающие эффективность чувствительности сенсоров с позиции наилучшего спектрального согласования формы линии поглощения газа и спектра пропускания фильтра.

[1] Wong J.Y., Anderson R.L., *Non-Disp. Infrared Gas Measurement*, USA: IFSA Publishing, (2012).

[2] Варфоломеев С.П., Горбунов Н.И. и др., *Компоненты и технологии*, **6**, 46-49, (2004).

[3] База данных по химии: [Электронный ресурс]. URL: <https://webbook.nist.gov/> (дата обращения: 15.06.2025).

**ДИНАМИЧЕСКИЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПИНЦЕТ
БИК-ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

Севостьянов О.Г., Чиркова И.М., Баснин П.П., Вершинина А.И.

Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

olsevos@yahoo.com

Рассмотрены материаловедческие аспекты в разработке компонентов операционной платформы, предназначенной для управления микрообъектами различной природы с помощью специально подготовленной фотоэлектрической подложки на основе монокристаллов ниобата лития и электромагнитного излучения инфракрасного диапазона.

Ключевые слова: оптоэлектронный пинцет, ниобат лития, микромашины.

Различные концепции оптоэлектронных систем направленной структурной организации ансамблей микро- и наночастиц интенсивно исследуются в последние годы. Сегодня особый интерес, по нашему мнению, представляют: методы фотоактивации процессов самосборки микрообъектов с компонентами биологического происхождения в живом состоянии; способы создания микросистем, выполняющих функции микромашин, получающих энергию от светового пучка и развитие новых биохимических приложений на интегральной оптоэлектронной базе [1]. Дальнейший прогресс этого направления может быть ускорен разработкой платформы, использующей различные варианты пространственно-неоднородной актиничной подсветки в ИК-диапазоне длин волн электромагнитного излучения в интерфейсных системах на подложках некоторых фотосегнетоэлектриков, например таких как ниобат лития – LiNbO_3 , генерирующих при фотовозбуждении эвансцентные электрические поля на границе раздела с окружающей средой. Фотовольтаические твизеры на базе $\text{LiNbO}_3\text{:Fe}$ хорошо известны, но эффективно работают лишь в видимом диапазоне длин волн, что драматически увеличивает их интегральную фототоксичность при воздействии на микроскопические биосистемы, особенно при попытках подключения динамического режима работы в реальном времени. Для решения этой проблемы мы предлагаем новый подход, часть которого состоит в применении управляющей LiNbO_3 подложки, специально адаптированной для работы пинцета в ближнем ИК-диапазоне (БИК). Такие подложки созданы нами с помощью методов т.н. “мягкого” протонирования кристаллов ниобата лития с составом близким к стехиометрическому (стехиометрическое отношение $R=0.994$). Несколько этапов применяемых обработок позволяют получить гомогенные или гетерофазные слои H:LiNbO_3 с приповерхностной локализацией (толщиной от единиц до нескольких сотен микрометров), в состоянии слабого химического восстановления. Характерными особенностями таких образцов в аппаратной реализации пинцета являются резкий рост величины их БИК-фотоотклика, контролируемого по появлению транспорта микрочастиц на поверхности подложек во время или после экспозиции интерфейсной системы лазерным лучом ($\lambda_0=785$ нм), и возможность подстройки времени релаксации фотоиндуцированных полей, изменяемого в пределах от долей секунды до нескольких часов в зависимости от параметров синтеза подложек, выбора интерфейсной среды и интенсивности самой подсветки.

Анализ причин ИК-сенсibilизации в фотоэлектрических пинцетах, построенных на наших подложках, требует детального рассмотрения большого набора факторов влияния, среди которых можно особо выделить: а) переключение механизмов и схем транспорта заряда при фотовозбуждении слоев H:LiNbO_3 , в т.ч. с учетом макроскопической топологической структуры всей интерфейсной системы твизера; б) возможное изменение природы фотоактивных центров в протонированных слоях, приводящее к росту суммарной поверхностной проводимости. По совокупности данных о композиционном составе используемых кристаллов, результатов проведенных спектральных измерений, а также выводов из наших предыдущих работ, нами предложена феноменологическая модель процесса БИК-фотовозбуждения подложек H:LiNbO_3 , основанная на принципе локального изменения спонтанной поляризации в экспонированной области модифицированного слоя. При этом микроскопические механизмы генерации и возбуждения фотоактивных центров предусматривают существование для структуры H:LiNbO_3 электронных и дырочных поляронов $\text{Nb}_{\text{Nb}}^{4+}$ и $\text{O}^\cdot$, а также центров $\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+}$ и вакансий лития в малой концентрации. Возможность появления дискутируемых для ниобата лития экситонных поляронных состояний и роль компенсатора - ионов H^+ , также следует учесть. Одним из интересных замечаний на текущем этапе работы является заключение о сложности классификации нашего типа пинцета в современной (ещё не устоявшейся) терминологии по физическому принципу генерации электрических полей активной подложкой, поскольку его отнесение, например, к сугубо фотовольтаическому или пироэлектрическому типам проблематично, а т.н. “фотоэлектрический” тип часто закрепляется в номенклатуре за твизерами с подложками, работающими только на изменении фотопроводимости. В данной работе мы применяем термин “фотоэлектрический” в самом широком смысле определения, как хорошо отражающий весь комплекс анализируемых процессов в изучаемых объектах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Грант №25-29-00596).

**ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ
ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СПЕКЛ-ЭКРАНОВ В ФТР-СТЕКЛЕ:
АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ**
Гавриш М.В.^{1,2}, Прохорова У.В.^{2,3}, Сердобинцев П.Ю.³, Розанов П.К.^{1,2},
Сементин В.В.², Погода А.П.², Никоноров Н.В.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
mgavrish300103@gmail.com

В работе продемонстрированы методы регистрации голографических диффузоров в фото-термо-рефрактивном стекле, методом импульсной голографии. Рассматриваются вопросы влияния стабильности интерференционной картины и длительности импульса на параметры спекл-экранов.

Ключевые слова: диффузор, голография, ФТР-стекло.

В работе представлены результаты исследования по импульсной лазерной регистрации голографических спекл-структур в фото-термо-рефрактивном (ФТР) стекле. Продемонстрирована возможность создания голографических диффузоров методом однократного и многократного экспонирования при использовании наносекундных лазерных импульсов с длиной волны 314-325 нм. Проведён анализ влияния стабильности интерференционной картины и длительности импульса на параметры формируемых спекл-экранов. Установлено, что снижение длительности импульса способствует повышению контрастности записи и однородности распределения интенсивности в дальней зоне, при этом обеспечивая эффективную модуляцию показателя преломления в объёме ФТР-стекла. Показано, что за счёт оптимизации временных и пространственных параметров экспонирования возможно получение диффузоров с высокой угловой шириной индикатрисы рассеяния и подавлением нулевого порядка [1]. Полученные результаты сопоставлены с характеристиками аналогичных голографических структур, формируемых в традиционных светочувствительных средах, таких как галоидосеребряные фотоэмульсии и бихромированный желатин [2]. Отмечены преимущества ФТР-стекла по стабильности и долговечности полученных голограмм. Разработанная методика может быть применена при создании оптических элементов для лазерных систем подсветки, проекционных устройств и перспективных дисплейных технологий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания "Фундаментальные исследования в области создания приборов и технологий развития ключевых узлов терминалов лазерной космической связи с высокой скоростью передачи данных" FZWF-2025-0002. НИОКТР 125052706438-3.

[1] Ganzherli N., Gulyaev S., *Journal of Optical Technology*, **74**, 622-625, (2007).

[2] Петров Н.И., *Компьютерная оптика*, **41**, №6., 831-836, (2017).

**ФАЗООБРАЗОВАНИЕ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНОКРИСТАЛЛОВ И НАНОЧАСТИЦ
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ZrO_2 - Eu_2O_3**

**Рябочкина П.А.¹, Алексеева А.С.¹, Букарев С.А.¹, Волкова Т.В.¹,
Ломонова Е.Е.^{2,1}, Мызина В.А.^{2,1}, Табачкова Н.Ю.^{2,3,1}**

¹МГУ им. Н.П. Огарёва, г. Саранск, Россия

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

³Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

ryabochkina@freemail.mrsu.ru

В докладе представлены результаты исследования процессов фазообразования и спектрально-люминесцентных характеристик нанопорошков твердых растворов ZrO_2 -хмол.% Eu_2O_3 ($x=4-27$), полученных методом соосаждения, и кристаллов аналогичного состава, полученных методом направленной кристаллизации расплава в холодном контейнере.

Ключевые слова: твердые растворы диоксида циркония, монокристаллы, наночастицы.

Материалы, содержащие ионы европия, характеризуются люминесценцией в видимом диапазоне спектра. Наличие этой люминесценции может быть обусловлено оптическими переходами между энергетическими уровнями как ионов Eu^{2+} , так и ионов Eu^{3+} . При этом люминесценция в синей области спектра характерна для материалов, содержащих ионы Eu^{2+} . Для материалов с ионами Eu^{3+} , как правило, наблюдается свечение в красно-оранжевой области спектра. Материалы, содержащие как ионы Eu^{2+} , так и ионы Eu^{3+} , представляют практический интерес при их использовании в качестве люминофоров [1-3].

Уникальными физическими свойствами обладают твердые растворы на основе диоксида циркония. Несмотря на их широкое применение на практике, разработка методов получения и исследования свойств как объемных, так и наноматериалов на основе диоксида циркония, является крайне актуальной.

В докладе представлены результаты исследования фазообразования и спектрально-люминесцентных характеристик нанопорошков концентрационного ряда ZrO_2 -хмол.% Eu_2O_3 ($x=4-27$), полученных методом химического соосаждения и монокристаллов аналогичного состава, полученных направленной кристаллизации расплава в холодном контейнере.

Анализ результатов исследования фазового состава кристаллов и нанопорошков ZrO_2 - Eu_2O_3 при одинаковом содержании Eu_2O_3 свидетельствует о том, что процессы фазообразования данных твердых растворов значительным образом зависят от способа их получения. Так, например, в случае нанопорошков кубическая флюоритовая структура стабилизируется при меньших концентрациях Eu_2O_3 и характерна для твердых растворов ZrO_2 - Eu_2O_3 в диапазоне концентраций Eu_2O_3 от 8 до 27 мол.%, Eu_2O_3 .

Кристаллы $8EuSZ$ являются двухфазными и содержат смесь тетрагональной и кубической модификаций ZrO_2 . Кристаллы $27EuSZ$ содержат две фазы со структурами флюорита и пироклора.

Различия в спектрально-люминесцентных характеристиках монокристаллов и нанопорошков ZrO_2 -хмол.% Eu_2O_3 ($x=4-27$) обусловлены различием их фазового состава, присутствием в монокристаллах ионов Eu^{2+} , а в нанопорошках дефектов структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FZRS-2025-0001) в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва».

[1] Danilkin M.I., Belousov A.P., Klimonskii S.O., Kuznetsov V.D., Lust A.L., Nikiforov V.N., Paama L.N., Pammo I.Kh., Seeman V.O., *Journal of Applied Spectroscopy*, **74**, 858-865, (2007).

[2] Su F., Zho W., Yang Y., Ou Y., Qi Z., Duan C.K., Brik M.G., Dorenbos P., Liang H., *Dalton Trans.*, **50**, 10050-10058, (2021).

[3] Pelczarska A.J., Stefanska D., Watras A., Macalik L., Szczygieł I., Hanuza J., *Materials*, **15**, 1850, (2022).

ПОЛЯРИТОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ДВУМЕРНЫХ ГАЛОГЕНИДНЫХ ПЕРОВСКИТАХ $\text{BA}_2\text{MA}_2\text{Pb}_3\text{I}_{10}$

Мурзин А.О.¹, Пасхос И.², Капитонов Ю.В.¹, Саввидис П.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Университет Уэстлейк, Ханчжоу, Китай

aleksei.murzin.science@mail.ru

В двумерных перовскитах $\text{BA}_2\text{MA}_2\text{Pb}_3\text{I}_{10}$ при температуре 7 К был обнаружен режим сильной экситон-фотонной связи при непрерывном лазерном возбуждении. При переходе к импульсному возбуждению зарегистрирована поляритонная лазерная генерация.

Ключевые слова: поляритоны, лазерная генерация.

Поляритонная лазерная генерация представляет собой перспективное направление в области разработки когерентных источников излучения с ультранизким порогом генерации [1]. На этом фоне особый интерес вызывают двумерные галогенидные перовскиты благодаря большой силе осциллятора и возможности перестройки ширины запрещённой зоны в широком диапазоне. В настоящей работе исследована поляритонная лазерная генерация в двумерных галогенидных перовскитах $\text{BA}_2\text{MA}_2\text{Pb}_3\text{I}_{10}$ при криогенных температурах и импульсном лазерном возбуждении с частотой повторения 1 кГц.

Резонатор формировался путём высокотемпературного прессования в вакууме пары диэлектрических зеркал. Каждое зеркало включало 10,5 пар слоёв Ta_2O_5 (750 Å) / SiO_2 (1048 Å), на края которых были нанесены медные полоски; итоговое межзеркальное расстояние составляло порядка 4840 Å. В резонатор вводился исходный раствор методом капиллярного всасывания, после чего при медленном охлаждении происходил рост микрокристаллов галогенидного перовскита $\text{BA}_2\text{MA}_2\text{Pb}_3\text{I}_{10}$.

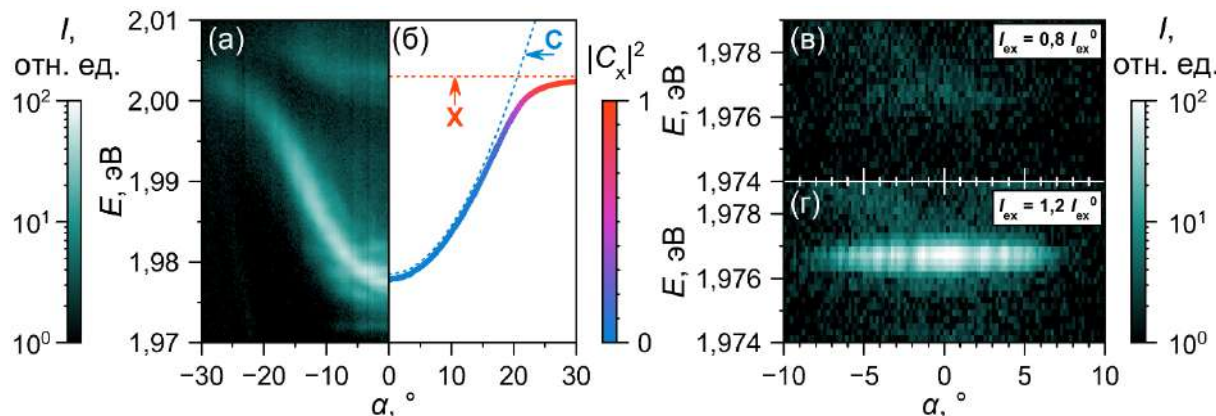


Рисунок. Дисперсионные зависимости: (а) фотолюминесценции при непрерывном лазерном возбуждении; (б) нижней поляритонной ветви с отображением коэффициента Хопфилда $|C_x|^2$ и дисперсий экситона X и фотонной моды резонатора C ; (в, г) фотолюминесценции при импульсном лазерном возбуждении с плотностью мощности I_{ex} меньше (в) и больше (г) порога генерации I_{ex}^0

При охлаждении сформированной структуры до температуры $T = 7$ К и непрерывном лазерном возбуждении был зафиксирован режим сильной экситон-фотонной связи, о чём свидетельствуют характерные дисперсионные зависимости фотолюминесценции (рисунок а,б); величина расщепления Раби составила порядка 10 мэВ. При переходе к импульсному возбуждению с частотой повторения 1 кГц и плотности мощности $I_{ex} > I_{ex}^0 \approx 18$ мкДж/см² была зарегистрирована поляритонная лазерная генерация (рисунок в,г). Генерация сопровождалась ярко выраженным пороговым поведением с последующим насыщением: интенсивность фотолюминесценции до и после порога была пропорциональна $\sim I_{ex}^3$ и $\sim I_{ex}^{17}$, соответственно. При увеличении плотности мощности возбуждения наблюдался сдвиг спектральной линии излучения в сторону больших энергий. Кроме того, поляритонная лазерная генерация характеризовалась периодическим угловым распределением (рисунок г) и высокой степенью линейной поляризации.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 125022002745-6.

[1] Zhang L. и др., *Prog. Quantum Electron.*, **83**, 100399, (2022).

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПРОТОНООБМЕННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СЛОЕВ ПОСЛЕ МОДИФИКАЦИИ КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМОЙ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ

Сосунов А.В.¹, Петухов И.В.¹, Козлов А.А.¹, Масалкин Д.Н.¹,
Корнилицын А.Р.¹, Шерemet А.Г.¹, Кулева М.²

¹ПГНИУ, г. Пермь, Россия

²Институт физики твёрдого тела, София, Болгария

masdn@mail.ru

Модификация поверхности чистого ниобата лития кислородной плазмой приводит к формированию промежуточных фаз в ходе прямого протонного обмена. Ранее такой процесс считался невозможным. Предложено объяснение диффузии протонов через поверхность ниобата лития.

Ключевые слова: плазменная обработка поверхности, фазовый состав, диффузия протонов.

Ниобат лития (НЛ) широко используется в области фотоники и микроэлектроники. НЛ – сегнетоэлектрик с высокой спонтанной поляризацией, поверхности которого обладают огромным и во многом неизученным потенциалом [1]. Тонкие пленки из НЛ обладают большим потенциалом применения и вызвали значительный интерес со стороны ученых из различных областей знаний [2]. Таким образом, поверхность и ее активация/модификация играют важную роль в технологических операциях.

Целью данного исследования является изучение активации поверхности НЛ O_2 -плазмой и ее влияния на диффузию протонов.

Плазмохимическую активацию поверхности НЛ проводили в чистом O_2 газе с помощью установки ЭТНА-100 (НТ-МДТ). Режим активации: индуктивно связанная плазма (ICP) – 80 Вт, постоянное смещение (ССР) – 110 Вт, давление в камере – 1.0, 0.01, 0.001 мбар, поток газа – 70 см³/мин, время – 5 мин.

Активация поверхности O_2 -плазмой и последующий прямой протонный обмен (ПО) в НЛ приводит к изменению фазового состава протоннообменных слоев. Типичный протонный обмен приводит к формированию высоконапряженных β_1 - и β_2 -фаз [3]. Однако модификация поверхности НЛ в кислородной плазме позволяет получать промежуточные α_1 и α_2 -фазы. Анализ проводили с помощью структурно-фазовой диаграммы. Промежуточные протоннообменные фазы обладают меньшими искажениями кристаллической решетки и меньшим изменением показателя преломления, что было подтверждено методами дифракционного структурного анализа и призмного ввода излучения. Такой результат получен впервые и ранее считался невозможным. Это еще раз подчеркивает высокую значимость именно поверхности и ее состава в процессах диффузии.

Результаты химического состава поверхности методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии указывают на изменение соотношения [Nb]/[O] в ходе плазмохимической модификации (рисунок). Было обнаружено, что коэффициент диффузии протонов очень чувствителен к данному соотношению [Nb]/[O] на поверхности. Коэффициент диффузии является максимальным при наибольшем изменении атомов [Nb]/[O].

Полученные результаты позволили сделать предположение о процессе адсорбции бензойной кислоты на поверхности НЛ. Эти результаты расширяют наше понимание о процессах диффузии, роли поверхности НЛ и дальнейшем возможном применении на практике этого эффекта.

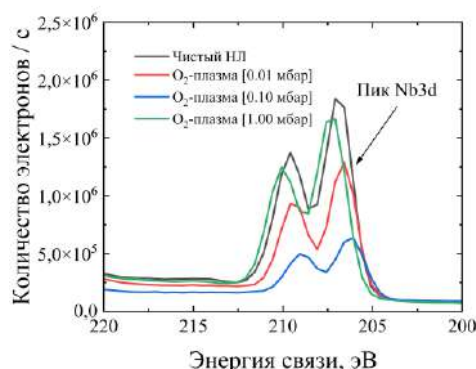


Рисунок. Результаты рентгенографической фотоэлектронной микроскопии по исследованию химического состава образцов, поверхностно-активированных O_2 -плазмой

Работа выполнена по государственному заданию № FSNF-2024-0001.

[1] Sanna S., Schmidt W.G., *J. Phys. Condens. Matter.*, **29**, 413001, (2017).

[2] Boes A., Chang L., Yu M., Langrock C., Yu M., Zhang M., Lin Q., Loncar M., Fejer M., Bowers J., Mitchell A., *Science*, **379**, eabj4396, (2023).

**ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА ПОВОРОТА ПО МНОГОКАНАЛЬНОМУ
ОПТИЧЕСКОМУ ОТКЛИКУ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ**
**Венедиктов В.Ю.^{2,4}, Ефремова Е.А.^{3,5}, Зинчик А.А.¹, Крылов И.Р.⁴,
Прохорова У.В.⁴, Шалымов Е.В.², Шоев В.И.^{1,2}**

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

³СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁵Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Vladislav.shoev@metalab.ifmo.ru

Предложено три различных подхода к измерению угла поворота по изменению отклика оптических метаповерхностей с использованием нескольких измерительных каналов. Проанализированы достоинства и недостатки этих подходов.

Ключевые слова: датчик угла, субволновая решетка, метаповерхность.

За последние 5 лет было продемонстрировано, что применение оптических метаповерхностей позволяет снизить размеры шкал датчиков угла до сотен микрон и ниже [1-3]. При этом, в качестве шкалы может быть использована одномерная периодическая субволновая диэлектрическая решетка (метаповерхность). Резонанс направленной моды такой метаповерхности в пропускании строго зависит от угла ее поворота θ относительно плоскости поляризации падающего излучения: $T(\theta) = T_0 \sin^2 \theta$. Описан простейший способ измерения угла поворота с использованием таких метаповерхностей и применением компенсационного метода [1].

Данное исследование посвящено использованию нескольких измерительных каналов при построении датчиков угла поворота на основе шкал из оптических метаповерхностей. Рассматриваются следующие варианты использования нескольких измерительных каналов: а) первый вариант основан на использовании отклика как ТЕ, так и ТМ моды; б) второй основан на регистрации резонанса одной направленной (ТЕ или ТМ) моды как на пропускание, так и на отражение; в) третий основан на регистрации откликов от нескольких частей сегментированной метаповерхности.

Первый вариант построения датчика подразумевает определение спектрального отклика исследуемых шкал датчиков угла сразу для двух резонансных мод (ТЕ и ТМ), которые расположены на различных частотах. Сумма сигналов двух каналов не зависит от угла поворота $I = I_0 [T_{TM}(f_{TM}, \theta) + T_{TE}(f_{TE}, \theta)] = I_0 = const$. При этом контроль этой суммы позволяет компенсировать систематические ошибки, которые могут быть вызваны наклоном или линейным смещением оси вращения шкалы в процессе работы устройства.

Второй вариант подразумевает использование только одной резонансной моды, однако требует контроля как прошедшего, так и отраженного метаповерхностью сигнала, т.е. необходимо размещать фотоприемники с обеих сторон метаповерхности. В этом подходе существует дополнительная возможность к перечисленным, а именно компенсации систематической ошибки, вызванной нестабильностью мощности источника излучения.

Третий вариант подразумевает использование сегментированной метаповерхности, составленной из нескольких (не менее 3) участков отличающихся ориентацией метаатомов (штрихи ориентированы под разными углами). Сигнал от каждого участка измеряется независимо друг от друга. Дифференциальное сравнение сигналов от соседних участков позволяет компенсировать шумы, вызванные флуктуациями выходной мощности источника, и реализовать не только инкрементальный, но и абсолютный датчик угла поворота.

[1] Efremova E.A., Prokhorova U.V., Shalymov E.V., Shoev V.I., Stolyarov V.A., Nevzorov M.A., Venediktov V.Y., *Proc.SPIE*, **12773**, 1277307, (2023).

[2] Kazakova A.D., Larionov D.Y., Shalymov E.V., Shoev V.I., *ElConRus*, 1115-1118, (2022).

[3] Prokhorova U.V., Shalymov E.V., Shoev V.I., Venediktov V.Yu., Kukaev A.S., *Proc. SPIE*, **12321**, 123210C, (2022).

**ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР
С ОПТИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ
НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК АМОРФНОГО КРЕМНИЯ**

**Шулейко Д.В.¹, Соколовская О.И.¹, Мартышов М.Н.¹, Сердобинцев А.А.²,
Волковойнова Л.Д.², Вениг С.Б.², Пахольчук П.П.^{1,3}, Кузьмин Е.В.^{1,3},
Заботнов С.В.¹, Кашкаров П.К.^{1,4}**

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

²Саратовский государственный университет, Институт физики, г. Саратов, Россия

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

⁴НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

sokolovskayaoi@my.msu.ru

Сформированы гетеропереходы “нанокристаллический - аморфный кремний” и периодические структуры субмикронного масштаба «нанокристаллический кремний – воздух» на поверхностях тонких пленок аморфного кремния площадью $5 \times 5 \text{ мм}^2$ в результате их фемтосекундного лазерного облучения.

Ключевые слова: периодическая структура, анизотропия, фемтосекундное облучение.

Интегрированные оптические элементы, представляющие собой поверхностные структуры, индуцированные ультракоротким лазерным излучением (ЛИППС), могут представлять интерес как для поляризационных оптических измерений или создания структурированных световых пучков, так и для телекоммуникаций [1]. Также возможно создание высокоэффективных солнечных элементов [2] путем формирования гетероперехода “кристаллический кремний (с-Si) -аморфный кремний (а-Si)” в слоях а-Si за счет лазерно-индуцированной кристаллизации с повышенной подвижностью носителей заряда в нанокристаллическом кремнии (nc-Si) по сравнению с таковой в а-Si.

Для создания гетероперехода “с-Si – а-Si” на поверхности пленки а-Si посредством ее локальной лазерно-индуцированной кристаллизации магнетронным распылением при постоянном токе (Robvac VSM 300) были получены слои а-Si на стеклянных подложках с контактами из хрома или ИТО. Проведено облучение пленок фемтосекундным лазерным излучением с плотностью мощности излучения $0.01\text{-}0.1 \text{ Дж/см}^2$ (515 нм, 50 мкм, 300 фс, 1 кГц, скорость сканирования 300 мкм/с) с перемещением пучка по траектории в форме меандра. Из данных разрешенной по глубине спектроскопии КРС полученных меандров определена плотность мощности, равная 0.1 Дж/см^2 , при которой достигается оптимальная для формирования гетеропереходов глубина кристаллизации а-Si, равная $45 \pm 5 \text{ нм}$. Для указанных параметров облучения в растровом сканирующем режиме на площади $5 \times 10 \text{ мм}^2$ созданы гетероструктуры nc-Si/a-Si с шагом, меньшим, чем диаметр пучка. Вольт-амперная характеристика облученных пленок обладает выраженным диодным характером, что свидетельствует о наличии потенциального барьера. Также после облучения сопротивление пленки а-Si значительно снизилось в результате частичной кристаллизации верхнего слоя с образованием нанокристаллов.

Облучение пленки а-Si с плотностью мощности $E = 0.15 \text{ Дж/см}^2$ выше порога абляции приводит к формированию ЛИППС с низкой пространственной частотой на ее поверхности с периодом $1100 \pm 20 \text{ нм}$. Полученные регулярные структуры могут быть использованы в качестве дифракционных решеток. Для анализа поляризационных свойств указанных ЛИППС были изготовлены прототипы волновых пластин на пленках а-Si площадью $5 \times 5 \text{ мм}^2$. С этой целью пленки а-Si на стеклянных подложках были закреплены системой механических трансляторов (Лассард) и облучены фемтосекундным лазером (Авеста, 1250 нм, 150 фс, 10 Гц). Периоды полученных ЛИППС были определены путем анализа СЭМ изображений. Измерение оптического запаздывания были выполнены в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах (Фурье-спектрометр Bruker IFS 66v/S).

Показано, что снижение пропускания и выраженности интерференции в пленке после её лазерного структурирования связано с формированием кристаллической фазы в приповерхностном слое в результате лазерно-индуцированного фазового перехода, а также с диффузным рассеянием света на сформировавшемся рельефе поверхности. Установлено, что ось анизотропии облученной пленки а-Si параллельна штрихам сформированных ЛИППС, а разница показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн составляет 0.47 ± 0.07 . Указанная анизотропия достигается в результате модулированной лазерной абляции пленки и формирования на ее поверхности чередующихся наномасштабных областей «nc-Si – воздух». Величина оптического запаздывания изготовленных прототипов волновых пластин на основе а-Si составила $280 \pm 40 \text{ нм}$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-19-00035-П, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00035/>).

[1] Kikuchi. K., *J. Light. Technol.*, **34**, №1, 157-159, (2015).

[2] Yoshikawa K., Kawasaki H., Yoshida W., Irie T., Konishi K., Nakano K., Uto T., Adachi D., Kanematsu M., Uzu H., Yamamoto K., *Nat. Energy*, **2**, 17032, (2017).

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТОЧКИ КОЛЛАПСА РЕЗОНАНСОВ ФАНО В СПЕКТРЕ
РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЯРИТОНОВ МАГНЕТИКОВ С ЦЕНТРОМ
АНТИИНВЕРСИИ**

Сухорукова О.С.^{1,2}, Тарасенко А.С.¹, Тарасенко С.В.¹, Шавров В.Г.³

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, г. Донецк, Россия

²Физико-технический факультет, ДонГУ, г. Донецк, Россия

³Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

artem.s.tarasenko@gmail.com

Для спектра фотонного излучения магнитных поляритонов, распространяющихся в симметричном оптически прозрачном магнитном слое изучена взаимосвязь бианизотропных параметров негиротропной среды, обладающей и временной и пространственной дисперсией, с критериями возникновения коллапса резонанса Фано и формирования интерференционных связанных состояний (как безотражательного, так и скрытого типа).

Ключевые слова: связанные состояния в континууме, коллапс резонанса Фано, бианизотропия.

Энергия активации магнонов, находящаяся в терагерцовом частотном диапазоне, вместе со значительно усиленной межподрешеточным обменом скоростью распространения спиновых волн являются ключом к изучению диэлектрических антиферромагнетиков (АФМ) как одного из наиболее актуальных направлений исследований в современной магнитной спинтронике микрорезонаторов [1]. На этом фоне особый интерес в настоящее время вызывает анализ статических и динамических свойств нецентросимметричных магнетиков, к которым относятся и антиферромагнетики, обладающие центром антисимметрии (ЦАС АФМ) [2]. Это связано с тем, что одна из основных особенностей кристаллической структуры нецентросимметричных магнитных материалов заключается в том, что термодинамический потенциал таких сред может одновременно включать в себя не только неоднородное обменное взаимодействие (НОВ), но, согласно [3] и члены, линейные по первым пространственным производным и квадратичные по компонентам намагниченности спиновых подрешеток. В результате становится принципиально возможным формирование уже без учета диполь-дипольных взаимодействий или ограниченных размеров реального образца дополнительных пространственно локализованных равновесных магнитных конфигураций. Что же касается ЦАС АФМ, то для него наличие не просто отсутствие центра инверсии, а наличие центра антисимметрии в соответствии с [4] обеспечивает одновременное присутствие наряду с НОВ как неоднородного взаимодействия Дзялошинского (НВД), так и линейного магнитоэлектрического взаимодействия (ЛМЭВ). При этом вопрос о взаимосвязи условий возникновения коллапса резонанса Фано (КРФ) и сопутствующих связанных состояний в сплошном спектре (ССК) радиационных магнитных поляритонов слоя ЦАС АФМ тетрагонального типа, до сих пор оставался без ответа.

В предлагаемом сообщении представлены результаты исследования особенностей формирования ССК для симметричного магнитоскомпенсированного оптически прозрачного слоя ЦАС АФМ, с одним открытым каналом фотонного излучения индуцированные корректным учетом бианизотропных свойств магнитной среды. С этой целью развит спин-волновой электродинамический подход для описания поляритонной динамики двухподрешеточной модели ограниченного тетрагонального ЦАС АФМ, в котором одновременно присутствуют ЛМЭВ, НВД и неоднородное обменное взаимодействие. В частности изучено влияние структуры магнитоэлектрической диады, входящей в материальные уравнения связи ЦАС АФМ, на образование вследствие механизма Фридриха-Винтгена интерференционных типов ССК – как «безотражательных», так и «скрытых» (на плоскости « частота – продольное волновое число» в точке КРФ «скрытому» ССК, в отличие от «безотражательного», соответствует ненулевой минимум амплитудного коэффициента отражения). При этом в окрестности как «безотражательных», так и «скрытых» интерференционных ССК эффект неограниченного роста смещения Гуса –Хенхен для отраженного пучка сохраняется. Определены условия, при которых кооперативное воздействие ЛМЭВ и НВД приводит к эффекту невязимости по отношению к инверсии знака продольного волнового числа как условий формирования точек КРФ, так и сопутствующих им типов ССК.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России за счет государственного задания ФГБНУ ДонФТИ им. А.А. Галкина.

[1] Maekawa S., Kikkawa T., Chudo H., Ieda J., Saitoh E., *J. Appl. Phys.*, **133**, 020902, (2023).

[2] Туров Е.А., Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов, *Изд. АН СССР*, (1963).

[3] Дзялошинский И.Е., *ЖЭТФ*, **46**, 1420, (1964).

[4] Дзялошинский И.Е., *ЖЭТФ*, **37**, 881, (1959).

РАЗРАБОТКА НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ДОЗИМЕТРИИ, ДВА МЕХАНИЗМА УСИЛЕНИЯ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Калинкин М.О.¹, Акулов Д.А.¹, Келлерман Д.Г.¹, Зубков В.Г.¹,

Абашев Р.М.^{1,2}, Медведева Н.И.¹, Сюрдо А.И.^{1,2}

¹Институт химии твердого тела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

kalinkin@ihim.uran.ru

В работе рассмотрен синтез, оптические и дозиметрические свойства ряда оптических матриц, допированных ионами РЗЭ. Показано, что при введении РЗЭ реализуются два механизма усиления термолюминесценции, которые позволяют получить конкурентоспособные дозиметрические материалы.

Ключевые слова: термолюминесценция, РЗЭ, дефекты.

В связи с широким распространением радиоактивных изотопов и других источников ионизирующих излучений в промышленности и повседневной жизни человека, высокоточная оценка дозы ионизирующего излучения, накопленной тканями человеческого организма, является актуальной задачей. Благодаря возможности работать в накопительном режиме, методы люминесцентной дозиметрии получили широкое распространение. Ключевую роль в качественной оценке полученной дозы ионизирующего излучения играет материал люминесцентного детектора, в качестве которого используют широкозонные полупроводники [1].

В работе рассмотрен ряд оптических матриц состава LiMgPO_4 , LiMgBO_3 , MgB_4O_7 , $\text{Li}_9\text{Mg}_3[\text{PO}_4]_4\text{F}$ и $\text{Na}_5\text{B}_2\text{P}_3\text{O}_{13}$, следует отметить, что некоторые из них рассматривались в качестве дозиметрических материалов впервые. Установлено, что данные фазы являются широкозонными полупроводниками с величинами щели 6.9, 5.5, 9, 5.8 и 5.8 эВ, соответственно. Первопринципные расчеты позволили определить положение уровней нейтральных и заряженных дефектов в запрещенной зоне и предположить, какие из дефектов являются ловушками электронов и дырок, образовавшихся под действием ионизирующего излучения, а какие – центрами рекомбинации зарядов. Показано, что рассматриваемые матрицы соответствуют критериям, предъявляемым к дозиметрическим детекторам, они химически и термически стабильны и имеют эффективные атомные номера, сопоставимые с тканями человеческого тела. Выход термолюминесценции у недопированных матриц недостаточен для практического применения, распространенным методом увеличения интенсивности сигнала является введение редкоземельных элементов.

В работе проведено детальное изучение спектров рентгенолюминесценции (РЛ), фотолюминесценции (ФЛ) и термолюминесценции (ТСЛ) LiMgPO_4 , LiMgBO_3 , MgB_4O_7 , $\text{Li}_9\text{Mg}_3[\text{PO}_4]_4\text{F}$ и $\text{Na}_5\text{B}_2\text{P}_3\text{O}_{13}$, допированных рядом РЗЭ. Впервые обнаружено, что люминесценция в рассмотренных матрицах может осуществляться по двум сценариям: для одной группы РЗЭ спектры РЛ, ФЛ и ТСЛ содержат набор линий, отражающих 4f–4f переходы соответствующего РЗЭ, а для другой группы этих линий нет, и наблюдается многократно усиленный спектр, характерный для чистой матрицы (рисунок). Высказано предположение о том, что в последнем случае происходит передача энергии от РЗЭ молекулярным комплексам, включающим в себя дефекты. Предложена схема, объясняющая наличие двух механизмов высвечивания при РЛ, ФЛ и ТСЛ.

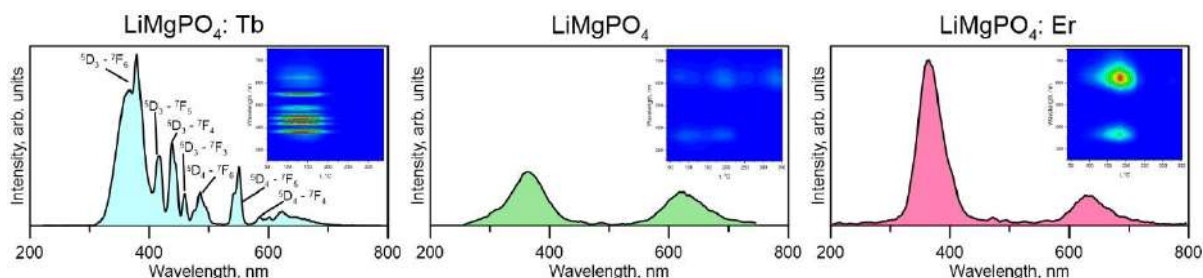


Рисунок. Спектры рентгено- и термолюминесценции LiMgPO_4 , LiMgPO_4 : Er, LiMgPO_4 : Tb

Для соединений, обладающих наибольшей интенсивностью высвечивания (LiMgPO_4 :Er, LiMgBO_3 :Tm, $\text{Li}_9\text{Mg}_3[\text{PO}_4]_4\text{F}$: Dy, $\text{Na}_5\text{B}_2\text{P}_3\text{O}_{13}$: Dy), изучены основные дозиметрические характеристики. Показано, что все предложенные материалы обладают линейной дозовой зависимостью в области, необходимой для персональной дозиметрии, малой потерей дозиметрической информации при хранении. Кроме того, подтверждена возможность использования разработанных нами материалов как при термической, так и при оптической стимуляции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-13-00068, <https://rscf.ru/project/25-13-00068/>.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРЕКУРСОРОВ НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ CsPbBr₃ В СТЕКЛЕ

Харисова Р.Д., Кузьменко Н.К., Зырянова К.С.,
Шеремет В.Г., Ратова А.Д., Миронов Л.Ю.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
rufina.d.kharisova@gmail.com

При помощи изменения концентрации прекурсоров – свинца и брома – исследованы стадии формирования нанокристаллов CsPbBr₃ в борогерманатном стекле. Выделены три стадии: свинцово-бромидные кластеры, нанокристаллы перовскитов и центр с люминесценцией на 470 нм.

Ключевые слова: перовскиты, свинцово-галогенидные кластеры, борогерманатное стекло.

Стеклокерамики с нанокристаллами свинцово-галогенидных перовскитов CsPbHal₃ являются перспективными люминесцентными материалами, излучающими в видимом диапазоне. Среди их применений светодиоды, рентгеновские сцинтилляторы, концентраторы для солнечных батарей и сенсоры [1]. Несмотря на большое количество исследований, кинетика кристаллизации нанокристаллов перовскитов остается неясной, т.к. из-за ионной природы этих кристаллов формирование в процессе синтеза происходит практически мгновенно [2]. В данной работе исследовалось формирование нанокристаллов перовскитов CsPbBr₃ в матрице борогерманатного стекла.

Для исследования синтезировано стекло системы B₂O₃ – GeO₂ – Na₂O – ZnO – P₂O₅ – TiO₂ – K₂O – Cs₂O – PbO – Br⁻ с различными концентрациями прекурсоров перовскитов: 0,2 – 5,0 мол.% PbO и 0,7 – 4,7 мол.% Br⁻. Синтез проводился при 950 °С в течение 30 мин.

По результатам структурных и спектральных исследований выделено 3 стадии формирования нанокристаллов перовскитов CsPbBr₃. (1) При малых концентрациях свинца и брома выделяются свинцово-бромидные кластеры, обладающие широкополосной голубой люминесценцией с максимумом на 430 нм, анизотропией излучения 0,15 и средним временем жизни люминесценции порядка 200 нс. Такие метал-галогенидные кластеры до настоящего времени наблюдались только в органических матрицах [3], содержащих прекурсоры перовскитов. (2) При концентрациях PbO и Br⁻ выше 0,6 и 2,1 мол.%, соответственно, выделяются нанокристаллы перовскитов CsPbBr₃ с характерной зеленой люминесценцией с максимумом 500 – 520 нм и средним временем жизни 5 – 150 нс. Максимальный квантовый выход люминесценции стеклокерамик с нанокристаллами перовскитов составил 53%. При увеличении концентрации оксида свинца и ионов брома выше 2,6 и 3,7 мол.%, соответственно, нанокристаллы перовскитов из кубической модификации переходят в орторомбическую модификацию. (3) В составах с промежуточными концентрациями свинца и брома (0,6 – 2,6 мол.% PbO и 2,1 – 3,7 мол.% Br⁻) с люминесценцией перовскитов появляется дополнительная полоса люминесценции с максимумом на 470 нм и временем жизни 3 – 25 нс. Спектры люминесценции исследуемых оптических центров представлены на рисунке.

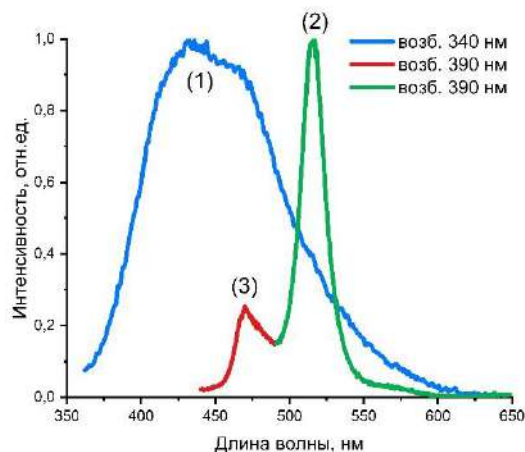


Рисунок. Спектры люминесценции различных оптических центров: (1) свинцово-бромидные кластеры (0,5 мол.% PbO, 1,6 мол.% Br⁻), (2) нанокристаллы перовскитов CsPbBr₃ и (3) центр с люминесценцией на 470 нм (1,4 мол.% PbO, 2,9 мол.% Br⁻)

- [1] Samiei S., Soheyli E., Vighnesh K., Nabiyouni G., Rogach A. L., *Small*, **20**, №17, 2307972, (2024).
- [2] Pradhan N., *ACS Physical Chemistry Au*, **2**, №4, 268-276, (2022).
- [3] Zhou C., Xu L. J., Lee S., Lin H., Ma B., *Advanced Optical Materials*, **9**, №18, 2001766, (2021).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ХИРАЛЬНЫХ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖК С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Резцов Т.В.¹, Черных А.В.¹, Орлова Т.², Петров Н.В.^{1,3}, Езерский А.С.¹

¹Университет ИТМО, НОЦ Фотоники и Оптоинформатики, Санкт-Петербург, Россия

²Ереванский государственный университет, Институт Физики, Ереван, Армения

³Харбинский политехнический институт, Факультет Физики, Харбин, Китай

tikhon_reztsov@itmo.ru

В данной работе представлен метод поляризационной голографической микроскопии для исследования топологических структур в жидких кристаллах. Показана возможность восстановления матрицы Джонса, соответствующей ЖК-образцу, при различных длинах волн зондирующего излучения.

Ключевые слова: цифровая поляризационная голография, жидкий кристалл, хиральный нематик.

Хиральные нематические жидкие кристаллы (ЖК) способны формировать сложные топологические структуры [1]. Подобные структуры, например тороны, представляют интерес для фотонных технологий. Однако изучение их влияния на характеристики проходящего света требует высокоточной оптической диагностики. Актуальными являются методы цифровой голографии, позволяющие получать пространственные распределения фазовых и поляризационных характеристик [2]. В данной работе на основе схемы Маха-Цендера была реализована оптическая система поляризационного голографического микроскопа (рисунок).

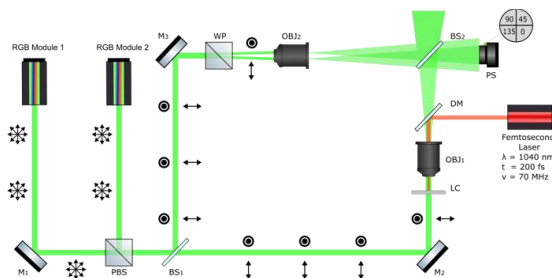


Рисунок. Поляризационный голографический микроскоп. BS (Beam Splitter) – светоделитель; DM (Dichroic Mirror) – дихроичное зеркало; LC (Liquid Crystal) – жидкий кристалл; M (Mirror) – зеркало; OBJ (Objective) – объектив; PBS (Polarizing Beam Splitter) – поляризационный светоделитель; PS (Polarizing Sensor) – поляризационный сенсор; RGB module – модуль с красным (R), зеленым (G) и синим (B) лазерами; WP (Wollaston Prism) – призма Волластона

Данная установка обеспечивает полное описание как амплитудно-фазовых, так и поляризационных характеристик светового поля за одну экспозицию благодаря поляризационной камере, обеспечивающей одновременную регистрацию четырех поляризационных интерферограмм, соответствующих линейной ориентации поляризации при 0°, 45°, 90° и 135°. Система адаптирована для работы с лазерами 450 нм, 532 нм и 650 нм. Формирование торонов индуцировалось фемтосекундным ИК-лазером (1040 нм, длительность импульса: 200 фс, частота: 70 МГц). Исследование проводилось на ЖК-ячейке толщиной 10 мкм. В данном исследовании использовалась хиральная жидкокристаллическая смесь на основе нематического жидкого кристалла E7 (HPC850600-100, HCSN, Китай) с хиральной добавкой S811 (Merck).

Обработка полученных интерферограмм позволяет восстановить полную матрицу Джонса, соответствующую наблюдаемой области ЖК ячейки. Анализ полученных данных демонстрирует, что тороны модулируют поляризацию света, демонстрируя эффекты, аналогичные q-пластинам [3]. А использование различных длин волн подтвердило универсальность метода для спектральных исследований. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию параметров лазерного воздействия и применения поляризационного голографического микроскопа в сочетании с формализмом Джонса для изучения различных топологических структур в ЖК. Результаты работы открывают перспективы для создания перестраиваемых фотонных устройств.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания (№ FSER-2025-0007).

[1] Smalyukh I.I., Lansac Y., Clark N.A., Trivedi R.P., *Nature Materials*, **9**, №2, 139-145, (2010).

[2] Shalev A., Misura A., Georgieva A., Chernykh A., Petrov N., Orlova T., Lobanov I., Aksenova E., Uzdin V., Kiselev A., *Optics Letters*, **50**, №16, 4866-4869, (2025).

[3] Petrov N.V., Sokolenko B., Kulya M.S., Gorodetsky A., Chernykh A.V., *Light: Advanced Manufacturing*, **3**, №1, 1, (2022).

**СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА
СВИНЦОВО- ГЕРМАНО-ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ
АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ МАРГАНЦА**

**Асеев В.А.¹, Федоров Ю.К.¹, Севастьянова И.М.¹, Леонидова А.А.¹,
Гаврилова К.А.¹, Готби М.²**

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Университет Курдистана, Соннидж, Иран

aseev@oi.ifmo.ru

Синтезирован ряд стекол $(100-x)\text{Pb}(\text{PO}_3)_2 - x\text{GeO}-\text{MnO}_2$ ($x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60$) мол.%.
проведено исследование комбинационного рассеяния и расчет нелинейной
восприимчивости, спектрально-люминесцентных свойств марганца в стеклах.

Ключевые слова: свинцово-германо-фосфатные стекла, марганец, нелинейная
восприимчивость.

Люминесценция ионов марганца в различных оптических материалах находит широкое применение в таких областях как светодиодное освещение [1], дозиметрия [2], а также спектральная коррекция спектральной чувствительности [3, 4]. Марганец является переходным металлом с электронной конфигурацией $3d^5 4s^2$, и в стеклах может иметь валентности от +2 до +7. Наиболее интересными для применений в оптике являются ионы Mn^{2+} и Mn^{4+} , поскольку для таких валентностей марганца наблюдается интенсивная люминесценция в оранжево-красной области спектра. Люминесценция марганца обусловлена внутриконфигурационными переходами на d-d уровнях и является чувствительной для состава и симметрии окружения. Изменения химического состава окружающей ион матрицы приводят к изменению величины энергетического зазора между электронными уровнями и, как следствие, к смещению максимумов поглощения и люминесценции иона марганца, то есть выбор состава матрицы позволяет оптимизировать люминесценцию марганца под конкретные применения. Стекла в качестве матрицы для иона марганца обладают рядом достоинств таких как возможность широкой модификации состава, возможность синтеза в больших объемах и хорошие эксплуатационные свойства. Свинцово-германо- фосфатные стекла обладают хорошей химической стабильностью и высоким содержанием ионов тяжелых металлов (свинца и германия), что приводит к уширению полосы люминесценции, а также в высоком нелинейно оптическим свойствам. Таким образом, в качестве цели данной работы является исследование структуры свинцово-германо-фосфатных стекол и нелинейно-оптических свойств, а также влияние содержание германия на спектрально-люминесцентные свойства иона марганца. В задачи входило исследование: влияния концентрации германия на структуру стекол методом спектроскопии комбинационного рассеяния и расчет нелинейной восприимчивости, спектрально-люминесцентных свойств марганца в стеклах.

Для этого был синтезирован ряд стекол $(100-x)\text{Pb}(\text{PO}_3)_2 - x\text{GeO}-\text{MnO}_2$ ($x = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60$) мол.%, MnO_2 вводился сверх 100% в количестве 3 мол%.

Исследования показали, что оксид германия разупорядочивает фосфатную структуру, оказывая на нее деполимеризующее действие, но при этом создает свои мостиковые тетраэдры, соединенные между собой в виде колец и взаимодействующие с фосфатными. Плотность свинцово-германо-фосфатных стекол с увеличением концентрации оксида германия почти не изменяется и составляет приблизительно $4,8 \pm 1$ г/см³. С увеличением концентрации германия в стеклах метафосфат свинца превращается сначала в пирофосфат, затем в ортофосфат. Изменение содержания оксида германия с 10 до 60 мол% не влияет на положение максимума люминесценции марганца на 640 нм. Это свидетельствует о том, что марганец находится в октаэдрической координации и внедряется в области фосфатных группировок. По данным абсорбционной спектроскопии показано, что ионы марганца в данных стеклах находятся в двухвалентном и трехвалентном состоянии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-43-20020).

[1] Sevastianova I. et al., *J. of Luminescence*, **205**, 495-499, (2019).

[2] Holovey V.M. et al., *Radiation Effects & Defects in Solids*, **166**, 7, 522-528, (2011).

[3] DeRose P.C. et al., *J. of Luminescence*, **129**, 4, 349-355, (2009).

[4] Choquette S.J. et al., *Applied spectroscopy*, **61**, 2, 117-129, (2007).

РАДИАЦИОННОЕ НАКОПЛЕНИЕ, ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ, ОПТИЧЕСКОЕ И ТЕРМИЧЕСКОЕ ВЫСВЕЧИВАНИЕ И СВОЙСТВА ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ В KCl-Tl₂SO₄

Фролова А.С.^{1,2}, Мартынович Е.Ф.^{1,2}

¹Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

frizska888@mail.ru

Исследованы физические процессы в новом объёмном нелинейном фотографическом материале с люминесцентной визуализацией изображений на основе кристалла KCl-Tl₂SO₄, протекающие при его взаимодействии с оптическим излучением различной интенсивности и с жёсткой радиацией.

Ключевые слова: лазер, кристалл, дефектообразование.

На основе кристалла KCl-Tl₂SO₄ был создан новый нелинейный объёмный фотографический материал с люминесцентной визуализацией изображений [1-3]. Подобные материалы позволяют более детально изучать картину взаимодействия интенсивного лазерного излучения с прозрачными средами, благодаря запоминанию пространственных распределений, формирующихся вследствие эффектов самовоздействия. В настоящее время представляет интерес создание и изучение новых фотографических материалов такого типа с различной степенью взаимодействия с лазерным излучением.

Исследуемые образцы были выращены методом Стокбаргера в запаянной кварцевой ампуле из расплава KCl с добавлением 2% соли Tl₂SO₄. При исследовании кристаллов в работе [3] установлено, что в них под действием интенсивного фемтосекундного лазерного излучения образуются ранее неизвестные в сопоставимых кристаллах KCl и KCl-TlCl новые спектральные полосы фотолюминесценции с максимумами при 440 и 640 нм, принадлежащие двум различным центрам неизвестной природы.

Целью данной работы было исследование создания и накопления люминесцирующих центров под действием оптического и рентгеновского излучений и изучение оптических и термических характеристик исследуемого фотографического материала на основе указанного соединения.

В частности, исследовались спектры фотолюминесценции и оптического поглощения образцов, облученных фемтосекундным излучением титан-сапфирового лазера, пикосекундным излучением диодных лазеров УФ и видимого диапазонов, 4-й и 5-й гармониками наносекундного неодимового лазера и рентгеновским излучением. Изучались температурные зависимости спектров, выхода и длительности люминесценции. Исследовалась изотермическая релаксация люминесценции после ионизирующего облучения. Проводились исследования облученных образцов методами оптически стимулированной люминесценции и термостимулированной люминесценции. Эти эксперименты были проведены, главным образом, с помощью микроскопа MicroTime 200, фирмы PicoQuant gmbh, спектрометра Ocean Optics QE65000, криостата Microstat^N фирмы Oxford Instruments. На рисунке показаны некоторые результаты измерений.

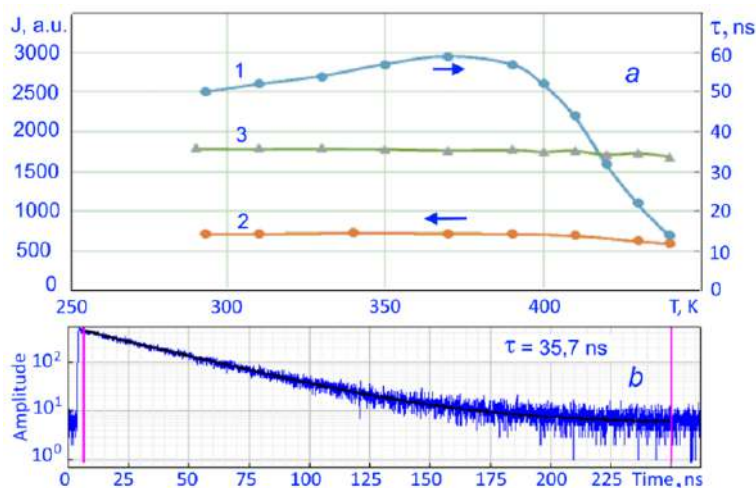


Рисунок. Температурные зависимости (а) интенсивности (1 и 2) и времени затухания (3) люминесценции 640 нм; b – кинетика (разгорание и затухание люминесценции) и значение времени затухания при комнатной температуре. Стрелки показывают направление изменения температуры

[1] Мартынович Е.Ф., Патент РФ на изобретение № 2758567 C1, 29.10.2021, (2021).

[2] Мартынович Е.Ф., Патент РФ на изобретение № 2781512 C1, 12.10.2022, (2022).

[3] Martynovich E.F., Frolova A.S., Rakevich A.L., *Laser & Photonics Reviews*, **19**, 2401252, (2025).

СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПРОЗРАЧНЫХ ЛИТИЕВОАЛЮМОСИЛИКАТНЫХ СТЕКЛОКЕРАМИК, СОДЕРЖАЩИХ НАНОКРИСТАЛЛЫ (Y,Yb)NbO₄

Дымшиц О.С.^{1,2}, Алексеева И.П.², Волокитина А.А.¹, Богданов К.В.³, Скопцов Н.А.⁴, Юмашев К.В.⁴, Жилин А.А.⁵

¹ФТИ имени А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия

³Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

⁴БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь

⁵АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

vodym1959@gmail.com

Созданы стекла и прозрачные стеклокерамики литиевоалюмосиликатной системы, содержащие наноразмерные (5-20 нм) кристаллы (Y,Yb)NbO₄ и твердые растворы β-кварца. Исследованы их структура и спектральные свойства. Наблюдаемые спектральные изменения обусловлены превращениями ниобатной фазы.

Ключевые слова: ниобаты иттрия-иттербия, стеклокерамика, люминесценция.

Было синтезировано модельное стекло состава 18 Li₂O, 27 Al₂O₃, 55 SiO₂ (мол%) [1], в которое были введены 3.22 мол% RE₂O₃ и 3.22 мол% Nb₂O₅, где RE₂O₃ обозначает смесь Yb₂O₃ и Y₂O₃. Концентрация Yb₂O₃ в стеклах составляет 0.5, 1.5 и 3.0 мол%. Ниобаты редких земель играют роль как функциональных люминесцирующих кристаллических фаз, так и нуклеатора объемной кристаллизации литиевоалюмосиликатных твердых растворов со структурой β-кварца. Стекла массой 300 г были синтезированы при температуре 1580 °С в течение 4 часов с гомогенизацией расплава. Они были термообработаны в интервале температур 700 – 1000 °С. Структура и фазовые превращения стекол и стеклокерамик при термической обработке были исследованы методами дифференциальной сканирующей калориметрии, рентгенофазового анализа (РФА) и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Были измерены их спектры поглощения и люминесценции.

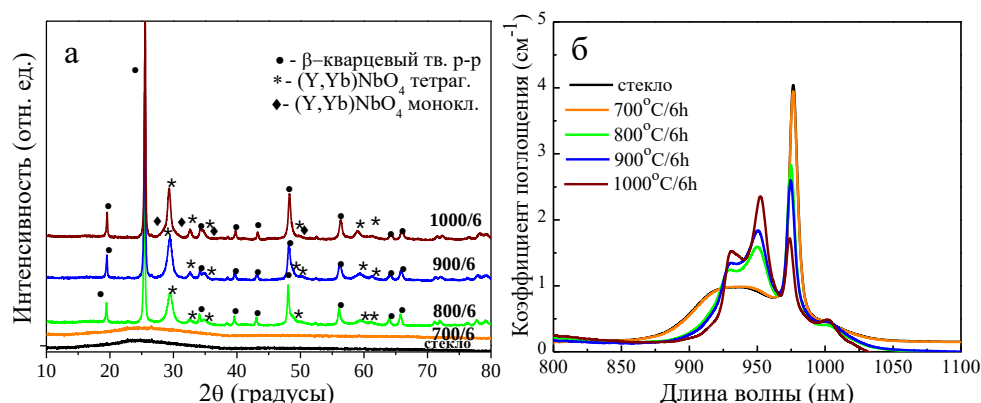


Рисунок. Дифрактограммы (а) и спектры поглощения (б) исходного и термообработанного стекла с содержанием 0.5 мол% Yb₂O₃

Согласно данным РФА (рисунок а), исходные стекла рентгеноаморфны. Нанокристаллы ортониобатов (Yb,Y)NbO₄ со структурой флюорита кристаллизуются при термообработке при 720 °С, кристаллы с искаженной тетрагональной структурой появляются при термообработке в интервале температур 800-900 °С, одновременно выделяется основная кристаллическая фаза – литиевоалюмосиликатные твердые растворы со структурой β-кварца. Выделение твердых растворов β-кварца приводит к близким к нулю значениям коэффициента термического расширения стеклокерамик. В стеклокерамиках, полученных термообработкой при 1000 °С, обнаружены нанокристаллы ортониобатов иттрия-иттербия моноклинной и тетрагональной форм. Эти структурные превращения приводят к значительным изменениям в спектрально-люминесцентных свойствах материалов (рисунок б). Обнаружена интенсивная люминесценция ионов Yb³⁺ на длине волны ~1 мкм.

Авторы выражают благодарность К.В. Щербакову, М.Я. Центер и П.А. Лойко за помощь с проведением эксперимента и его обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Грант № 25-23-20131).

[1] Alekseeva I., Dymshits O., Ermakov V., Zhilin A., Petrov V., Tsenter M., *J. Non- Cryst. Solids*, **354**, 4932-4939, (2008).

ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ ИТО ДЛЯ УСТРОЙСТВ ФОТОНИКИ

Жидик Ю.С.^{1,2}

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

zhidikyur@mail.ru

Приводятся результаты разработки технологии осаждения низкоомных оптически прозрачных плёнок ИТО методом реактивного магнетронного распыления. Исследованы их основные оптические и электрофизические свойства, а также вопросы их применения в устройствах фотоники.

Ключевые слова: ИТО, прозрачные проводящие материалы, фотоника.

Стремительное развитие фотоники задает темпы создания принципиально новых устройств, реализующих свою функциональность за счёт особенностей зонной структуры, эффектов размерного квантования, явлений, возникающих на гетерограницах. Модернизация существующих и разработка новых приборов оптоэлектроники и радиофотоники становится возможной благодаря применения полифункциональных оптических материалов. Наиболее перспективным из таких полифункциональных материалов является оксид индия, легированный атомами олова (indium tin oxide – ИТО). Пленки ИТО обладают рекордно низким удельным электрическим сопротивлением среди класса прозрачных проводящих оксидов, при этом имеют высокую прозрачность в оптическом диапазоне, снижающуюся в ИК области спектра. В последнее время разными коллективами все чаще сообщается об обнаружении и исследовании новых перспективных для практического использования свойств пленок ИТО: фотоэлектрический и фотоманитный отклик при облучении УФ излучением, модуляция показателей преломления и поглощения под действием электрического поля и т.д.

Целью доклада является обсуждение разработанных автором технологических основ осаждения тонких низкоомных оптически прозрачных плёнок ИТО методом магнетронного распыления и результатов комплексного исследования их оптических и электрофизических свойств, а также результатов формирования на их основе полифункциональных покрытий для приборов фотоники.

Синтез пленок ИТО с величиной удельного сопротивления менее $1 \cdot 10^{-4}$ Ом·см методом реактивного магнетронного распыления мишени In(90%)/Sn(10%) осуществляется в атмосфере напускаемой в рабочую камеру смеси газов Ar / O₂ при строго определенном соотношении потоков равном 3 к 1 с последующим после осаждения пленок высокотемпературным отжигом [1]. В процессе высокотемпературного отжига концентрация носителей заряда увеличивается с $7,33 \cdot 10^{20}$ см⁻³ до $2,25 \cdot 10^{21}$ см⁻³, а их подвижность увеличивается с 2,7 см²/(В·с) до 32,3 см²/(В·с) [1, 2]. Доказано, что пленки ИТО, осажденные по разработанной технологии, являются вырожденным полупроводником n-типа проводимости с положением уровня Ферми на (0,09 – 0,11) эВ выше дна зоны проводимости, эффективной массой носителей заряда (0,36 – 0,38)·m₀, коэффициентом пропускания в видимой области спектра на уровне 80 – 90%, показателем преломления в видимой области спектра в диапазоне от 1,82 до 2,17 [3].

Указанные параметры пленок ИТО позволили исследовать перспективы их применения в качестве оптически прозрачных электродов, чувствительных к УФ излучению слоев, активного материала для газочувствительных сенсоров [4], слоя растекания тока полупроводникового светодиода на основе InGaN/AlGaIn/GaN гетероструктуры [5], канального слоя оптически прозрачного тонкопленочного транзистора, а также в качестве плазмонного слоя адсорбционного электрооптического модулятора на основе волноводов из SiN.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.

[1] Zhidik Y., Ivanova A., Smirnov S., Zhuk K., Yunusov I., Troyan P., *Coatings*, **12**, №12, 1868, (2022).

[2] Жидик Ю.С., Троян П.Е., Козик В.В., Козюхин С.А., Заболотская А.В., Кузнецова С.А., *Известия вузов. Физика*, **63**, №7, 31-35, (2020).

[3] Жидик Ю.С., Чистоедова А.А., Жидик Е.В., Петрюк А.Е., *Прикладная физика*, №2, 59-63, (2020).

[4] Жидик Ю.С., Жук К.В., Иванова А.А., Майкова А.В., Кузьмин А.С., Мостовщиков А.В., *Прикладная физика*, №6, 72-77, (2023).

[5] Zhidik Y.S., *Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024)*, 1126-1131, (2024).

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОНИЖЕНИЯ СИММЕТРИИ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОЛОТЫХ НАНОПОЛУМЕСЯЦЕВ

Лобанова Е.М.¹, Боченков В.Е.¹, Бахратов И.А.²

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²ФТИАН им. К.А. Валиева, Москва, Россия

katerina.m.lobanova@gmail.com

Золотые нанополумесяцы, полученные модифицированной коллоидной литографией, демонстрируют асимметрией-индуцированные плазмонные эффекты: сдвиг резонансов и локализацию поля, раскрывая ключевую связь геометрии с оптическими свойствами, перспективные для фундаментальных и прикладных приложений нанофотоники.

Ключевые слова: плазмоника, коллоидная литография, наноматериалы.

Металлические наночастицы обладают уникальными оптическими свойствами, обусловленными явлением локализованного поверхностного плазмонного резонанса. Эти свойства существенно зависят от морфологических характеристик частиц, а также от свойств окружающей среды [1]. Особый интерес представляют наночастицы в форме нанополумесяца, чья специфическая геометрия приводит к исключительно сильной локализации электромагнитного поля вблизи острых краев структуры [2]. Такая локализация поля создает области с экстремальным усилением - так называемые "горячие точки", которые находят применение в поверхностно-усиленной спектроскопии и могут значительно повысить чувствительность оптических сенсоров для детектирования молекул. Особенно перспективными являются анизотропные хиральные структуры, в которых нарушение симметрии вызывает появление дополнительных резонансных мод и усложнение спектрального отклика, а также для которых характерно различие в поглощении левого и правого циркулярно поляризованного света, что может быть крайне полезно при изучении свойств хиральных аналитов в биосенсорике. Несмотря на многочисленные исследования плазмонных наноструктур, систематический анализ влияния асимметрии на оптические характеристики нанополумесяцев до сих пор отсутствует.

В работе представлено комплексное исследование оптических свойств золотых нанополумесяцев с нарушенной симметрией, синтезированных методом модифицированной коллоидной литографии [3]. Методом FDTD-моделирования, а также экспериментально показано, что снижение симметрии частиц вызывает значительные изменения их плазмонных характеристик. Наблюдается сдвиг дипольной плазмонной моды в ближний ИК-диапазон (до 1350 нм), появление дополнительных резонансных мод высших порядков и формирование локализованных "горячих точек" с высоким усилением электрического поля (до $|E|/|E_0|=82$).

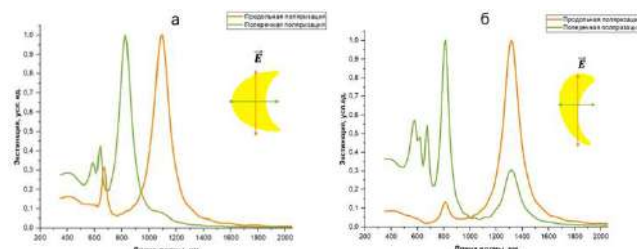


Рисунок. Численные спектры экстинкции золотого нанополумесяца: а) симметричной формы; б) асимметричной формы

Наибольшая концентрация поля обнаруживается вблизи тонкого острого края асимметричных структур (рисунок). Эти эффекты объясняются геометрически-зависимым перераспределением поверхностных зарядов. Полученные результаты демонстрируют четкую взаимосвязь между геометрией наночастиц и их плазмонными характеристиками, что открывает новые возможности для разработки высокочувствительных плазмонных сенсоров, создания субволновых оптических элементов и развития методов поверхностно-усиленной спектроскопии.

[1] Jain P.K., et al., *Acc Chem Res*, **41**, №12, 1578-1586, (2008).

[2] Bochenkov V.E., Sutherland D.S., *Nano letters*, **13**, 3, 1216-1220, (2013).

[3] Шевчук С.Л., Татаринцев А.А., Лобанова Е.М., Боченков В.Е., *Труды ФТИАН. ФГБУ «Издателство Наука»*, **31**, 93-99, (2023).

ФОСФОРЕСЦЕНТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ МЕДИ(I) ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СЕНСОРОВ

Критченков И.С., Критченкова А.Х.

Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Республика Беларусь
ilya.kritchenkov@gmail.com

В работе исследованы комплексы меди(I) с тиамазолом, тиобарбитуровой кислотой, тиюрацилом и пропилтиоурацилом в качестве фосфоресцентных температурных сенсоров.

Ключевые слова: фосфоресценция, сенсоры температуры, комплексы меди(I).

Структурные формулы комплексов меди(I), явившихся объектами изучения в данной работе, представлены на рисунке 1. Комплексы 2-4 являются новыми и получены нами впервые. Для синтеза, описанного в литературе [1] кластера 1, нами разработана новая, более эффективная методика получения.

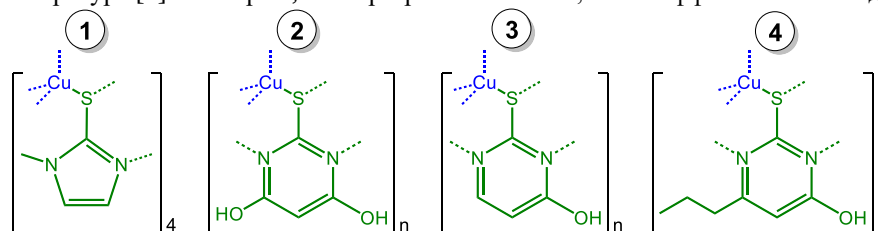


Рис. 1. Структурные формулы комплексов меди(I) с тиамазолом (1), тиобарбитуровой кислотой (2), тиюрацилом (3) и пропилтиоурацилом (4)

Фотофизические исследования данных соединений заключались в измерении электронных спектров поглощения, возбуждения и люминесценции в твердой фазе. Ниже представлены спектры люминесценции кластеров меди(I) (рис. 2А) тиамазолом (1), тиюрацилом (3) и пропилтиоурацилом (4). Кластер с тиобарбитуровой кислотой (2) не проявляет заметной фотолюминесценции.

Изучение комплекса с тиамазолом (1) показало, что интенсивность его эмиссии и время жизни возбужденного состояния зависят от температуры и проявляют практически одинаковую зависимость (рис. 2Б). Комплексы с тиюрацилом (3) и пропилтиоурацилом (4) не проявили температурной зависимости в данном интервале и могут быть использованы в качестве ратиометрического стандарта.

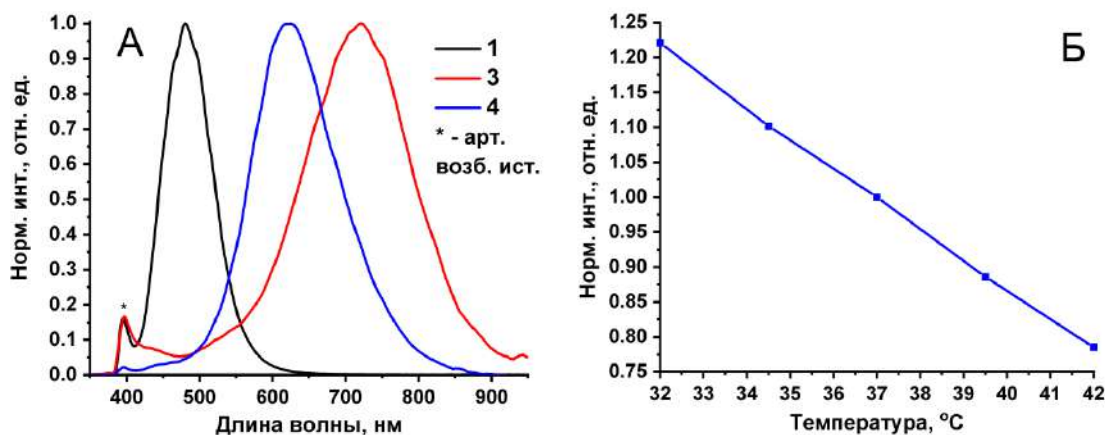


Рис. 2. А – Нормированные спектры фотолюминесценции кластеров меди(I) с тиамазолом (1), тиюрацилом (3) и пропилтиоурацилом (4). Б – Температурная зависимость нормированных при 37°C максимумов спектров люминесценции кластера меди(I) с тиамазолом (1)

Также нами получены композиты синтезированных комплексов меди(I) с природными полисахаридами, выполнены физико-механические и фотофизические эксперименты по определению люминесцентных и эксплуатационных характеристик итоговых сенсорных материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект № T24Y-004.

[1] Raper E.S., Creighton J.R., Clegg W., *Inorg. Chim. Acta.*, **183**, 179-187, (1991).

СВЕРХБЫСТРАЯ ФОТОНИКА И КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИКА

ФОТОНИКА НАНОСТРУКТУР ПРИ СВЕРХБЫСТРОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ: ОСНОВЫ ПЕТАГЕРЦОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Груздев В.Е.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

vge1782@mail.ru

Рассмотрены основы электронных процессов в наноструктурах, возбуждаемых сверхкороткими лазерными импульсами длительностью несколько фемтосекунд. Обсуждается возможность построить фундаментальную научную и технологическую основу петагерцовой опто-электроники и электроники, управляемой электрическим полем света.

Ключевые слова: петагерцовые технологии, наноструктуры, сверхкороткие лазерные импульсы.

Фундаментальные особенности переноса заряда в полупроводниках не позволяют создать транзисторы и диоды на основе полупроводников, способные работать на частотах выше нескольких гигагерц (ГГц; $1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$). Физической основой этого ограничения является столкновительная динамика свободных носителей заряда при диффузионном и дрейфовом движении в полупроводниках. Преодолеть это ограничение можно при использовании бесстолкновительной (или баллистической) динамики свободных носителей в материалах [1-8], когда максимальная скорость электронов на порядки превосходит скорость дрейфового движения. Приборы, использующие баллистическую динамику, способны работать на суб-петагерцовых и петагерцовых (ПГц; $1 \text{ ПГц} = 10^{15} \text{ Гц}$) частотах, соответствующих оптическому диапазону спектра. Таким образом, физическая основа петагерцовой электроники должна строиться на фотонике наноструктур, в которых баллистическая динамика электронов создаётся и поддерживается электрическими полями света, а размеры структур достаточно малы для обеспечения бесстолкновительного переноса заряда.

В этом докладе проведён краткий обзор физических основ ПГц приборов и экспериментов, подтверждающих ПГц динамику электронов [1-8]. Указано, что только с появлением лазерных импульсов с длительностью, близкой к одному периоду осцилляций электрического поля, стала возможна прямая верификация баллистической динамики электронов в наноструктурах на ПГц частотах [1-8]. Она основана на детектировании зависимости электрического сигнала, создаваемого одиночным сверхкоротким лазерным импульсом в наноструктурах, от фазового сдвига между пиком интенсивности и ближайшим положительным пиком электрического поля лазерного импульса [1-8]. Поскольку в случае дрейфовой динамики электронов такая зависимость полностью отсутствует, зависимость выходного электрического сигнала от фазового сдвига интерпретируется как прямой признак баллистической динамики электронов.

Электрический сигнал, создаваемый таким коротким импульсом света, ассоциируется с фемтосекундным импульсом электрического тока в выходных цепях наноструктур [1-7]. Генерация фемтосекундных импульсов тока получена за счёт туннелирования электронов в металлических наноструктурах [1-5] и за счёт баллистической динамики генерируемых светом свободных носителей заряда в плоских наноструктурах типа металл-полупроводник-металл [4-8]. Оба вида наноструктур используются как детекторы фазы [2-8] и сенсоры для воссоздания мгновенной временной структуры электрического поля импульсов [4, 8], содержащих несколько периодов колебаний электро-магнитного поля. Среди основных нерешённых проблем в данной области - отсутствие систематических и надёжных методов тестирования опто-электронного отклика наноструктур [9], необходимость подавления диффузионной компоненты сигналов (т. е., независящего от фазы лазерного импульса фоновый сигнал), которая на 3 - 5 порядков величины превышает полезный сигнал от баллистической динамики электронов, и необходимость подавления шумов [3-5, 10]. Рассмотрены недавно опубликованные методы тестирования наноструктур на основе измерения пространственного распределения их фотоэлектрического отклика [9], а также подходы по подавлению шумов на этапе тестирования наноструктур, сопряженных с обычной электроникой [10].

Среди других актуальных проблем обсуждаются возможность баллистического переноса заряда в металлах на расстояния, достаточные для реализации базовых элементов ПГц схем, и подходы к созданию петагерцовых аналогов для диодов, транзисторов и таймеров (задающих генераторов частоты), а также некоторые нетривиальные фундаментальные аспекты схемотехники ПГц приборов.

- [1] Hommelhoff, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 077401, (2006).
- [2] Rybka, et al., *Nature Photonics*, **10**, 667-670, (2016).
- [3] Li, et al., *Adv. Mater.*, **33**, 2100874, (2021).
- [4] Zhou, *Adv. Mater.*, **33**, 21001449, (2021).
- [5] Hassan M.Th, *ACS Photonics*, **11**, 334-338, (2024).
- [6] Schiffrin A., et. al, *Nature*, **493**, 70-74, (2013).
- [7] Paasch-Colberg T., et al, *Optica*, **3**, №12, 1358-1361, (2016).
- [8] Kruchinin S.Yu., Krausz F., Yakovlev V.S., *Rev. Mod. Phys.*, **90**, 021002, (2018).
- [9] Emmert L.A, et al., *CLEO 2024: Technical Digest Series* paper SH3H.4, (2024).
- [10] Schmucker L., et al., *Electronics*, **14**, №5, 902, (2025).

ЛИНЕЙНЫЙ ЭФФЕКТ ШТАРКА КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР ГЕНЕРАЦИИ ГАРМОНИК ПРИ МНОГОФОТОННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ АТОМОВ СИЛЬНЫМ КРОТКОВОЛНОВЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПОЛЕМ

Антонов В.А.¹, Хайрулин И.Р.^{1,2}, Емелин М.Ю.¹, Рябикин М.Ю.^{1,2}

¹Институт прикладной физики РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
antonov@ipfran.ru

Показано, что ключевым фактором генерации гармоник при многофотонном возбуждении атомов гелия сильным коротковолновым лазерным полем являются переходы из водородоподобных суперпозиционных связанных состояний, испытывающих линейный эффект Штарка.

Ключевые слова: генерация высоких гармоник, многофотонное возбуждение, линейный эффект Штарка.

В настоящее время наиболее когерентные источники вакуумного ультрафиолетового и рентгеновского излучения, а также источники наиболее коротких электромагнитных импульсов, основаны на генерации гармоник лазерного поля высокого порядка (ГГВП) [1]. Большая часть работ по ГГВП посвящена режиму квазистатической ионизации вещества длинноволновым лазерным полем; при этом ГГВП обусловлена рекомбинацией ускоренного лазерным полем электрона с родительским остовом [2]. В то же время эффективность ГГВП многократно возрастает при переходе в многофотонный режим возбуждения и ионизации вещества [3]. В этом случае, однако, возрастает и роль связанных состояний, переходы между которыми в достаточно коротковолновом лазерном поле становятся доминирующим механизмом генерации гармоник с энергиями фотонов порядка потенциала ионизации атома [4].

В данной работе аналитически и численно показано, что в условиях многофотонного возбуждения атома гелия и его однофотонной ионизации из возбуждённых состояний сильным коротковолновым лазерным полем, частота и частоты Раби которого на переходах между резонансным состоянием и другими возбуждёнными состояниями с тем же главным квантовым числом существенно превосходят частоты этих переходов, основным механизмом ГГВП является формирование водородоподобных суперпозиционных связанных состояний, энергии которых зависят от мгновенной фазы лазерного поля вследствие линейного эффекта Штарка. Энергии переходов из этих суперпозиционных состояний в основное состояние атома оказываются гармонически промодулированы во времени с лазерной частотой и в определённые моменты времени существенно превышают невозмущённые значения энергий возбуждения связанных состояний, что приводит к генерации, в том числе, гармоник с энергиями фотонов, существенно превышающими как невозмущённый потенциал ионизации атома, так и его сумму с максимальной кинетической энергией электрона в лазерном поле, которая определяет частоту отсечки при ГГВП в режиме квазистатической ионизации вещества [2], см. рисунок.

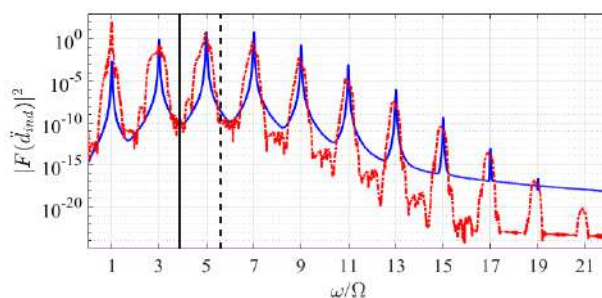


Рисунок. Спектральная плотность мощности индуцированного дипольного ускорения атома гелия, построенная на основе аналитического (синяя сплошная линия) и численного (красный штрих-пунктир) решений нестационарного уравнения Шрёдингера. Частота поля – $\Omega = 0.235$ а.е. (в области четырёхфотонных резонансов), пиковая интенсивность – 10^{15} Вт/см². Чёрная сплошная вертикальная линия соответствует невозмущённому потенциалу ионизации атома, черная штриховая линия – энергии отсечки при ГГВП в квазистатическом лазерном поле [2]

Рассмотренный режим ГГВП не основан на специфических свойствах атома гелия и, по-видимому, может наблюдаться и в других атомарных газах в условиях их многофотонного возбуждения и однофотонной ионизации из возбуждённых состояний.

Данная работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-12-00461.

[1] Рябикин М.Ю., Емелин М.Ю., Стрелков В.В., *УФН*, **193**, 382-405, (2023).

[2] Corkum P.B., *Phys. Rev. Lett.*, **71**, 1994-1997, (1993).

[3] Singh M., Fareed M.A., Strelkov V. et al., *Optica*, **8**, 1122-1125, (2021).

[4] Antonov V.A., Khairulin I.R., Emelin M.Yu. et al., *Phys. Rev. A*, **111**, 053502, (2025).

ОПТИЧЕСКИЕ СОЛИТОНЫ: ОТ НАНО- ДО ФЕМТОСЕКУНД

Сазонов С.В.

НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия

Представлен теоретический анализ различных оптических солитонов и механизмов их формирования при воздействиях импульсного лазерного излучения на резонансные и нерезонансные среды. Рассмотрены солитоны, так или иначе проявившие себя в нелинейной оптике, начиная с 1960-х годов по настоящее время. Сюда входят квазимонохроматические солитоны, обладающие ярко выраженной несущей частотой, а также широкополосные солитоны длительностью до одного периода оптических колебаний. При этом абсолютные значения временной длительности солитонов лежат в интервале от нано- до фемтосекунд.

Ключевые слова: оптический солитон, предельно короткий импульс.

Солитон представляет собой уединенную волну, способную распространяться на большие расстояния без искажений волнового профиля. Математики, занимающиеся теорией нелинейных волн, предпочитают более строгое определение этого понятия. Они говорят о солитонах как о решениях интегрируемых нелинейных волновых уравнений в виде уединенных волн, способных восстанавливать свои исходные профили после упругих взаимодействий между собой [1]. Здесь весьма нетривиальным в приложении к нелинейным уравнениям в частных производных представляется их интегрируемость. В частности, это означает возможность решить задачу Коши для таких уравнений. В значительной степени свойство интегрируемости связано с упругим взаимодействием солитонов друг с другом.

Физики в понятие «солитон» вкладывают более широкий круг уединенных волн, не интересуясь свойством интегрируемости исходных уравнений. Важным является то обстоятельство, что солитоны должны быть устойчивыми по отношению к малым шевелениям их параметров – амплитуды, длительности, скорости и т.д. Солитоны коротких длительностей формируются в результате взаимной компенсации нелинейного самосжатия импульса и его распыления за счет дисперсии среды.

Первый оптический солитон наносекундной длительности наблюдался в 1967 году при открытии резонансного эффекта самоиндуцированной прозрачности (СИП) Мак-Коллом и Ханом [2]. Это так называемый 2π – солитон. Механизм формирования 2π – солитона СИП обусловлен тем, что своим передним фронтом он переводит атомы резонансной среды из основного состояния в возбужденное, а задним фронтом возвращает их обратно. За счет такого периодического обмена энергией со средой скорость 2π – солитона значительно меньше скорости света. Чем короче длительность солитона, тем больше его амплитуда и скорость распространения.

В 1970-х годах интенсивным исследованиям подверглись нерезонансные квазимонохроматические оптические солитоны, описываемые нелинейным уравнением Шрёдингера (НУШ) [3]. Свойство квазимонохроматичности позволило ввести понятие медленно меняющейся огибающей (ММО) электрического поля импульса и использовать соответствующее приближение. Скорость распространения солитона НУШ равна линейной групповой скорости в нерезонансной среде. При этом его амплитуда увеличивается с укорочением временной длительности. Длительность солитонов НУШ лежит в широком интервале значений от нано- до нескольких десятков фемтосекунд.

Отметим, что уравнения СИП и НУШ обладают свойством интегрируемости. Как следствие, соответствующие солитоны упруго взаимодействуют между собой. Данное обстоятельство привело к мысли об использовании солитонов в системах оптической передачи информации.

Одной из тенденций развития лазерной физики и нелинейной оптики является создание в лабораторных условиях световых импульсов всё более коротких длительностей. Это привело, в частности, к различным модификациям уравнений СИП и НУШ. Пришлось учитывать высшие порядки линейной и нелинейной дисперсии. Данное обстоятельство привело к тому, что солитоны потеряли свойство упругих столкновений друг с другом.

К настоящему времени созданы импульсы длительностью в один период электромагнитных колебаний – предельно короткие импульсы (ПКИ). Для теоретического описания распространения соответствующих солитонов пришлось отказаться от приближения ММО. Это с начала 1990-х годов породило новый бум в физике оптических солитонов [4]. Абсолютные значения длительности ПКИ лежат в интервале от пико- до единиц фемтосекунд.

[1] Ньюэлл А., *Солитоны в математике и физике*, М.: Мир, 1989.

[2] McCall S.L. and Hahn E.L., *Phys. Rev. Lett.*, **18**, 908-911, (1967).

[3] Агравал Г., *Нелинейная волоконная оптика*, М.: Мир, 1996.

[4] Leblond H. and Mihalache D., *Phys. Rep.*, **523**, 61-126, (2013).

**ЭФФЕКТЫ КВАЗИФАЗОВОГО СОГЛАСОВАНИЯ
ПРИ ГЕНЕРАЦИИ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Стремоухов С.Ю.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
sustrem@gmail.com

Представлены результаты исследования нелинейно-оптического преобразования интенсивного излучения ближнего и среднего инфракрасного диапазонов в коротковолновую область за счет генерации гармоник высокого порядка в газовых средах.

Ключевые слова: генерация гармоник, квази-фазовое согласование.

Генерация гармоник высокого порядка (ГГВП) в средах, взаимодействующих с интенсивными лазерными полями – является наиболее удобным способом получения когерентного коротковолнового излучения. Доступность основных приборов для проведения исследований и относительная простота оптической схемы генерации предопределили широкое развитие данного направления в Мире. Однако, в виду существенной нелинейности отклика среды на воздействие интенсивных лазерных полей, в настоящее время как теоретически, так и экспериментально продолжают поиски оптимальных параметров как лазерного излучения, так и среды для генерации когерентного излучения с заданными параметрами (прежде всего, длиной волны и эллиптичностью). Существенная нелинейность процесса генерации и обилие явлений, влияющих на параметры генерируемого излучения (например, конкуренция каналов генерации заданной гармоники при изменении параметров лазерного поля [1]), затрудняет создание универсального общего теоретического подхода к описанию данного явления. Поэтому развитие теоретических методов описания ГГВП является актуальной задачей. Прогресс в этой области позволит не только создать компактный мультиспектральный источник когерентного излучения, но и использовать генерируемое излучение в качестве затравочного для улучшения как энергетических, так и когерентных свойств излучения, генерируемого лазерами на свободных электронах [2], а также создавать импульсы аттосекундной длительности [3].

Развитие методов управления характеристиками ГГВП ведется как на микроскопическом (атомарном) [4], так и на макроскопическом уровне описания задачи [5]. При этом, рассматриваются различные методы фазового и квази-фазового согласования (КФС) при распространении лазерного излучения в среде [6]. В настоящей работе обсуждаются результаты теоретических расчетов отклика среды, представляющие собой как одиночную газовую струю (для изучения эффектов фазового согласования), так и набор газовых струй, разделенных газовыми промежутками (для изучения особенностей КФС) на воздействие интенсивных многокомпонентных лазерных полей. При этом, длина волны и спектральный состав лазерного излучения варьируется в широких пределах: исследования проводились для источников ближнего и среднего инфракрасного излучения, лазерное поле формировалось из одночастотных, двухчастотных и трехчастотных импульсов фемтосекундной длительности, эффективность и поляризационные свойства гармоник в двухчастотных лазерных полях исследовались также в присутствии интенсивных терагерцевых полей.

В рамках проведенных исследований используется единый теоретический подход к описанию явления ГГВП, который учитывает динамику изменения населенностей уровней дискретного и непрерывного спектров атомов, распределенных в среде, при их взаимодействии с интенсивными лазерными полями, параметры которых зависят от положения атомов в среде за счет эффектов распространения лазерного излучения [7, 8].

Проведенный цикл исследований открывает широкие перспективы оптимизации параметров гарнируемого излучения для последующего использования такого излучения в различных приложениях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00188, <https://rscf.ru/project/24-22-00188/>.

- [1] Lvov K.V., Stremoukhov S.Yu., *Optics Letters*, **50**, №11, 3740-3743, (2025).
- [2] Lambert G., Hara T., Garzella D., et al., *Nature Physics*, **4**, 296-300, (2008).
- [3] Corkum P., Krausz F., *Nature Physics*, **3**, 381, (2007).
- [4] Stremoukhov S. Yu., *Bull. Rus. Acad. Sc.: Phys.*, **88**, №1, 38-43, (2024).
- [5] Weissenbilder R., Carlström S., Rego L. et al., *Nature Review Physics*, **4**, 713-722, (2022).
- [6] Hareli L., Shoulga G., Bahabad A., *J.Phys.B: At.Mol.Opt.Phys.*, **53**, №233001, (2020).
- [7] Andreev A.V., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A., *Eur. Phys. J. D.*, **66**, 16, (2012).
- [8] Stremoukhov S.Yu., Andreev A.V., *Las. Phys.*, **28**, 035403, (2018).

КВАДРАТИЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ФИЛАМЕНТАЦИИ

Шипило Д.Е.^{1,2}, Николаева И.А.^{1,2}, Панов Н.А.^{1,2}, Косарева О.Г.^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

schipilo.daniil@physics.msu.ru

При фемтосекундной филаментации в воздухе наблюдается генерация терагерцового излучения и второй гармоники. Мы применяем формализм квадратичных по электрическому полю фототоков, чтобы единообразно описать эти два процесса, запрещенных в плосковолновом приближении.

Ключевые слова: фемтосекундная филаментация, терагерцовое излучение.

Высокая интенсивность, поддерживаемая в фемтосекундном филаменте на протяжении нескольких дифракционных длин за счет баланса между самофокусировкой в прозрачной изотропной среде и дефокусировкой в лазерной плазме, приводит к сужению спектра фемтосекундного импульса, а также генерации третьей и более высоких нечетных гармоник [1]. В изотропной среде в плосковолновом приближении запрещена генерация четных гармоник, однако в силу пространственной и временной локализации волнового пакета в филаменте происходит генерация нулевой гармоники — терагерцового излучения [2] — и второй гармоники [3]. Источником терагерцовой и удвоенной частот является ток электронов, возникающий вследствие светового давления лазерного импульса и пондеромоторной силы, определяемой градиентами светового канала. Поскольку световое давление не коллинеарно полю лазерного импульса, а пондеромоторная сила не обладает симметрией вращения, такие токи нарушают приближения скалярного поля и осевой симметрии, обычно используемые при моделировании филаментации. Самосогласованное моделирование генерации четных гармоник возможно, например, методом крупных частиц [4], что исключает моделирование протяженных филаментов длиной более 1 см.

В настоящей работе мы обсуждаем пространственные и спектральные характеристики четных гармоник (второй и терагерцового излучения), генерируемых в фемтосекундном филаменте в воздухе. Применяя теорию возмущений [4] к уравнениям гидродинамики плазмы [5], мы описываем векторные токи, квадратичные по полю лазерного импульса, распределение которого в филаменте получено с помощью (t, r, z) -моделирования уравнений распространения. Эти токи формируют продольно-дипольный и квадрупольный источники. С помощью интерференционного интеграла из распределения токов в филаменте могут быть получены распределения второй гармоники и терагерцового излучения в дальней зоне. Из-за того, что угловая расходимость излучения определяется в значительной степени интерференционными эффектами, диаграммы направленности дипольного и квадрупольного источников перекрываются. Частотная зависимость интенсивности дипольного и квадрупольного излучения такова, что во второй гармонике может быть зарегистрирован только квадрупольный вклад с поляризацией, сонаправленной фундаментальному лазерному излучению [Рисунок (а, б)], в то время как в терагерцовой области преобладает дипольный вклад, представленный как радиально поляризованный кольцевой пучок [6], а в небольшом диапазоне частот 1-3 ТГц наблюдается деструктивная интерференция дипольного и квадрупольного вкладов, наблюдаемая как двухлепестковый терагерцовый пучок с поляризацией, перпендикулярной поляризации излучения накачки [Рисунок (в, г)].

Исследования выполнены при поддержке Российского Научного Фонда, проект №24-19-00461, <https://rscf.ru/project/24-19-00461/>.

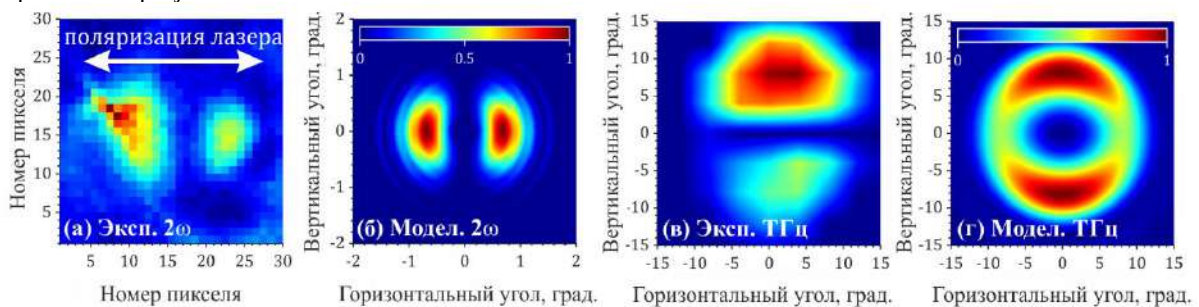


Рисунок. Поперечные распределения (а, б) второй гармоники и (в, г) терагерцового излучения, полученные (а, в) экспериментально и (б, г) в моделировании при филаментации 940-нм, 90-фс, ~5-мДж импульсов

- [1] Mitrofanov A.V. et al., *Sci. Rep.*, **5**, 8368, (2015).
- [2] Shkurinov A.P. et al., *Phys. Rev. E*, **95**, 043209, (2017).
- [3] Li G. et al., *Opt. Lett.*, **39**, 961, (2014).
- [4] Thiele I. et al., *Phys. Rev. E*, **94**, 063202, (2016).
- [5] Sprangle P. et al., *Phys. Rev. E*, **69**, 066415, (2004).
- [6] Nikolaeva I.A. et al., *Opt. Express*, **31**, 41406, (2023).

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ФАЗОВО-ИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ
И МОЛЕКУЛЯРНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕД**

Шкуринов А.П.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия
ashkurinov@physics.msu.ru

Технологии генерации и применения терагерцового излучения в целях создания практических устройств в последние годы привлекают исследователей из различных областей знаний, физики, химии, биологии. Важнейшим во всех приложениях терагерцового излучения является разработка удобных и эффективных источников излучения, которые могли бы быть интегрированы в инженеринговые работы.

Ключевые слова: терагерцовое излучение.

В моей лекции я расскажу о новых тенденциях в развитии источниках перестраиваемого узкополосного терагерцового излучения на основе молекулярных кристаллов [1], магнитоактивных и фазово-изменяемых гетероструктур. Однако этот прогресс немаловажен без активного расширения арсенала материалов фотоники – монокристаллов, тонких пленок, гетероструктур и мета-поверхностей, способных обеспечить новые эффекты, рождающиеся в сочетании компонентов с взаимодополняющими свойствами.

В контексте настоящего доклада требуются, в первую очередь, тонкопленочные системы и гетероструктуры, содержащие магнитоактивные и фазовоизменяемые слои. Создание тонкопленочных магнитных структур требует развития новых технологических подходов и участия химиков – материаловедов и кристаллографов.

[1] Sinko A.S., et al., *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **18**, 6, 1516-1529, (2024).

ГЕНЕРАЦИЯ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ГАЗОВО-КЛАСТЕРНОЙ СТРУИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ СУБРЕЛЯТИВИСТСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Балакин А.В.¹, Кузечкин Н.А.², Солянкин П.М.², Шкуринов А.П.¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

²НИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

a.v.balakin@physics.msu.ru

Представлены результаты исследования процессов генерации ТГц излучения и электронов с энергией до 90 кэВ в лазерной плазме, возбуждаемой в газовой-кластерной струе фемтосекундными лазерными импульсами с интенсивностью до 10^{16} - 10^{17} Вт/см².

Ключевые слова: лазерно-плазменное ускорение электронов, ТГц излучение.

Изучение фундаментальных основ лазерно-плазменного взаимодействия и свойств протекающих в лазерно-индуцированной плазме процессов представляет собой интенсивно развивающуюся область экспериментальных и теоретических исследований, а полученные знания широко применяются для разработки новых методов и подходов во множестве практически значимых приложений.

Быстрое развитие техники генерации мощных лазерных импульсов с помощью усиления чирпированных импульсов, позволившее достичь мощности ТВт и ПВт уровня и получить сверхсильные световые поля релятивистских интенсивностей [1], открыло новые возможности в области физики заряженных частиц и синхротронных исследований. Такие специальные лазерные мега-комплексы, успешно применяются для формирования плазмы в газовых и конденсированных средах с целью получения сгустков заряженных частиц высокой энергии, вторичного электромагнитного излучения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах [2-5]. В настоящей работе в качестве источника лазерного излучения мы использовали компактный более доступный и дешевый Ti:Sapphire регенеративный усилитель субтераваттного уровня, генерирующий импульсы с энергией до 7 мДж и длительностью от 35 фс. Были исследованы свойства процессов генерации ТГц излучения и электронных сгустков при различных условиях возбуждения газовой-кластерной мишени, формирующейся при адиабатическом расширении газа в вакуум через сверхзвуковое сопло. Представлены и обсуждаются зависимости выхода электронов и сопутствующих им ТГц импульсов от: энергии, длительности и поляризации лазерных импульсов, локализации положения лазерного фокуса в струе, давления рабочего газа. В частности, мы показали (рисунок), что при возбуждении кластерной мишени субрелятивистскими лазерными импульсами возможна генерация узконаправленного пучка электронов с энергией до 90 кэВ.

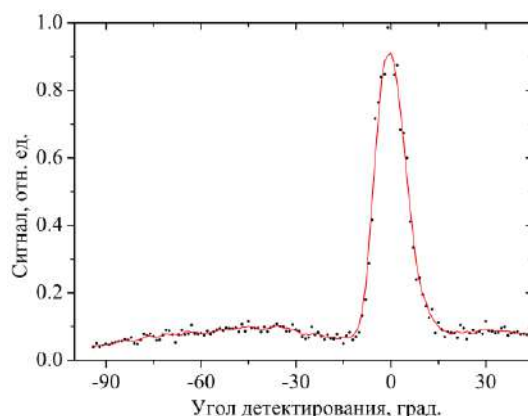


Рисунок. Зависимость выхода электронов от углового положения детектора; нулевое значение угловой координаты соответствует направлению распространения лазерного луча

Представленные результаты показывают, что компактные и доступные для большинства современных лабораторий лазерные системы субтераваттного уровня могут быть успешно использованы для эффективной генерации пучков ускоренных электронов и сопутствующего им ТГц излучения. Такие инструменты помогут существенно дополнить исследовательские возможности экспериментальных лабораторий.

Исследование выполнено частично в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова и частично в рамках государственного задания НИЦ "Курчатовский институт".

- [1] Mourou G., *Reviews of Modern Physics*, **91**, №3, 030501-1 - 030501-21, (2019).
- [2] Hooker S.M., *Nature Photonics*, **7**, 775-782, (2013).
- [3] Esarey E., Schroeder C.B., Leemans W.P., *Reviews of modern physics*, **81**, №3, 1229-1285, (2009).
- [4] Hafz, N., Jeong, T., Choi, I. et al, *Nature Photonics*, **2**, 571-577, (2008).
- [5] Hudson L.T., Seely J.F., *Radiation Physics and Chemistry*, **79**, №2, 132-138, (2010).

ТРАНСПОРТ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ СВЕТА В ФОТОННОЙ РЕШЕТКЕ ДЕНДРИТНОГО ТИПА

Коровай О.В.

Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь, Молдова

olesya-korovai@mail.ru

С использованием метода связанных мод теоретически изучены эффекты локализации света в фотонной решетке дендритного типа. Получены аналитические выражения, позволяющие предсказать возникновение эффекта локализации света, в зависимости от значений констант связи.

Ключевые слова: фотонная решетка, локализованные состояния.

Основной задачей топологической фотоники является исследование возможности управлять траекторией распространяющегося излучения в периодических структурах – фотонных решетках, с целью предложить новые, устойчивые способы передавать свет на значительные расстояния, сохраняя его локализованным [1-4].

Рассмотрим систему уравнений для амплитуд связанных мод трех параллельных бесконечных массивов волноводов, образующих однородную фотонную решетку дендритного типа (рис. 1):

$$\begin{cases} i \frac{da_n}{dx} = -\alpha b_n, \\ i \frac{db_n}{dx} = -\alpha a_n - \kappa(c_n + c_{n+1}), \\ i \frac{dc_n}{dx} = -\alpha u_n - \kappa(b_n + b_{n+1}), \\ i \frac{du_n}{dx} = -\alpha c_n, \end{cases} \quad (1)$$

κ – константа связи волновода с ближайшими соседями во втором массиве, α – константа связи между волноводами второго и первого, второго и третьего массивов, x – координата вдоль волноводов решетки, a_n, b_n, c_n, u_n – нормированные амплитуды полей распространяющихся мод в n -ом волноводе.

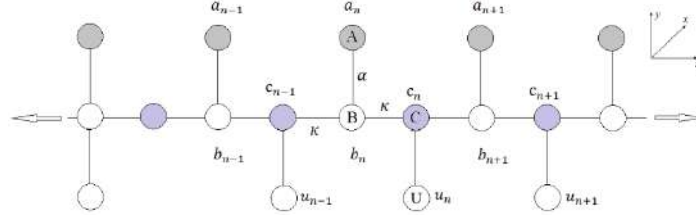


Рис. 1. Схема расположения волноводов в фотонной решетке дендритного типа

Спектр линейных состояний фотонной решетки дендритного типа состоит из четырех линейных

полос, $k_{1-4} = \pm \sqrt{(\alpha^2 + \kappa^2(1 + \cos \vartheta))} \pm \sqrt{\kappa^2(1 + \cos \vartheta)(2\alpha^2 + \kappa^2(1 + \cos \vartheta))}$. Видно, что спектр

линейных состояний не содержит плоских зон, однако при некоторых значениях параметров дисперсионные полосы, меняют свою кривизну и две из четырех становятся плоскими, сближаясь за счет уменьшения щели между ними и совпадают друг с другом (рис. 2). В случае, если $\alpha \ll \kappa$, наблюдается локализация света в волноводах решетки, при этом в массивах отсутствует пространственная диффузия света в волноводах в направлении, перпендикулярном оси решетки при условии сильной связи (рис. 3).

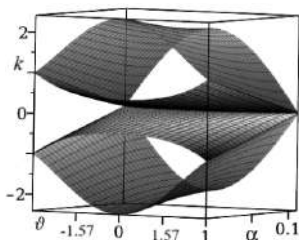


Рис. 2. Спектр (дисперсионное соотношение) $k(\alpha, \vartheta)$ фотонной решетки при $\kappa = 1$

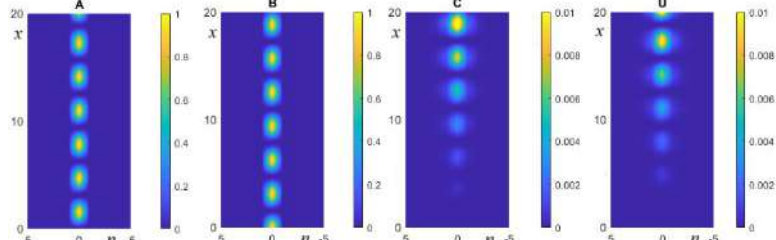


Рис. 3. Пространственное распределение интенсивности света в массивах решетки в зависимости от координаты x при накачке в торец b_0 при различных значениях констант: а) $\alpha = 1, \kappa = 0.01$

[1] Lederer F., Stegeman G.I., Christodoulides D.N., Assanto G., Segev M. and Silberberg Y., *Phys. Rep.*, **463**, 1-126, (2008).

[2] Flach S. and Gorbach A., *Phys. Rep.*, **467**, 1-116, (2008).

[3] Garanovich I.L., Longhi S., Sukhorukov A.A. and Kivshar Y.S., *Phys. Rep.*, **518**, 1-79, (2012).

[4] Коровай О.В., Марков Д.А., Надькин Л.Ю., *Енисейская фотоника – 2024, Всероссийская научная конференция с международным участием, 16-20 сентября 2024 г., Красноярск*, **1**, 227-228, (2024).

**УНИПОЛЯРНЫЕ СУБЦИКЛОВЫЕ ИМПУЛЬСЫ СВЕТА:
СПОСОБЫ ГЕНЕРАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ В СВЕРХБЫСТРОЙ ОПТИКЕ**
Архипов Р.М.¹, Дьячкова О.О.^{1,2}, Архипов М.В.¹, Пахомов А.В.², Розанов Н.Н.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

arkhipovrostislav@gmail.com

Приведен обзор последних теоретических и экспериментальных результатов в области получения предельно коротких субцикловых импульсов света и их применения в сверхбыстрой оптике и аттосекундной физике.

Ключевые слова: предельно короткие импульсы, сверхбыстрая оптика, аттосекундные импульсы.

Униполярные предельно короткие импульсы световые импульсы, характеризующиеся ненулевой электрической площадью поля, представляют собой принципиально новый класс оптических возмущений, отличающихся от традиционных многоцикловых импульсов наличием существенной постоянной составляющей в спектральном составе. Отличительной чертой таких импульсов от обычных биполярных импульсов в нулевой электрической площади является нарушением симметрии временного профиля электрического поля, что приводит к появлению эффективного импульса силы, действующего на заряженные частицы в субцикловом временном масштабе. Это уникальное свойство открывает новые возможности для управления ультрабыстрыми процессами на фундаментальном уровне, включая контроль электронной динамики в атомах, молекулах и твердотельных наноструктурах.

В докладе представлен обзор современных методов генерации униполярных импульсов [1-5], основанных на нелинейных процессах взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом. Особый интерес представляет механизм формирования униполярного отклика при отражении предельно коротких лазерных импульсов от плазменных слоев, где ключевую роль играет асимметричная ионизация среды передним фронтом импульса. Аналитическое рассмотрение данной задачи в рамках модели одномерного распространения показывает, что при определенных условиях (длительность импульса $\tau \sim 1/\omega$, толщина слоя $d \ll \sigma\tau$) отраженное поле приобретает выраженный униполярный характер. Численное моделирование полной системы уравнений Максвелла совместно с уравнениями кинетики плазмы подтверждает возможность генерации аттосекундных униполярных импульсов с амплитудой, достигающей 0.1% от амплитуды падающего излучения.

В докладе также обсуждается фундаментальное значение униполярных импульсов в современной оптике, которое определяется их уникальной способностью вызывать направленное смещение электронов без последующего возвратного движения, что принципиально отличает их действие от воздействия обычного оптического излучения. Это свойство находит применение в задачах сверхбыстрого управления электронными состояниями [5], селективного возбуждения молекулярных переходов [6], генерации аттосекундных электронных пучков [7], высокодобротных динамических микрорезонаторов с управляемыми параметрами [8, 9] и др. приложений, см. обзоры [1-3]. Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой компактных источников униполярного излучения и изучением новых механизмов их взаимодействия с веществом на субцикловых временных масштабах [1-5].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-12-00012).

- [1]. Rosanov N.N., Arkhipov M.V., Arkhipov R.M., A.V. Pakhomov, *Contemporary Physics*, **64**(3), 224, (2023).
- [2] Розанов Н.Н., Архипов М.В., Архипов Р.М., *УФН*, **194**(11), 1196, (2024).
- [3] Розанов Н.Н. Архипов М.В., Архипов Р.М., Пахомов А.В. Терагерцовая фотоника, под ред. Панченко В.Я., Шкуринова А.П., Российская академия наук, Москва, 360-393, (2023).
- [4] Gorelov S.D., Novokovskaya A.L., Bodrov S.B., Sarafanova M.V., and Bakunov M.I., *Appl. Phys. Lett.*, **126**, 011104, (2025).
- [5] Hassan M.T., Luu T.T., Moulet A., Raskazovskaya O., Zhokhov P., Garg M., Karpowicz N., Zheltikov A.M., Pervak V., Krausz F., Goulielmakis E., *Nature*, **530**, 66, (2016).
- [6] Arkhipov R., Arkhipov M., Demircan A., Morgner U., Babushkin I., Rosanov N., *Opt. Express*, **29**, 10134-10139502, (2021).
- [7] Arkhipov R., Belov P., Pakhomov A., Arkhipov M., Rosanov N., *J. Opt. Soc. Am. B*, **41**, 285-295, (2024).
- [8] Arkhipov R.M., Pakhomov A.V., Diachkova O.O., Arkhipov M.V., Rosanov N.N., *J. Opt. Soc. Am. B*, **41**, 1721, (2024).
- [9] Архипов Р.М., Дьячкова О.О., Архипов М.В., Пахомов А.В., Розанов Н.Н., *Письма в ЖЭТФ*, **121**, №7, 544, (2025).

СИЛЬНО ОДНОНАПРАВЛЕННЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПУЧКИ И ПАКЕТЫ

Киселев А.П.^{1,2}, Плаченнов А.Б.³, Со И.А.⁴

¹ПОМИ им. В.А. Стеклова, Санкт-Петербург, Россия

²ИПМАШ РАН, Санкт-Петербург, Россия

³МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

⁴НЕВИНПАТ, Санкт-Петербург, Россия

a_plachenov@mail.ru

Введено понятие усиленной однонаправленности решений волнового уравнения. Такие решения получаются из обычных однонаправленных с помощью преобразования Лоренца. Рассмотрен пример сильно однонаправленного малоциклового импульса.

Ключевые слова: однонаправленные пучки и пакеты, непараксиальная теория.

В последние годы возник интерес к изучению точных однонаправленных локализованных решений волнового уравнения

$$c^2(u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}) - u_{tt} = 0, \quad (1)$$

моделирующих распространение импульсов, порождённых источником, расположенным на плоскости $z = 0$, в положительном направлении оси z [1-5]. Разложения таких решений по плоским волнам содержат только такие компоненты, у которых скорость распространения имеет неотрицательную проекцию на ось z . Мы обобщаем понятие однонаправленности и рассматриваем решения, для которых скорости распространения спектральных компонент образуют с осью z углы, не превосходящие некоторого значения χ_0 [6]. Для обычной однонаправленности $\chi_0 = \pi/2$, а в случае $\chi_0 < \pi/2$ соответствующие решения мы предлагаем называть сильно однонаправленными. Эти решения могут быть получены из обычных однонаправленных импульсов с помощью преобразования Лоренца

$$z \mapsto \gamma(z - \beta ct), \quad ct \mapsto \gamma(ct - \beta z), \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}, \quad -1 < \beta < 1, \quad (2)$$

причём сильно однонаправленные решения отвечают положительным значениям параметра β , а угол χ_0 связан с параметром β равенством $\chi_0 = \arccos \beta$.

Как пример, рассмотрим простейшее однонаправленное малоцикловое решение уравнения (1) [4, 5]:

$$u = 1/[S(z - S)], \quad S = \sqrt{c^2(t + it)^2 - \rho^2}, \quad \rho = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (3)$$

где $\tau > 0$ – параметр. На Рис. 1 и 2 приведены профили мнимых частей исходной функции (3) и сильно однонаправленного решения, полученного из неё преобразованием (2), в различные моменты времени. Как видно из рисунков, поведение этих функций различается весьма существенно.

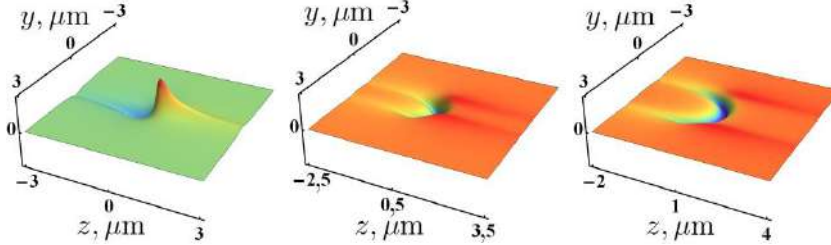


Рис. 1. Мнимая часть однонаправленного импульса (3) при $t = 0, 0.5/c, 1/c \mu s, ct = 0.2 \mu m$

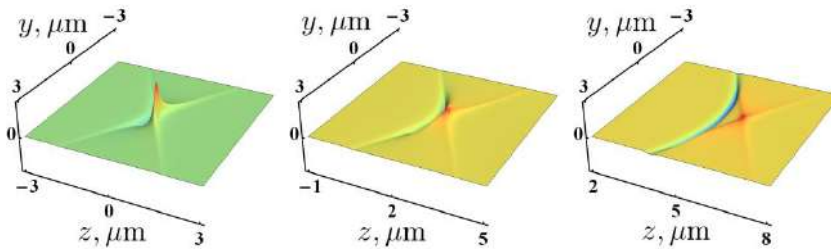


Рис. 2. Мнимая часть сильно однонаправленного импульса ($\chi_0 = \pi/6$) при $t = 0, 2/c, 5/c \mu s, ct = 0.2 \mu m$

- [1] Zamboni-Rached M., *Phys. Rev. A*, **79**, 013816, (2009).
- [2] Parker K.J., Alonso M.A., *Opt. Express*, **24**, №25, 28669-28677, (2016).
- [3] Lekner J., *Proc. R. Soc. London A*, **474**, №2209, 20170655, (2018).
- [4] Со И.А., Плаченнов А.Б., Киселев А.П., *Опм. Спектр.*, **128**, №12, 1865-1867, (2020).
- [5] Со И.А., Плаченнов А.Б., Киселев А.П., *Phys. Rev. A*, **102**, 063529, (2020).
- [6] Plachenov A.B., So I.A., Kiselev A.P., *Phys. Lett. A*, **554**, 130752, (2025).

PLASMA FORMATION UNDER INTENSE CHIRPED PULSES

Hilal S., Shtumpf S.A., Ismagilov A.O., Tsyarkin A.N., Melnik M.V.

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

shirenhilal@itmo.ru

This study investigates how chirped femtosecond pulses influence plasma generation, using density matrix formalism. Results reveal asymmetric plasma formation, with negative chirp producing higher electron densities compared to positive chirp.

Keywords: chirped pulses, plasma formation, plasma density.

Chirped laser pulses are essential in ultrafast optics, offering precise control over plasma initiation and evolution. Their defining feature, temporal variation of frequency, enables regulation of energy deposition in nonlinear media [1]. This work examines the role of chirp rate in shaping plasma density and electron density, extending earlier models of laser plasma interactions by applying the density matrix formalism [2, 3].

The theoretical framework involves three coupled differential equations: one governing pulse propagation with linear effects, one describing current density evolution of quasifree electrons, and one capturing excitation from the ground to higher states under non-resonant conditions. The latter includes the dependence on the squared electric field and the rapidly broadening spectrum of ultrashort pulses. Full propagation dynamics are incorporated, accounting for diffraction and dispersion to model both spatial and temporal evolution of chirped pulses in the filament region.

Results demonstrate two competing influences of chirp on ionization. Pulse stretching reduces peak intensity and thus ionization probability, while temporal frequency redistribution alters electron seeding. Negative chirp, where high frequencies precede low frequencies, initiates ionization earlier and supports stronger avalanche growth. In contrast, positive chirp delays high-frequency components until later in the pulse, when intensity has diminished, suppressing plasma formation. This leads to an asymmetry: negative chirp consistently yields higher electron densities than positive chirp of equal magnitude.

Figure (a) presents the normalized plasma electron density for different Fourier-transform-limited (FTL) pulse durations at varying chirp rates. A clear reduction in plasma density is observed upon introducing chirp. This decrease arises from the temporal stretching of the pulse induced by chirp, which lowers the peak light intensity.

To isolate the contribution of chirp itself, Figure (b) shows the normalized light intensity for different FTL pulse durations, explicitly accounting for pulse broadening under different chirp conditions. By dividing the electron density values from Figure (a) by the corresponding light intensity values from Figure (b), we obtain Figure (c). This representation reveals the intrinsic effect of chirp on plasma generation, demonstrating that chirp indeed enhances plasma electron density when normalized to intensity.

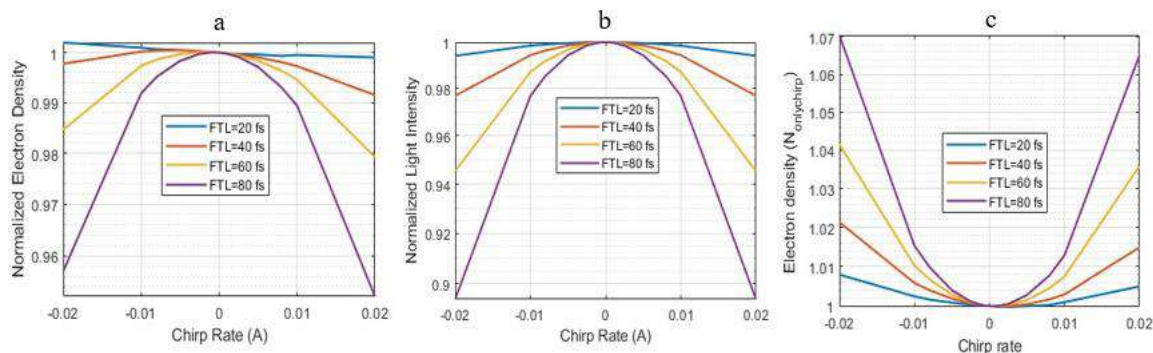


Figure. a) Normalized plasma electron density of different FTL pulse durations at different chirp rates, b) light intensity of different FTL considering their time duration stretching for different chirp rates, c) the isolated effect of introducing chirp on plasma electron density

The presented framework highlights the ability of chirp to actively manipulate plasma properties during filamentation. These findings provide pathways toward optimizing ultrafast laser applications, with future efforts aimed at experimental validation and parameter-space expansion.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FSER-2025-0007).

[1] Zare S., *Results in Optics*, **9**, 100284, (2022).

[2] Ponomareva E.A., Stumpf S.A., Tsyarkin A.N., Kozlov S.A., *Optics Letters*, **44**(22), 5485-5488, (2019).

[3] Stumpf S.A., Korolev A.A., Kozlov S.A., *In Laser Optics 2006: Superintense Light Fields and Ultrafast Processes*, SPIE, **6614**, 59-70, (2007).

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЦЕНТРОВ
ОКРАСКИ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ
В ОБЪЕМЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СРЕДЫ**

Дресвянский В.П., Мартынович Е.Ф.

Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

ibchief@ilph.irk.ru

Предложена пространственная модель распределения агрегатных центров и других конечных продуктов фотохимических реакций в продольном и поперечном сечениях трека светового филамента после прохождения фемтосекундных лазерных импульсов в кристаллах фторидов лития и магния.

Ключевые слова: лазер, кристалл, дефект.

Наиболее широкозонные кристаллы, такие как фторид лития и фторид магния имеют ширину запрещенной зоны порядка 14 эВ, а энергию создания низкоэнергетических анионных экситонов около 13 эВ. Излучение, генерируемое стандартными фемтосекундными лазерами в видимом и ближнем инфракрасном спектральном диапазоне, при взаимодействии с данными кристаллами в линейном режиме возбуждения не поглощается. В условиях, когда ширина запрещенной зоны диэлектрика многократно превышает энергию квантов оптического излучения, ионизация вещества идет только в полях высокой интенсивности, когда взаимодействие света и вещества носит нелинейный характер [1, 2].

Для изучения нелинейных фотофизических процессов в диэлектрических кристаллах нами предложен и многократно апробирован оригинальный высокочувствительный люминесцентный метод визуализации продольного и поперечного пространственных распределений концентраций центров окраски, индуцируемых лазерным излучением [1, 2]. Метод позволяет исследовать эти распределения как в период действия лазерного излучения, когда кристаллы ещё только окрашиваются и центры лишь появляются, так и после окончания его действия, когда возникшие в кристаллах центры окраски сохраняются, а пространственное распределение их концентраций связано с пространственным распределением интенсивности поля при самофокусировке и филаментации [1, 3].

Для экспериментального изучения процессов лазерно-индуцированного дефектообразования в кристаллической среде применялась совокупность методик лазерной люминесцентной спектроскопии. В частности, для визуализации продольного и поперечного пространственных распределений концентраций люминесцирующих дефектов в местах прохождения филаментов, индуцируемых лазерным излучением, использовался метод люминесцентной томографии и люминесцентного Z-сканирования [4].

В докладе будут представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния анизотропии нелинейного взаимодействия света и вещества на характер пространственного распределения концентраций индуцируемых в объеме кристаллической среды агрегатных центров окраски. Предложена пространственная статистическая модель распределения в профиле поперечного сечения трека агрегатных центров и других конечных продуктов реакций после прохождения фемтосекундного лазерного импульса в кристалле фторида лития [1, 2]. Показано, что концентрация различных типов дефектов изменяется по мере приближения к центру трека, сформированного в результате филаментации лазерного излучения [1]. Регистрируемое пространственно-периодическое распределение концентрации центров окраски, индуцированных в оптически анизотропных кристаллах фторида магния, свидетельствуют о том, что в процессе нелинейной ионизации кристаллической среды значительную роль играет туннельный эффект [1, 2]. Расчетные зависимости скорости нелинейной фотоионизации от интенсивности лазерного излучения, полученные в рамках формализма Келдыша, подтверждают данное предположение [1].

Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 года (№ проекта 0243-2021-0004).

[1] Дресвянский В.П., диссертация ... доктора физико-математических наук: 01.04.07, Иркутск, (2020).

[2] Дресвянский В.П., Мартынович Е.Ф., *Енисейская фотоника-2024, Всероссийская научная конференция с международным участием, тезисы докладов, Красноярск, 152, (2024).*

[3] Мартынович Е.Ф., Дресвянский В.П., в книге: *Фундаментальные исследования в Восточной Сибири: к 75-летию академической науки в Восточной Сибири*, 204-241, (2023).

[4] Дресвянский В.П., Мартынович Е.Ф., *Невская фотоника-2023, Всероссийская научная конференция с международным участием, сборник научных трудов, СПб.: Университет ИТМО, 111, (2023).*

СТАБИЛИЗАЦИЯ АТОМОВ В СИЛЬНОМ ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЛАЗЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В СРЕДНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Богацкая А.В.^{1,2}, Попов А.М.^{1,2}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²ФИ РАН им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

alexander.m.popov@gmail.com

В рамках полуклассической теории лазера продемонстрирована возможность использовать явление стабилизации ридберговских атомов в интенсивных лазерных полях как способ создания плазменного канала с инверсной населенностью и последующей генерацией или усилением излучения.

Ключевые слова: стабилизация атомов, лазерная генерация.

Эффект заселения ридберговских состояний атомов и их устойчивого существования в сильном поле излучения возникает в результате явления интерференционной стабилизации (ИС) в условиях многофотонного резонанса начального (основного) состояния атома с группой ридберговских состояний с определенной пространственной четностью [1]. При этом согласно [2], стабилизация возникает в результате интерференции амплитуд переходов в континуум с когерентного перезаселяемых рамановскими переходами Λ - типа ридберговских состояний в условиях перекрытия их ионизационных ширин. При этом в возбужденных (ридберговских) состояниях может находиться до десяти и больше процентов начальной концентрации нейтральных атомов газа. В [3] было обращено внимание на тот факт, что явление ИС приводит к инверсной населенности, которая сохраняется достаточно длительное время после лазерного воздействия и может быть использована для усиления или генерации излучения в различных частотных диапазонах от среднего ИК до ТГц.

В данной работе в рамках полуклассической теории генерации рассматривается простая модель двухуровневой системы, которая описывает основные особенности усиления/генерации излучения в условиях ИС атомов. В этом случае в одномерном приближении уравнения полуклассической теории лазера для однородно уширенной линии могут быть записаны в виде [4, 5]:

$$\frac{\partial^2 E(z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial j}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\ddot{P} + \omega_0^2 P + \frac{2}{T_2} \dot{P} = \frac{2\omega_0 |d_{21}|^2}{\hbar} EN, \quad (2)$$

$$\dot{N} + \frac{N}{T_1} = -\frac{2}{\hbar\omega_0} E \dot{P}, \quad (3)$$

здесь $E(z,t)$ – поле генерируемой/усиливаемой волны (поле мы считаем линейно поляризованным), ω_0 – частота перехода между уровнями, P – поляризация среды, j – ток, вызываемый свободными электронами, N – разность населенностей состояний (случай $N < 0$ означает наличие инверсной населенности), T_1 и T_2 – времена релаксации населенностей и поляризации, d_{21} – матричный элемент дипольного оператора, связывающий рассматриваемые ридберговские состояния.

При численном интегрировании системы (1) – (3) полагалось, что к концу воздействия на газ импульса фемтосекундного лазера в газе образовывался ионизованный плазменный канал с остаточными значениями инверсии и поляризации. Поскольку ридберговские состояния атомов, являются водородоподобными, в расчетах использовались спектроскопические данные для атома водорода, а в качестве перехода рассматривались уровни с главными квантовыми числами $n = 5$ и $n = 6$. Соответствующая длина волны перехода $\lambda = 7.8$ мкм и соответствует среднему ИК диапазону частот.

Расчеты показали, что для типичных условий возникновения ИС в газе с плотностью $\sim 10^{17}$ см⁻³ коэффициент усиления для дальнего/среднего ИК диапазона может достигать $\sim 10^2$ см⁻¹, что позволяет получить импульсы пикосекундной длительности и интенсивностями порядка мегаватта на квадратный сантиметр. Экспериментально обсуждаемый эффект, вероятно, можно наблюдать при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов, и использовать для целей широкополосной спектроскопии различных газовых сред.

[1] Popov A.M., Tikhonova O.V., Volkova E.A., *Laser Phys.*, **20**, 1028, (2010).

[2] Fedorov M.V., Movsesian A.M., *J. Phys. B*, **21**, L155, (1988).

[3] Bogatskaya A.V., Popov A.M., *Laser Phys. Lett.*, **12**, 045303, (2015).

[4] Звелто О., Физика лазеров, М.: Мир, (1979).

[5] Ахманов С.А., Никитин С.Ю., Физическая оптика, М.: Наука, (1998).

ТРЕХЦВЕТНЫЕ СОЛИТОНЫ С КРАТНЫМИ ЧАСТОТАМИ

Харитонов Д.М.¹, Трофимов В.А.²

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Южнокитайский Университет Технологий, Гуанчжоу, Китай

dmitykharitonov@cs.msu.ru

Рассмотрена задача взаимодействия трёх волн с кратными частотами в среде с квадратичным нелинейным откликом. Предложен комбинированный вариационный-multiscale подход нахождения многоцветных солитонов. Полученные солитоны устойчивы к влиянию расстройки групповых скоростей.

Ключевые слова: трёхволновое взаимодействие, многоцветные солитоны.

Многоцветные солитоны имеют ряд практических приложений, таких как передача сигналов, оптическая метрология, оптические переключатели, обработка изображений и другие. При этом теоретическое исследование их формирования и распространения представляет собой нетривиальную задачу, потому что: 1) число дифференциальных уравнений увеличивается (и совпадает) с количеством волн в многоцветных солитонах; 2) с ростом числа волн также увеличивается количество нелинейных процессов их взаимодействия, которые нужно учитывать [1].

Нами предложен новый метод нахождения многоцветных солитонов на примере задачи взаимодействия трёх волн с частотами ω , 2ω и 3ω в среде с квадратичным нелинейным откликом с учётом дисперсии групповых скоростей. Учитываются следующие нелинейные процессы, связывающие эти волны: генерация второй гармоники ($2\omega = \omega + \omega$), трёхволновое взаимодействие ($3\omega = \omega + 2\omega$). При этом предполагается, что расстройка волновых чисел обоих процессов велика, но их сумма близка к нулю: $|\Delta_{SHG}|, |\Delta_{SFG}| \gg 1$, $\Delta_{SHG} + \Delta_{SFG} \approx 0$. Взаимодействие этих волн описывается системой трёх нелинейных дифференциальных уравнений Шрёдингера. Поскольку система уравнений является довольно сложной для использования стандартных методов, была использована следующая двухэтапная схема нахождения солитонных решений.

На первом этапе используется метод многих масштабов [2] для получения более простой системы нелинейных дифференциальных уравнений (далее – модифицированной), решение которой является приближённым решением исходной системы. Для нахождения солитонных решений модифицированной системы использовался вариационный подход [3], который не мог быть применён к исходной системе из-за сложности получаемых алгебраических уравнений. В случае модифицированной системы соответствующая система алгебраических уравнений допускает нахождение их решений. Результатом являются двухцветные солитоны на частотах ω и 3ω .

Получившиеся солитонные решения были исследованы на устойчивость. Модифицированная система (как и исходная) является консервативной, поэтому анализ устойчивости основывался на исследовании её инвариантов [4]. Получены следующие условия: солитоны являются устойчивыми, если коэффициенты дисперсии групповых скоростей волн на частотах ω и 3ω (D_1 и D_3 , соответственно) совпадают, а расстройка волновых чисел процесса удвоения частоты Δ_{SHG} имеет противоположный знак:

$$D_1 D_3 > 0, D_1 \Delta_{SHG} < 0. \quad (1)$$

Компьютерное моделирование модифицированной системы показало, что импульсы, описываемые формулами, полученными в рамках вариационного подхода, действительно распространяются в солитонном режиме, а условия (1) являются условиями их устойчивости. Более важными являются результаты моделирования исходной системы – те же импульсы распространяются в режиме, который может быть назван квазисолитонным: после незначительной перестройки формы импульсов, а также некоторой перекачки энергии в волну на частоте 2ω , три образовавшихся импульса распространяются без значительных изменений на длинных дистанциях. Следовательно, можно говорить о формировании трёхцветных солитонов.

Отдельно было проведено компьютерное моделирование влияния расстройки групповых скоростей – фактора, который не учитывался при построении солитонных решений. Результаты моделирования показали: если значения коэффициентов расстройки групповых скоростей не превосходят некоторого критического значения, то импульсы распространяются вместе (с одинаковой скоростью), несмотря на различия в групповых скоростях.

Таким образом, предложенный двухэтапный подход может быть использован для нахождения многоцветных солитонов, описываемых сложными системами нелинейных уравнений.

Д.М. Харитонов благодарит Московский центр фундаментальной и прикладной математики (соглашение № 075-15-2025-345) за финансовую поддержку работы.

[1] Trofimov V.A., Luo W., Kharitonov D.M., Wang D., Han, C., Yang Y., Tikhomirov V.V., *Physica D*, **476**, 134668, (2025).

[2] Nayfeh A.H., Introduction to perturbation techniques, *John Wiley & Sons*, (2011).

[3] Anderson D., *Phys. Rev. A*, **27**, №6, 3135-3145, (1983).

[4] Kuznetsov E.A., Rubenchik A.M., Zakharov V.E., *Physics Reports*, **142**, №3, 103-165, (1986).

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ И КОНВЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ

Оладышкин И.В., Фадеев Д.А.

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

oladyshkin@ipfran.ru

Аналитически и численно исследуются вихревые токи и магнитные поля, которые могут возбуждаться на субпикосекундных временных масштабах при лазерной абляции металлов благодаря эффекту батареи Бирмана.

Ключевые слова: лазерная абляция, батарея Бирмана, фемтосекундные импульсы.

Поглощение лазерных импульсов с плотностью энергии порядка нескольких Дж/см² в металле приводит не только к неоднородному нагреву электронов в скин-слое, но и к существенному увеличению концентрации носителей заряда. Так, например, в работах [1, 2] было экспериментально установлено, что облучение золота фемтосекундным лазерным импульсом с плотностью потока энергии 3 Дж/см² приводит к нагреву электронов до температуры 5 эВ и двукратному росту плотности свободных электронов. При этом зависимости температуры и плотности электронов от интенсивности накачки существенно различаются, также данные величины по-разному эволюционируют во времени: это означает, что их градиенты оказываются не параллельными.

Было аналитически и численно показано, что в таких условиях возможно возбуждение вихревых электронных токов на субпикосекундных временных масштабах благодаря эффекту батареи Бирмана [3]. Эффект генерации вихревых течений хорошо известен в гидродинамике и физике плазмы, однако ранее он не рассматривался в контексте процесса лазерной абляции.

В рамках гидродинамического подхода возбуждение вихревых токов может быть описано аналитически [4]. Было показано, что в металлах с высокой плазменной частотой динамика электронных токов и самосогласованного магнитного поля подчиняется приближенному уравнению диффузионного типа:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\text{rot}(D_H \text{rot} \mathbf{H}) - \frac{2c}{3en} [\nabla n, \nabla \varepsilon], \quad (1)$$

где $\mathbf{H}$ – вектор магнитного поля, n и ε – плотность и тепловая энергия электронов, $D_H = \nu c^2 / \omega_p^2$ – коэффициент магнитной диффузии, c – скорость света в вакууме, ν – эффективная частота столкновений, ω_p – плазменная частота. Для выполнения оценок в рамках уравнения (1) важно, что электронная температуропроводность типичных металлов составляет порядка десятков см²/с и уменьшается на порядок при сильном нагреве. Характерное время диффузии тепла из оптического скин-слоя золота в этих условиях составит порядка 1 пс. В то же время значение коэффициента магнитной диффузии возрастает при нагреве и достигает $\sim 10^4$ см²/с внутри скин-слоя. Таким образом, магнитная диффузия является гораздо более быстрым процессом, чем диффузия тепла, а значит источник $\sim [\nabla n, \nabla \varepsilon]$ в уравнении (1) можно считать практически постоянным на субпикосекундных временных масштабах. При этом магнитная диффузия оказывается доминирующим механизмом переноса на первых пикосекундах: магнитные поля и вихревые токи успевают распространиться на глубину порядка 300 нм за 1 пс.

Отметим, что описанные вихревые токи не могут быть экранированы полями разделения зарядов и существуют до тех пор, пока градиенты температуры остаются достаточно сильными (до нескольких пикосекунд). По оценкам, при условиях лазерной абляции генерируемое магнитное поле может достигать 0,1–1 Т, а вихревые токи вносят существенный вклад в динамику переноса тепла вблизи неоднородностей. В областях локального усиления поля (например, на шероховатости поверхности) конвективный перенос тепла может быть быстрее классического диффузионного переноса в электронной подсистеме.

Аналитические результаты были проверены с помощью прямого численного моделирования в двумерной геометрии. Применялось гидродинамическое описание электронов, учитывающее электронное давление, рост частоты столкновений при нагреве и другие сопутствующие эффекты, для электромагнитных полей решались уравнения Максвелла, включающие самосогласованные электронные токи. Была подтверждена возможность генерации магнитных полей и быстрый диффузионный характер их распространения вглубь металла, уточнены количественные оценки максимальных полей и токов. Потенциально рассмотренные эффекты конвективного переноса тепла и генерации магнитного поля могут существенно изменять общую динамику электронной подсистемы после интенсивного фемтосекундного облучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ №25-22-20019).

[1] Fourment C. et al., *Physical Review B*, **89**, 161110(R), (2014).

[2] Chen Z. et al., *Nature Communications*, **12**, 1638, (2021).

[3] Biermann L., *Zeitschrift für Naturforschung*, **5**, 65-71, (1950).

[4] Oladyshkin I.V., *Physical Review B*, **111**, L140301, (2025).

**ДИФРАКЦИЯ ФРЕНЕЛЯ НА БИНАРНОЙ РЕШЕТКЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ
ЛИНЕЙНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ МАССИВ ДИСЛОКАЦИЙ**

**Иконников Д.А.^{1,2}, Дармаев Е.Ч.^{1,2}, Мысливец С.А.^{1,2},
Архипкин В.Г.^{1,2}, Вьюнышев А.М.^{1,2}**

¹Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

²Сибирский Федеральный Университет, Институт Инженерной Физики и Радиоэлектроники,
г. Красноярск, Россия

ikonnikov@iph.krasn.ru

В данной работе было выполнено исследование динамики массива оптических вихрей, сгенерированного в результате дифракции на бинарной периодической фазовой решетке, содержащей множество дислокаций. Рассмотрены два случая: массив дислокаций одинакового знака и массив дислокаций чередующегося знака. Для второго случая обнаружен эффект Тальбота. В случае массива дислокаций одинакового знака вся дифракционная картина вращается как целое и эффект Тальбота не возникает.

Ключевые слова: оптические вихри, эффект Тальбота.

Структурированные оптические поля [1], в частности те, которые включают фазовые сингулярности, известные как оптические вихри, стали предметом обширных исследований из-за их уникальных физических свойств и потенциальных применений в оптическом захвате, микроскопии сверхвысокого разрешения и оптической связи. Особый интерес представляют сложные оптические поля, содержащие множество вихрей, генерируемые фазовыми решетками с множественными вилкообразными дислокациями, поскольку они позволяют точно контролировать расположение вихрей, заряды и последующую пространственную динамику.

Значительная часть исследований до сих пор была посвящена пространственной эволюции оптических сингулярностей, возникающих при дифракции на вилкообразных решетках, содержащих одиночные [2] или небольшую группу [3, 4] дислокаций. Эти исследования продемонстрировали сложные пространственные траектории сингулярностей, включая спиралевидное поведение и динамику, зависящую от симметрии, на которую существенное влияние оказало начальное расположение. Вышеупомянутые результаты были эффективно описаны с использованием интегралов дифракции Френеля и гидродинамического подхода [5], и подтверждены экспериментами.

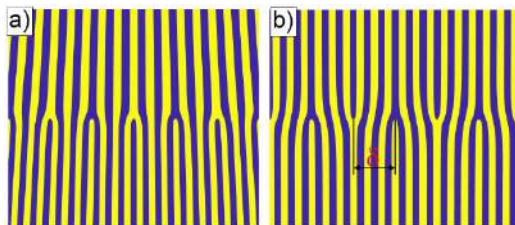


Рисунок. а) Бинарная фазовая решетка с дислокациями одного знака б) Бинарная фазовая решетка с дислокациями чередующихся знаков. δ - расстояние между дислокациями

Настоящая работа является расширением этого направления исследований, охватывая оптические вихревые массивы, генерируемые периодическими бинарными фазовыми решетками, содержащими линейный массив дислокаций как изображено на рисунке. Рассматриваются массивы, в которых дислокации демонстрируют одинаковые или чередующиеся топологические заряды с целью изучения влияния конфигурации на распространение и взаимодействие результирующих вихрей. На основе теории дифракции Френеля дополненной экспериментальной проверкой, было показано сложное поведение оптических сингулярностей в массивах.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института физики им. Л.В. Киренского.

[1] Salter P.S., Booth M.J., *Light Sci. Appl.*, **8**, 110, (2019).

[2] Bekshaev A., Karamoch A., *Opt. Commun.*, **281**, 6 1366-1374, (2008).

[3] Darmaev E.C., Ikonnikov D.A., Myslivets S.A., Arkhipkin V.G., Vyunishev A.M., *Ann. Phys.*, **536**, 9, (2024).

[4] Ikonnikov D.A., Darmaev E.C., Myslivets S.A., Pichugin K.N., Arkhipkin V.G., Vyunishev A.M., *Ann. Phys.*, (2025).

[5] Rozas D., Law C., Swartzlander G., *J. Opt. Soc. Am. B*, **14**, 3054, (1997).

**ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИЙ УОЛША ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ
ШАБЛОНОВ МОДУЛЯЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОТСЛЕЖИВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ОДНОПИКСЕЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

Лаппо-Данилевская А.К., Исмагилов А.О., Шумигай В.С., Цыпкин А.Н.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ankonstld@itmo.ru

В работе представлен и экспериментально подтверждён метод формирования набора шаблонов модуляции излучения для задач отслеживания движущихся объектов методом однопиксельной визуализации. Шаблоны формируются на основе функций Уолша и позволяют локализовать объект менее чем за 5% измерений. Предложенный порядок предъявления масок также обеспечивает восстановление изображения с коэффициентом корреляции свыше 75% при использовании лишь 20% измерений.

Ключевые слова: однопиксельная визуализация, паттерны освещения.

Однопиксельная визуализация (ОВ) позволяет получать изображение объекта не напрямую, а путём освещения его серией заранее заданных световых шаблонов (масок, паттернов) и измерения суммарного отклика от каждой маски с помощью лишь одного однопиксельного детектора. Восстановление изображения затем осуществляется путем построения функции корреляции между шаблонами модуляции и измеренными сигналами однопиксельного детектора [1]. Несмотря на развитие метода, ОВ по-прежнему сталкивается с критически важным ограничением: для формирования одного изображения требуется большое число данных о количестве шаблонов модуляции и данных однопиксельного детектора (несколько сотен измерений). Это делает метод недостаточно быстрым для визуализации движущихся объектов: при недостатке данных изображение получается размытым или вовсе теряется [2]. В связи с этим одной из важных задач является уменьшение числа измерений для локализации объекта.

Целью работы является разработка и экспериментальная проверка нового набора световых шаблонов модуляции, позволяющего сократить число измерений, необходимых для отслеживания движения объектов. Предлагается метод формирования шаблонов освещения, основанный на анализе частотной структуры функций Уолша. Шаблоны получаются путём преобразования одномерных представлений (строк) в двумерные матрицы – паттерны Адамара, посредством упорядоченной перестановки элементов. Восстановление изображения происходит путём применения обратного преобразования Адамара к измеренному спектру. По аналогии с Фурье-преобразованием, маски Адамара можно упорядочить от низкочастотных к высокочастотным, что открывает возможность использовать только наиболее значимые паттерны, дающие наибольший вклад в сигнал. Предложенный подход был протестирован на тестовом изображении «cameraman» размером 64×64 пикселя. При коэффициенте сжатия $\eta = 0.2$ (использовании 20% паттернов от полного набора - 4096) визуальные дефекты становятся слабо выраженными и практически не влияют на восприятие изображения. Для оценки эффективности выбранного порядка предъявления паттернов Адамара был рассчитан показатель EPE, отражающий долю энергии (информации), сосредоточенной в коэффициентах. Результаты показывают, что уже при использовании первых 50 измерений достигается более 50% суммарной энергии изображения, что свидетельствует о высокой концентрации полезной информации в начальных паттернах и обоснованности предложенного метода обхода. В ходе эксперимента были получены изображения треугольного объекта, размещённого в различных положениях. Было продемонстрировано, что даже при использовании менее 5% от полного набора паттернов удаётся восстановить изображение, достаточное для локализации объекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт №2025-0007).

[1] Shapiro J.H., *Phys. Rev. A*, **78**, №6, 061802, (2008).

[2] Shi D., Wang Y., Yang X., Zeng X., Liu Q., *Opt. Commun.*, **440**, 155-162, (2019).

РЕЗОНАНСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПОДПОРОГОВЫХ ГАРМОНИК С ВЫСОКОЙ ЭЛЛИПТИЧНОСТЬЮ АТОМАМИ ГЕЛИЯ, ВОЗБУЖДАЕМЫМИ УМЕРЕННО ИНТЕНСИВНЫМ ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПОЛЕМ

Емелин М.Ю.¹, Рябикин М.Ю.^{1,2}

¹Институт прикладной физики РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

mikhail.ryabikin@ipfran.ru

Численно исследована генерация подпороговых гармоник при многофотонной ионизации атома гелия эллиптически поляризованным лазерным полем. Обнаружены и теоретически объяснены резонансы эффективности генерации гармоник, сопровождающиеся одновременным значительным увеличением их эллиптичности.

Ключевые слова: генерация гармоник, эллиптическая поляризация, резонансы.

Эллиптически-поляризованное короткоимпульсное ВУФ излучение является эффективным средством диагностики магнитных материалов и структур и хиральных молекул и быстрых процессов в них. Привлекательным является создание источников такого излучения на основе генерации гармоник лазерного поля в силу ряда важных их преимуществ (компактность, относительная дешевизна, высокая когерентность, малая длительность импульсов и др.) по сравнению, например, с синхротронными источниками. В то же время, в силу особенностей механизма генерации высоких гармоник в широко используемом режиме туннельной ионизации частиц газа [1], получение на основе этого процесса интенсивного излучения с большой эллиптичностью вызывает трудности. Решением этой проблемы может быть использование для генерации гармоник излучения умеренной интенсивности, соответствующей режиму многофотонной (МФ) ионизации, так как при переходе в МФ режим эффективность генерации гармоник многократно возрастает [2], в значительной степени благодаря сильно возрастающей роли возможных однофотонных и МФ резонансов.

В работе исследована генерация гармоник умеренного порядка в режиме МФ возбуждения атома гелия. На основе численных расчетов показано, что при взаимодействии эллиптически поляризованного лазерного поля с атомом при определенных его частотах наблюдается повышенная эффективность генерации гармоник с одновременным увеличением их эллиптичности (которая может превышать по модулю эллиптичность лазерного поля в 2 и более раз) (рисунок). Эти частоты соответствуют определенным внутриатомным МФ резонансам. Показано, что в отличие от случая генерации высоких гармоник в туннельном режиме эффективность генерации гармоник в данном случае слабо зависит или почти не зависит от эллиптичности лазерного поля. На основе анализа заселенностей атомарных состояний в ходе действия лазерного импульса показано, в частности, что эффективная генерация 3-й и 5-й гармоник с большой эллиптичностью достигается при попадании лазерного поля, соответственно, в 4- и 6-фотонный резонанс между атомарными уровнями. На основе квантовомеханического анализа дано объяснение механизма, ответственного за излучение гармоник с большой эллиптичностью. Показано, что этот механизм связан с многофотонностью происходящих процессов и существенным различием скоростей резонансного возбуждения верхних атомных уровней с разными значениями магнитного квантового числа в эллиптически поляризованном лазерном поле.

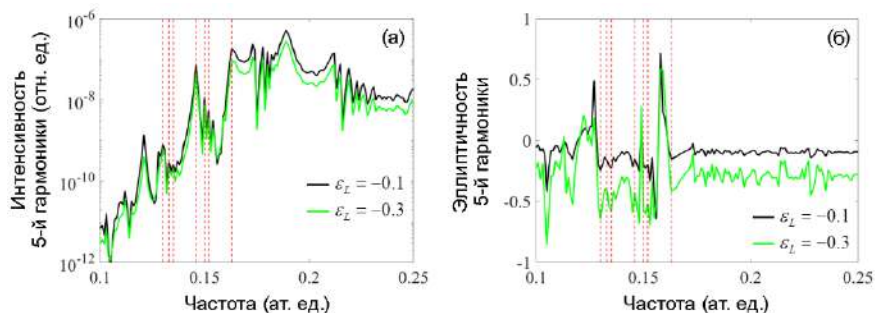


Рисунок. Зависимости интенсивности (а) и эллиптичности (б) 5-й гармоники от частоты лазерного поля для эллиптичности лазерного поля $\epsilon_L = -0.1$ и $\epsilon_L = -0.3$. Вертикальными линиями обозначены точки, в которых наблюдается локальный максимум интенсивности гармоники, а ее эллиптичность по абсолютной величине превышает эллиптичность лазерного поля

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант №24-12-00461.

[1] Corkum P.B., *Phys. Rev. Lett.*, **71**, 1994-1997, (1993).

[2] Singh M., Fareed M.A., Strelkov V. et al., *Optica*, **8**, 1122-1125, (2021).

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОДНОПИКСЕЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СО СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ В КОРОТКОВОЛНОВОМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Шумигай В.С., Исмагилов А.О., Опарин Е.Н.,

Лаппо-Данилевская А.К., Цыпкин А.Н.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

vova3orel@gmail.com

Современные методы построения изображений в коротковолновом инфракрасном диапазоне частот (SWIR) отличаются высокой стоимостью ввиду необходимости использования дорогих матричных приемников. Для решения этой проблемы предлагается использовать методику однопиксельной визуализации, применение которой совместно со спектрально-временным мультиплексированием паттернов освещения позволит реализовать мультиспектральную съемку объектов на нескольких длинах волн в режиме реального времени. В работе представлена схема однопиксельной камеры с использованием трех спектральных каналов SWIR диапазона для получения изображений продуктов питания.

Ключевые слова: однопиксельная визуализация, мультиплексирование, паттерны освещения.

В настоящее время мультиспектральные камеры в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR) становятся важным инструментом в агропромышленности и сельском хозяйстве [1]. Работая в диапазоне длин волн от 800 до 1700 нм, эти камеры способны обнаруживать влагу в пищевых продуктах, что позволяет выявлять повреждения и грибковые инфекции, которые не видны в видимом спектре. Однако, по сравнению с камерами видимого диапазона, SWIR-камеры выделяются своей высокой ценой: например, стоимость SWIR-камеры с разрешением 640x480 пикселей достигает 5 000 – 10 000 долларов.

Целью работы является разработка технических решений для конструирования и снижения стоимости мультиспектральной SWIR-камеры. В основу предлагаемого решения входит методика однопиксельной визуализации, которая не накладывает высоких требований к стоимости системы ввиду отсутствия необходимости использования матричного приемника излучения [2]. Так, в рамках экспериментальной реализации (рисунок а) лазерное излучение на длинах волн 800 нм, 1050 нм и 1550 нм объединяется в один пучок с помощью системы из светоделителя (СД) и зеркала на 800 нм (Z_{800}). Далее излучение попадает на расширитель пучка, который состоит из отрицательной (L_1) и положительной линзы (L_2). После взаимодействия с цифровым микрзеркальным устройством (ЦМУ) излучение на трех длинах волн попадает в 4f систему, которая переносит изображение с поверхности модулятора на объектную плоскость. Так, в плоскости объекта формировались паттерны Адамара с разрешением 64 на 64 пикселя. При взаимодействии с объектом излучение рассеивается в определенный телесный угол. Часть из этого излучения фиксируется с помощью системы детектирования, состоящей из линзы (L_5) и однопиксельного детектора (ОД). Причем управление DMD осуществляется через компьютер, а считывание данных с ОД происходит через блок аналого-цифрового преобразователь (АЦП), подключенного к синхронному усилителю сигнала (УС). Демультимплексирование сигнала от разных длин волн происходит во времени за счет наложения разного временного сдвига на импульсы от источников.

Восстановление изображений с разрешением 64 на 64 пикселя происходило за счет обратного преобразования Адамара. Результаты восстановления приведены на рисунке б.

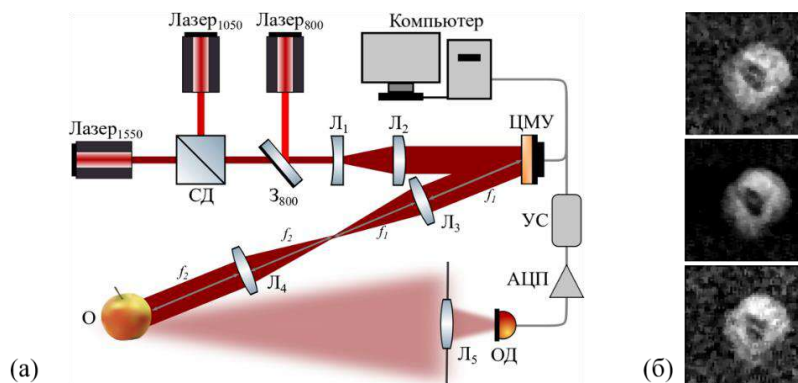


Рисунок. (а) Схема экспериментальной установки, (б) примеры восстановленных изображений

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт №2025-0007).

[1] Malakauskas D.M., Ding H., Berman B.P., Thantu N., Karem K.L., Gammino V.M., *Applied Spectroscopy*, **79**, №5, 872-878, (2025).

[2] Edgar M.P., Gibson G.M., Padgett M.J, *Nature photonics*, **13**, №1, 13-20, (2019).

ВОЗБУЖДЕНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИЙ РАБИ ДВУХУРОВНЕВОГО АТОМА ВО ВНЕШНЕМ ПЕРЕМЕННОМ ПОЛЕ

Попов Е.Н.^{1*}, Селеменчук А.С.², Воскобойников С.П.³

¹Университет ИТМО, НОЦ фотоники и оптоинформатики, Санкт-Петербург, Россия

²СПбГУ, факультет математики и компьютерных наук, Санкт-Петербург, Россия

³СПбПУ, институт компьютерных наук и кибербезопасности, Санкт-Петербург, Россия

*enp-tion@yandex.ru

В работе теоретически продемонстрирована возможность периодической динамики квантового состояния атома во внешнем оптическом поле, модулированном на кратных частотах по частоте и амплитуде.

Ключевые слова: двухуровневый атом, осцилляции Раби, оптический резонанс.

В данной работе рассматривается динамика двухуровневого атома во внешнем оптическом поле. Частота и амплитуда поля модулируются на частотах 2Ω и Ω , причём частота модулируется около частоты атомного перехода, а амплитуда около нуля. Динамика такой системы может быть записана с помощью системы из трёх уравнений [1]:

$$\begin{cases} \dot{n} = -\Phi(t)v \\ \dot{v} = \Phi(t)n - \Delta(t)u \\ \dot{u} = \Delta(t)v \end{cases} \quad (1)$$

$$\Phi(t) = \Phi_0 \cos \Omega t \quad (2)$$

$$\Delta(t) = \Delta_0 \cos 2\Omega t, \quad (3)$$

где $\Phi(t)$ – это частота Раби, пропорциональная амплитуде поля, а $\Delta(t)$ – это отстройка поля от резонанса, n – это инверсия населённости атома, u и v – это действительная и мнимая части оптической когерентности на атомном переходе. При произвольной зависимости амплитуды поля и отстройки от времени система не имеет аналитического решения.

Ранее в работе [2] было показано, что в подобной динамической системе может наблюдаться квазирезонансный эффект, который заключается в резком возрастании осцилляций трёх функций решения при определённой частоте модуляции Ω . Однако, в работе [2] этот эффект был теоретически предсказан для спиновой поляризации ансамбля щелочных атомов в условиях релаксации и постоянной оптической накачки. Здесь мы предлагаем наблюдение подобного эффекта для одиночного двухуровневого атома. Наиболее важным наблюдением является то, что роль накачки в случае двухуровневого атома может играть спонтанный распад, который стремится ориентировать вектор (n, v, u) вдоль $(-1, 0, 0)$. Другим важным наблюдением является яркость эффекта для запрещённых переходов, так как в них отношение скорости спонтанного распада к частоте Раби оказывается ниже, чем для разрешённых переходов [3].

Несмотря на схожесть математической модели, в данной работе есть новый, по сравнению с работой [2], теоретический результат: мы обнаружили эффект вырождения резонансной частоты при вариации отношения амплитуд Φ_0 и Δ_0 . Он заключается в обращении профиля спектральной кривой около резонансной частоты Ω при определённом значении Φ_0/Δ_0 . Природа этого вырождения пока не ясна.

Мы полагаем, что эффект возбуждения осцилляций n , v и u при определённой частоте модуляции внешнего оптического поля можно использовать как метод управления квантовой динамикой атомных состояний в задачах квантовых технологий.

[1] Allen L., Eberly J. H., *Optical Resonance and Two-Level Atoms*, - P.:Wiley, pp. 233, (1975).

[2] Popov E.N., Gaidash A.A., Kozubov A.V., Voskoboynikov S.P., *Phys. Scripta.*, **99**, 105505, (2024).

[3] Scully M.O., Zubairy M.S., *Quantum optics.*, -P.: Cambridge UK, Cambridge University Press., pp. 630, (1997).

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ МНОГОФОТОННОМ ПОГЛОЩЕНИИ НАКАЧКИ В КРИСТАЛЛАХ LiTaO_3 И LiNbO_3

Сарафанова М.В.¹, Бодров С.Б.^{1,2}, Шугуров А.И.¹, Бакунов М.И.¹

¹ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

²ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

margarita.platonova@unn.ru

Проведено экспериментальное сравнение эффективностей оптико-терагерцовой конверсии в кристаллах LiTaO_3 и LiNbO_3 в режимах многофотонного поглощения лазерной накачки на длинах волн 800 и 1030 нм.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, танталат лития, ниобат лития.

Новейшие приложения терагерцового излучения, включающие настольное ускорение заряженных частиц и сверхбыстрое управление намагниченностью материалов, требуют развития методов генерации терагерцовых импульсов с высокой (≥ 1 МВ/см) напряженностью электрического поля. Распространенным методом генерации сильных терагерцовых полей является оптическая ректификация импульсов фемтосекундного титан-сапфирового лазера (с длиной волны 800 нм) в кристалле LiNbO_3 (LN). Одним из основных факторов, приводящих к насыщению эффективности оптико-терагерцовой конверсии при повышении интенсивности накачки, является трехфотонное поглощение лазерного излучения в LN. LiTaO_3 (LT) имеет большую ширину запрещенной зоны (4,9 эВ), чем LN (3,8 эВ), что должно приводить к подавлению трехфотонного поглощения на длине волны 800 нм. Это делает LT привлекательным в качестве кристалла-генератора [1]. Недавно, однако, трехфотонное поглощение на длине волны 800 нм было экспериментально обнаружено в LT, причем более сильное, чем в LN [2]. В связи с этим возникает вопрос о соотношении потенциальных возможностей LT и LN в качестве нелинейных кристаллов для оптико-терагерцовой конверсии (величина квадратичной нелинейности у этих кристаллов примерно одинакова).

В данной работе выполнено прямое экспериментальное сравнение эффективности оптико-терагерцовой конверсии в кристаллах LT и LN при двух длинах волн накачки: 800 и 1030 нм. Терагерцовое излучение генерировалось в тонком слое кристалла в условиях черенковского синхронизма и выводилось вбок через широкую грань кристалла с помощью кремниевой призмы, что позволяло минимизировать потери на поглощение в кристалле. На рисунке приведены зависимости эффективности конверсии от энергии импульса накачки. Для всех зависимостей характерно наличие начального линейного участка и последующего насыщения, связанного с влиянием многофотонного поглощения. При накачке на длине волны 800 нм насыщение наступает раньше для LN, чем для LT (рисунок а), что противоречит выводу работы [2] о более сильном трехфотонном поглощении в LT. Линейный участок для LN на рисунке а характеризуется большей крутизной по сравнению с аналогичным для LT, что можно объяснить влиянием кинематического фактора $(n_{\text{THz}}^2 - n_g^2)^{-2}$, который входит в выражение для энергии черенковского излучения [3]. При примерно одинаковом значении индекса группового запаздывания ($n_g \approx 2,2$) и существенно различном показателе преломления терагерцовых волн ($n_{\text{THz}} \approx 6,4$ в LT и 4,9 в LN) данный фактор примерно в 3 раза больше для LN. При накачке на длине волны 1030 нм насыщение наступает раньше для LT, чем для LN, что говорит о меньшем коэффициенте четырехфотонного поглощения у LN.

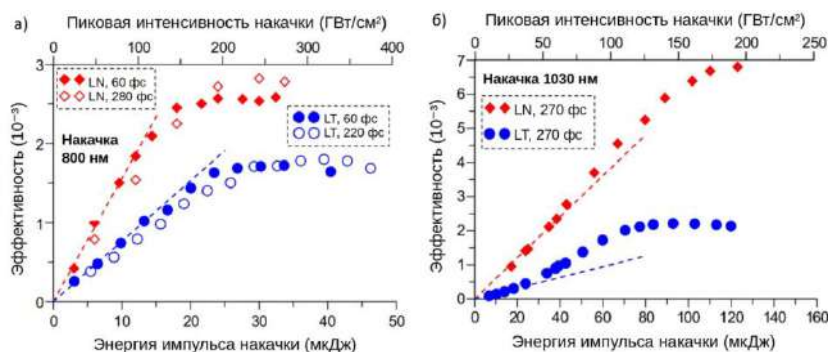


Рисунок. Зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от энергии импульса накачки для длины волны накачки а) 800 нм и б) 1030 нм

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (FSWR-2024-0003).

[1] Krizsán G., Tibai Z., Hebling J., Pálfalvi L., Almási G., Tóth G., *Opt. Express*, **28**, 34320-34327, (2020).

[2] Benabdelghania I., Bázsó G., Tóth G., Rácz P., Dombi P., Hebling J., Polónyi G., *Opt. Materials*, **153**, 115571, (2024).

[3] Bodrov S.B., Bakunov M.I., Hangyo M., *J. Appl. Phys.*, **104**, 093105, (2008).

ХРАНИЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ В ТЁМНЫХ ЭКСИТОНАХ С ПОМОЩЬЮ СПИН-ЗАВИСИМОГО ТРЕХИМПУЛЬСНОГО ФОТОННОГО ЭХА

Назаров Р.С., Соловьёв И.А., Капитонов Ю.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

roma-384@yandex.ru

Показано увеличение времени хранения оптической когерентности за счёт её переноса в тёмные экситонные состояния при помощи спин-зависимого протокола трёхимпульсного фотонного эха.

Ключевые слова: фотонное эхо, тёмные экситоны, хранение когерентности.

Одной из ключевых задач в области оптической обработки информации является увеличение времени хранения когерентности [1]. В данной работе продемонстрирована возможность значительного увеличения времени жизни когерентного сигнала за счёт переноса оптической когерентности в долгоживущие тёмные экситонные состояния. Метод реализован на основе спин-зависимого протокола трёхимпульсного фотонного эха в одиночной $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}/\text{GaAs}$ квантовой яме (КЯ) шириной 3 нм при воздействии поперечного магнитного поля.

Разработанная теория описывает когерентную динамику трёхуровневой системы, где одно из возбужденных состояний активно взаимодействует со светом (яркое), а другое — оптически запрещено (тёмное), но связано с первым через лармову прецессию (рисунок). При низких значениях магнитного поля наблюдается аperiодический режим, при котором временное хранение когерентности определяется временем жизни тёмного состояния T_1^{dark} , превышающим время жизни яркого экситона на порядок.

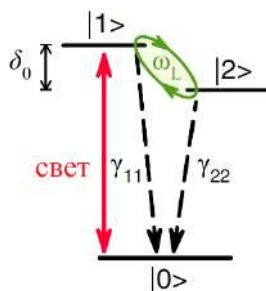


Рисунок. Энергетическая диаграмма трёхуровневой системы: оптический переход $|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ разрешён; состояния $|1\rangle$ и $|2\rangle$ связаны прецессией со скоростью ω_L

Экспериментально эффект подтверждён методом четырёхволнового смешения. Полученное значение времени жизни тёмных экситонов $T_1^{\text{dark}} = (170 \pm 30)$ пс, что согласуется с теоретическими предсказаниями. Также определены прецессионные частоты электронного и дырочного спинов и обменное расщепление δ_0 . В результате показано, что использование тёмных экситонов позволяет увеличить время хранения оптической информации без необходимости приложения сильного магнитного поля.

Метод имеет перспективы для реализации оптической памяти на основе спиновой когерентности и может быть применён к другим полупроводниковым системам с более длительным временем жизни тёмных состояний.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда № 25-12-20007 на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Нанопотоника».

[1] Langer L., Poltavtsev S.V., Yugova I.A., Yakovlev D.R., Karczewski G., Wojtowicz T., Kossut J., Akimov I.A., Bayer M., *Nat. Photon.*, **8**, 851-857, (2014).

**ПРИМЕНЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ТОКА В GaAs ЛАВИННЫХ ДИОДАХ
ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ**

Рожков А.В., Родин П.Б.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Предложен и реализован способ высокочастотной токовой модуляции полупроводниковых лазеров с помощью нового физического явления в арсенид-галлиевых лавинных диодах: автоколебаний тока с мягким возбуждением. При использовании коммерческого лазера с длиной волны 905 nm достигнута частота модуляции $f_{PRF}=2,4\text{GHz}$ ($t_{FWHM}=180\text{ps}$) при пиковой мощности $P_{peak}=5,5\text{W}$.

Ключевые слова: прямая токовая модуляция, ударно-ионизационная неустойчивость, лавинные диоды.

Предложен и экспериментально реализован способ прямой высокочастотной модуляции лазерного излучения с помощью нового физического явления в лавинных диодах - спонтанных высокочастотных автоколебаний тока [1]. Автоколебания с частотой от 2 до 10GHz спонтанно возникают в GaAs $p^{+}pin^{+}$ диодных структурах с напряжением пробоя 200-400V вследствие осцилляционной неустойчивости стационарного состояния на обратной «лавинной» ветви ВАХ. Будучи схожими с колебаниями в лавинно-пролетных диодах, автоколебания происходят в отсутствие внешнего резонатора и обусловлены процессами генерации и последующего рассасывания пакета неравновесных электронов и дырок, которые сопровождаются экранированием электрического поля неравновесными носителями. Частота автоколебаний зависит от профиля легирования и площади диодной структуры, а амплитуда тока достигает нескольких ампер.

Для высокочастотной модуляции были использованы GaAs лавинные диоды, имеющие типичные значения параметров ($t_{FWHM}=180\text{ps}$, $f_{PRF}=2,4\text{GHz}$ и $I_{peak}\sim 3\text{A}$), и коммерчески доступные лазеры SPLPL90_3 с 3-мя туннельно связанными излучателями (максимум излучения на длине волны 905 nm, аперттуру $200\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$). Согласование импедансов измерительного канала и 50Ω коаксиальной полосковой линии, в которую включены высоковольтный GaAs диод и лазер, позволило уменьшить отражение электрического импульса от лазера за счет некоторого уменьшения амплитуды модулируемого тока. Осциллограммы тока модуляции лазера и фото отклика быстродействующего $p-i-n$ диода, детектирующего оптическое излучение, свидетельствуют о достигнутой глубокой высокочастотной модуляции лазерного излучения. Пиковая мощность оптического сигнала P_{peak} при токе через лазер $\sim 2,0\text{A}$ составила $\sim 5,5\text{W}$, а значение энергии в импульсе $\sim 1\text{nJ}$. Обнаружено заметное увеличение мощности излучения при высокочастотной токовой накачке по сравнению со стационарным режимом. Это явление может быть связано с хорошо известным резонансным увеличением интенсивности лазерного излучения при частоте токовой накачки, близкой к частоте релаксационных колебаний в лазере [2].

Полученные нами предварительные результаты свидетельствуют о высокой эффективности модуляции лазеров при использовании лавинных GaAs диодов с высокочастотными автоколебаниями тока. Важно отметить, что достигнутое сочетание длительности t_{FWHM} , импульсной мощности P_{peak} и частоты следования оптических сигналов f_{PRF} не зависит от типа используемого лазера. Отметим, что рекордные значения сверхкоротких по длительности и периоду следования импульсов ($t_{FWHM}<1\text{ps}$, $T<10\text{ps}$) на сегодняшний день достигнуты в лазерах специальной конструкции в режимах пассивной (Q-switching) и активной (mode-locking) модуляции добротности [3]. Для таких лазеров характерны относительно низкие токи ($\leq 0,1\text{A}$) накачки, а типичные значения энергии в импульсе не превышают $0,1\text{nJ}$.

Отсутствие каких-либо ограничений на спектральный диапазон оптической высокочастотной модуляции делает перспективным использование предложенного способа модуляции для формирования эффективного широкополосного канала связи для передачи данных через атмосферу и улучшения разрешающей способности лазерных дальномеров.

[1] Рожков А.В., Иванов М.С., Родин П.Б., *Письма в ЖТФ*, **50**, № 20, 44-49, (2024).

[2] Жуков А.Е., Максимов М.В., *Современные инжекционные лазеры*, Изд-во Политехнического университета, Санкт-Петербург, (2009).

[3] Rafailov E.U. and Avrutin E., in *Semiconductor Lasers*, Baranov, A. and Tournie, E., Eds., Oxford: Woodhead Publishing, 149-217, (2013).

УПРАВЛЕНИЕ РАСПАДОМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ ПУТЕМ ЧИРПИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Новиков В.Б.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
vb.novikov@physics.msu.ru

Пространственно-временные вихревые лазерные импульсы, распространяясь в свободном пространстве, распадаются на несколько отдельных импульсов, теряя характерное кольцообразное распределение интенсивности света. Показано, что предварительное чирпирование поля импульса позволяет подавить такой распад.

Ключевые слова: оптические вихри, фемтосекундные лазерные импульсы, чирпирование.

В фотонике в качестве вихревых состояний света обычно рассматриваются лазерные пучки, имеющие фазовую сингулярность поля на их оси. Благодаря этому они переносят продольный орбитальный угловой момент (ОУМ), позволяющий, например, раскручивать микрочастицы с помощью света. Недавно обратили на себя внимание пространственно-временные вихревые лазерные импульсы, в которых «закрученность» фазы электрического поля имеет место в координатах «пространство-время» [1], что придает им поперечный ОУМ. Этот новый тип вихревых состояний света перспективен для ряда приложений. Например, задавая число вихревых импульсов и модулируя топологический заряд их фазовой сингулярности поля, возможно оптически передавать информацию [2]. Также такие импульсы представляют интерес для лазерного релятивистского ускорения электронов [3]. Однако, пространственно-временные вихревые импульсы оказываются неустойчивыми при движении в свободном пространстве. В результате дифракционного распыливания они распадаются на несколько отдельных импульсов света, что существенно ограничивает их применение.

В работе теоретически обнаружен и исследован эффект подавления процесса распада пространственно-временных оптических вихрей путем чирпирования лазерного излучения, используемого для их получения.

Для этого аналитически рассмотрено прохождение через метаматериал чирпированного фемтосекундного лазерного импульса с гауссовой огибающей, ограниченного размерами st и w в продольном и поперечном направлениях, соответственно, (Рисунок (а)). Спектрально-угловая зависимость комплексного коэффициента пропускания структуры имеет фазовую сингулярность $\mathcal{E}(k_x, \omega) = k_x w + i\tau(\omega - \omega_0)$, где c – скорость света, ω_0 – центральная частота лазерного импульса, k_x – тангенциальная компонента волнового вектора световой волны. Получено аналитическое выражение для электрического поля выходящего импульса на произвольной дистанции z от метаматериала. Показано, что в отсутствие чирпирования (параметр чирпа $\beta = 0$) падающего света за структурой формируется оптический вихрь, который сохраняется на дистанции одной рэлееской длины z_0 , превышение которой приводит к образованию двух импульсов (Рисунок (б)). Обнаружено, что введением отрицательного чирпа, соответствующего наличию высокочастотных спектральных компонент на переднем крае падающего импульса, возможно преодолеть распад светового вихря, получив его с идеальной кольцообразной формой на заданном расстоянии от структуры (Рисунок (б)).

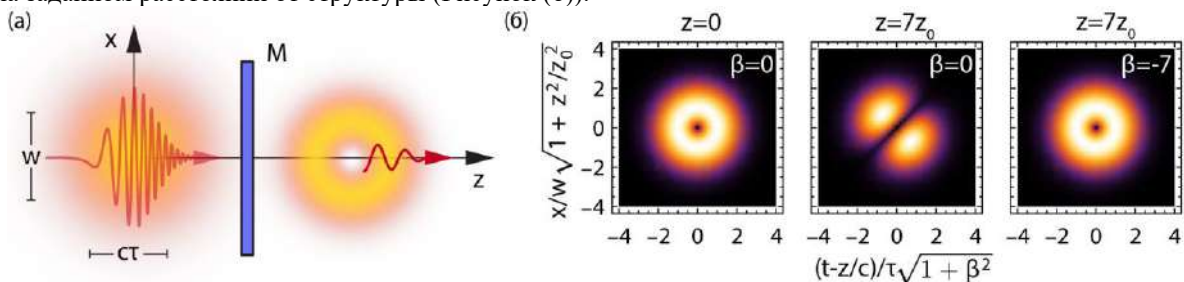


Рисунок. (а) Схема получения вихревого импульса света с помощью метаматериала (М),
(б) пространственно-временная зависимость амплитуды электрического поля прошедшего импульса на двух дистанциях $z = 0$ и $7z_0$ от метаматериала при параметрах чирпа $\beta = 0, -7$

Таким образом показано, что чирпирование падающего излучения позволяет смещать пространственную область формирования вихревого импульса вдоль направления движения света, добиваясь, в частности, подавления дифракционного распада вихря в дальнем поле.

Автор выражает благодарность доц., д.ф.-м.н. Т.В. Мурзиной за ценные обсуждения работы. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

- [1] Zhan Q., *Adv. Opt. Photonics*, **16**, №2, 163-228, (2024).
- [2] Sun F., Wang W., Dong H. et al., *Phys. Rev. Res.*, **6**, №1, 013075, (2024).
- [3] Huang S., Wang P., Shen X., Liu J., Li R., *Optica*, **9**, №5, 469-472, (2022).

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ АТТОСЕКУНДНОЙ ИНТЕРОФЕРОМЕТРИИ ПРИ СМЕШИВАНИИ СОСТОЯНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ЧЕТНОСТИ

Грызлова Е.В., Попова М.М., Юдин С.Н., Грум-Гржимайло А.Н.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, НИИЯФ, Москва, Россия
gryzlova@gmail.com

В докладе проанализированы эффекты, вызываемые изменением поляризации компонент полихроматического поля в двух схемах аттосекундной интерферометрии: бихроматической ионизации и RABBITT спектроскопии. Результаты проиллюстрированы расчетами для атомов неона и гелия.

Ключевые слова: когерентный контроль, угловые распределения, атомы.

Все схемы аттосекундной метрологии в том или ином виде основаны на когерентном управлении интерферирующими путями перехода. Среди множества постановок эксперимента можно выделить схемы, основанные на смешении каналов различной четности при атомной ионизации. Эта группа задач подразумевает наблюдение дифференциальных характеристик, таких как угловая зависимость фотоэлектронной эмиссии (угловое распределение фотоэлектронов) или степень спиновой поляризации, а сам когерентный контроль проявляется в нарушении некоторых характерных симметрий.

В докладе будут рассмотрены поляризационные аспекты для когерентного контроля в двух схемах: при ионизации бихроматическим полем, состоящим из основной и удвоенной частоты (рисунок а) и при ионизации высокочастотной гребенкой с энергиями, отстоящими на утроенную частоту затравочной гармоники (рисунок б). Измерения дифференциальных характеристик, сами по себе достаточно ресурсоемкие, ещё более усложняются необходимостью их проведения с разрешением по временной шкале, достаточным для целей аттосекундной метрологии. Тем не менее, обе предложенные схемы реализованы на практике [1, 2].

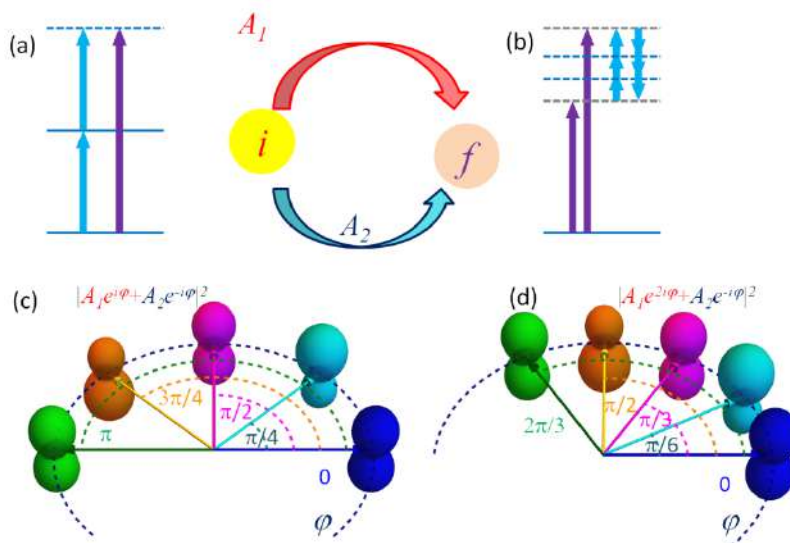


Рисунок. (a,b) схемы когерентного контроля при ионизации бихроматическим и полихроматическим полями; (c,d) угловое распределение фотоэлектронов при различных фазах между двумя путями перехода для схем (a,b)

В вышеупомянутых экспериментах гармоники были поляризованы линейно в одном направлении, что вызывало асимметрию угловых распределений фотоэмиссии относительно плоскости, перпендикулярной вектору поляризации (рисунок c,d). Однако техника генерации излучения в вакуумно-ультрафиолетовом диапазоне быстро развивается, и актуальным становится предсказание поведения атомарных систем в полях более сложной конфигурации: скрещенных линейно поляризованных и при наличии компоненты с круговой поляризацией.

В докладе будут рассмотрены различные комбинации поляризации гармоник, определены характерные для каждого случая понижения симметрии и даны рекомендации к оптимальному наблюдению эффектов когерентного контроля. Будет предложен способ определения фронта волны с субфемтосекундной точностью.

[1] Maroju P.K., Gryzlova E.V. et al, *Nature*, **578**, 386-391, (2020).

[2] Prince K.C., Gryzlova E.V. et al, *Nature Photonics*, **10**, 176-179, (2018).

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ И ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ РАЗРЯДОМ

Левусь М.В.^{1,2}, Ризаев Г.Э.^{1,3}, Селезнев Л.В.^{1,3}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

levus.mv21@physics.msu.ru

В работе исследуется увеличение дальности распространения пост-филаментационного канала (ПФК) мощного лазерного импульса. Предложен метод использования каскада стеклянных пластин для поддержания высокой интенсивности. Экспериментально показано уменьшение расходимости пучка и возможность поджига высоковольтного разряда.

Ключевые слова: филаментация, высоковольтный разряд.

В результате динамического баланса между керровской самофокусировкой и дефокусировкой, вызванной формированием плазмы, лазерное излучение распространяется вдоль тонкой нити — филамента [1]. При изучении этого явления, были зафиксированы световые каналы без образования плазмы, получившие название пост-филаментационных каналов (ПФК) [2]. Такой режим обеспечивает транспортировку высокоинтенсивного излучения с малой расходимостью на большие расстояния и открывает возможности для применения в дистанционном поджиге высоковольтного разряда. В данной работе с помощью каскада пластин экспериментально продемонстрировано увеличение дистанции, на которой сохраняется высокая интенсивность ПФК, достаточная для поджига высоковольтного разряда.

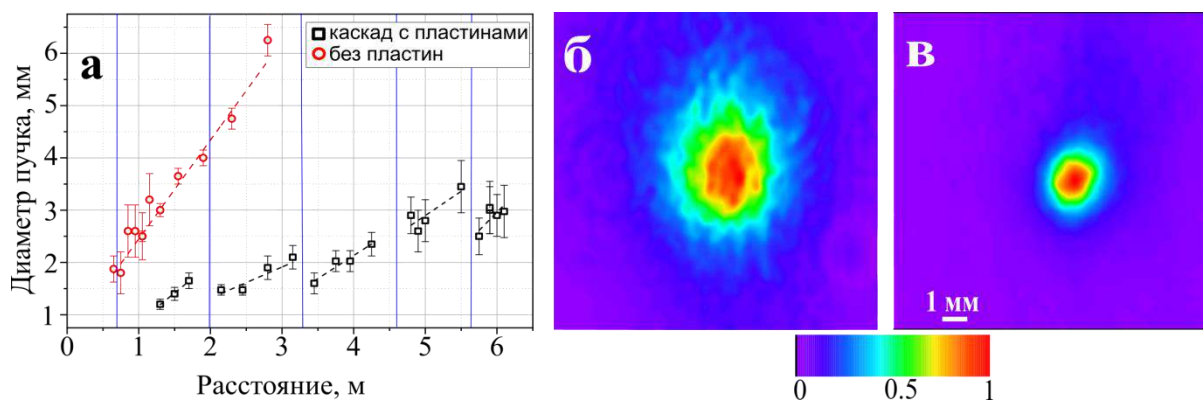


Рисунок. (а) Эволюция диаметра лазерного пучка по мере распространения от геометрического фокуса в случае каскада пластин и без них. (б) Профиль пучка на расстоянии 1.7 м при свободном распространении. (в) Профиль пучка на расстоянии 6.1 м в случае каскада пластин

Эксперименты проводились на титан-сапфировой лазерной системе с центральной длиной волны 750 нм и длительностью импульса 100 фс. После выхода из лазера пучок распространялся по воздуху 4 м и фокусировался сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 108 см. Из-за превышения критической мощности самофокусировки (около 3 ГВт) филаментация начиналась до геометрического фокуса, а за ним формировался ПФК. Для уменьшения расходимости ПФК использовались пять стеклянных пластин толщиной 2 мм, размещённых на разных расстояниях от фокуса. Благодаря керровской нелинейности в пластине происходило уменьшение поперечных размеров пучка. На Рисунке (а) продемонстрирована эволюция диаметра пучка по мере распространения в двух случаях: с пластинами и без них. Синие вертикальные линии на графике показывают расположение пластин. Параметры каскада пластин были выбраны так, чтобы в них не наблюдалось образование плазменных каналов (филаментации). При свободном распространении диаметр пучка на расстоянии 2 м от фокуса достигал 5 мм по уровню $1/e$, а с каскадом пластин на расстоянии 6 м не превышал 3 мм (Рисунок а). На расстоянии 1,7 м без пластин пучок имел слегка эллиптическую форму (Рисунок б), а при прохождении через каскад на 6 м сохранял почти круглый профиль (Рисунок в). Оценки показали, что при свободном распространении размер пучка на 6 м составит около 18 мм. С помощью системы электродов было показано, что при свободном распространении разряд поджигается на расстоянии до 2.5 м. Применения каскада пластин позволило увеличить данное расстояние до 6 метров.

Таким образом, применение каскада стеклянных пластин позволяет эффективно поддерживать высокую интенсивность на больших расстояниях, достаточную для поджига высоковольтного разряда.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-12-00056).

[1] Couairon A., Mysyrowicz A., *Physics reports*, **441**, 47-189, (2007).

[2] La Fontaine B., et al., *Phys. Plasmas*, **6**, 1615-1621, (1999).

КОМПАКТНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОЙ МЕЗОСКОПИИ ЖИВЫХ ОБЪЕКТОВ

Кунгуров К.А.^{1,2}, Солотенков М.А.^{1,2}, Фетодов А.Б.^{1,2,3}, Ланин А.А.^{1,2,3}

¹Физический Факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, 11992, Россия, Москва

²ООО «ЛИФТ Центр», 143025, Россия, Москва

³Российский Квантовый Центр, 143025, Россия, Москва

kungurovkirill@gmail.com

Разработан фемтосекундный итербиевый волоконный усилитель chirпированных импульсов для твердотельного солитонного лазера. В качестве стретчера используется подстраиваемая chirпированная волоконная Брэгговская решетка (ВБР). Полученное выходное излучение обладает необходимыми параметрами для применения источника в области биофотоники.

Ключевые слова: многофотонная микроскопия, волоконный усилитель, усиление chirпированных импульсов, сверхкороткие импульсы.

Оптические инструменты визуализации протяженных биологических объектов с субклеточным пространственным разрешением (мезоскопия) очень важны как для задач фундаментальной биологии и медицины, так и для прикладных аспектов разработки лекарственных препаратов [1-4]. Флуоресцентная микроскопия при двухфотонном возбуждении тонким «оптическим листом» (light-sheet) является одной из наиболее перспективных техник для исследования целиком живых протяженных тканей, органов или организмов целиком (личинки рыб), однако такая методика весьма требовательна к оптической системе и лазерному излучению накачки. В нашей работе мы показываем, что специально разработанный волоконный итербиевый усилитель фемтосекундных импульсов является отличным источником излучения для двухфотонной мезоскопии.

В работе демонстрируется итербиевый трехкаскадный волоконный усилитель chirпированных импульсов. В качестве затравки используется твердотельный солитонный лазер (1058 нм, 1.8 нДж, 160 фс, 72 МГц). Чтобы избежать нелинейного набега фазы внутри волокна стретчера, затравка сначала заводится в предстретчер, состоящий из 4 м световода с большой площадью моды. Далее излучение попадает в стретчер на базе подстраиваемой температурой волоконной chirпированной Брэгговской решетки (ВЧБР), что приводит к его удлинению в 2500 раз. Затем частота следования импульсов понижается до 1 – 5 МГц. Миновав финальный усилитель на основе световода с большой площадью сердцевинки, излучение сжимается до фемтосекундной длительности в решеточном компрессоре и выводится из схемы. В результате удается сформировать излучение с энергией импульса 1 мкДж, длительностью 190 фс и хорошим временным контрастом (Рисунок). Варьируя параметры ВЧБР, достигаются энергии до 2 мкДж на частотах повторения 1 – 5 МГц и хорошим временным контрастом с пиковой мощностью до 8 МВт. Разработанный источник обладает высокой стабильностью, выделенной поляризацией и качеством пучка M^2 не хуже 1.24 (Рисунок в). Представленные параметры излучения хорошо подходят для исследований в области передовой биофотоники.

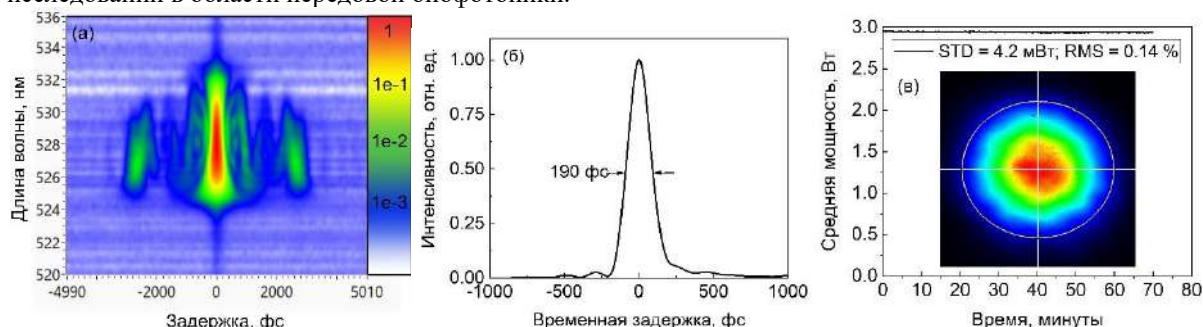


Рисунок. (а) – FROG спектрограмма сжатого импульса с энергией 1 мкДж и частотой 3 МГц;
(б) – Огибающая интенсивности сжатого импульса; (в) – Кривая стабильности средней мощности и
качество пучка в дальнем поле

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (No. 22-72-10044).

- [1] Guesmi K., et al, *Light Sci Appl.*, **7**, 12, (2018).
- [2] Lanin A.A., et al, *Opt. Lett.*, **45**, 836-839, (2020).
- [3] Takanezawa S., et al, *Nat Commun.*, **12**, 2979, (2021).
- [4] Lanin A.A., et al, *Journal of Physics: Photonics*, **3**, 044001, (2021).

НАБЛЮДЕНИЕ СВЕРХБЫСТРОЙ ДИНАМИКИ АССОЦИАТИВНОГО СОСТОЯНИЯ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ ГИДРОКСИДА

Краснов П.О.^{1,2}¹СФУ, МНИЦ СКХ, г. Красноярск, Россия²ФГБУ ФСНКЦ ФМБА России, г. Красноярск, Россияkpo1980@gmail.com

С помощью резонансного неупругого рентгеновского рассеяния (RIXS) и квантово-динамического моделирования продемонстрировано ранее неизвестное ассоциативное состояние, управляемое сверхбыстрой ядерной динамикой, когда к ОН-иону приближается ион водорода от соседней молекулы воды.

Ключевые слова: RIXS, сверхбыстрая ядерная динамика, сеть водородных связей.

Современные рентгеновские спектроскопические методы, использующие, например, резонансное неупругое рассеяние (RIXS) и резонансное оже-рассеяние (RAS), являются мощными инструментами для изучения вещества, подходящими для многих современных приложений. За последние десятилетия эти методы достигли огромного прогресса в понимании и управлении ядерной динамикой на фемто- и пикосекундных временных масштабах. В представляемой работе метод RIXS использовался для селективного возбуждения рентгеновским излучением ОН-иона в водном растворе и исследования механизма, с помощью которого возникающее ассоциативное состояние притягивает ион водорода от соседних молекул воды.

В результате измерений [1], выполненных на установке синхротронного излучения SPring-8 (Япония), в спектрах водных растворов NaOH/NaOD в дополнение к пику сильного локального распада наблюдался специфический пик, связанный с изотопным эффектом (Рисунок, слева).

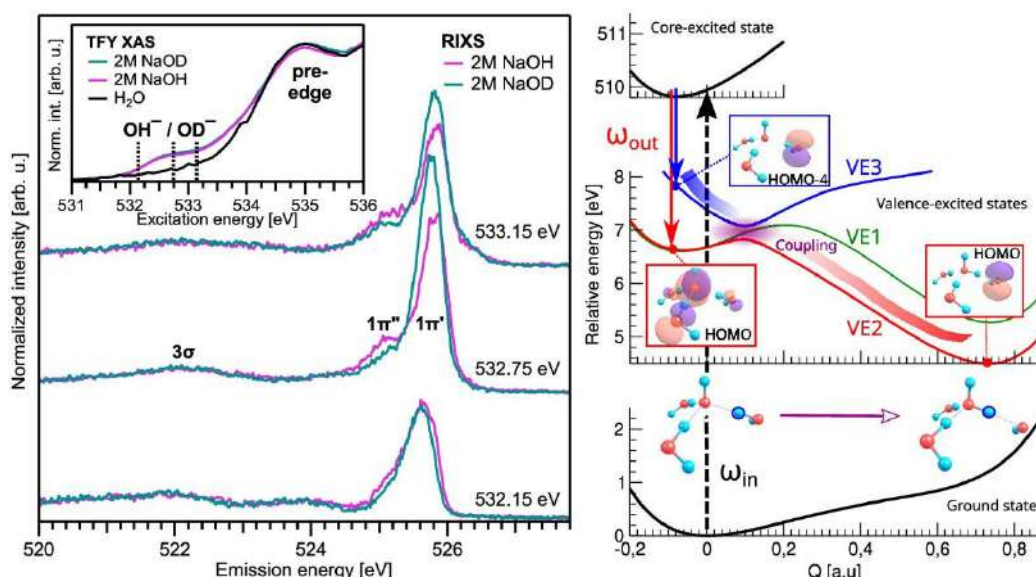


Рисунок. Спектры RIXS водных растворов NaOH/NaOD (слева) и иллюстрация динамики вдоль координаты переноса иона водорода в остоно-возбужденном состоянии, инициированном после фотопоглощения ОН-ионом (справа) [1]

Посредством квантово-химических вычислений на основе метода TDDFT электронной структуры модели водного кластера ОН-иона в основном и в валентно- и остоно-возбуждённых состояниях (Рисунок, справа) с последующим проведением расчётов методом динамики волнового пакета было обнаружено, что выявленный специфический пик обусловлен ассоциативным состоянием в водном растворе гидроксида, где ион водорода приближается к ОН-/ОД-иону после резонансного возбуждения. Это новое наблюдение в процессе рассеяния сольватированного гидроксид-иона показывает, что ядерная динамика в RIXS может включать ассоциативные состояния, в дополнение к диссоциативным состояниям, наблюдаемым ранее в таких системах, как вода и уксусная кислота.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 25-12-00148).

[1] Yin Z., Krasnov P., Thürmer S., Malerz S., Chatzigeorgiou E., Cui Y., Yamazoe K., Miyawaki J., Tokushima T., Sâthe K., Grâsjö J., Harada Y., Polyutov S., Wörner H.J., Odelius M., Gelmukhanov F., Rubensson J.-R., Kimberg V., *J. Am. Chem. Soc.*, **147**, №11, 9190-9197, (2025).

ЧАСТОТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИМПУЛЬСА НА ФРОНТЕ ИОНИЗАЦИИ В КРИСТАЛЛЕ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

Курников М.А., Бакунов М.И.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

kurnikov.michail@yandex.ru

На основе численного моделирования показана возможность многократного повышения частоты и сжатия длительности однопериодного терагерцового импульса при его отражении от фронта фотогенерации носителей в кристалле GaP.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, фронт ионизации, преобразование частоты.

Фронты ионизации, создаваемые в веществе ультракороткими лазерными импульсами, рассматриваются как способ реализации релятивистски движущегося зеркала для доплеровского преобразования частоты электромагнитных волн различных диапазонов. При создании в газе с помощью пикосекундного УФ-лазера фронта ионизации с плотностью плазмы $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ было продемонстрировано повышение частоты микроволнового излучения с 35 до 173 ГГц [1]. На фронте фотоионизации в полупроводнике может быть достигнута более высокая плотность плазмы ($\sim 10^{18}\text{-}10^{19} \text{ см}^{-3}$), что делает такие фронты перспективными для преобразования терагерцовых волн. Однако при однофотонной ионизации кремния импульсами фемтосекундного титан-сапфирового лазера эффективного преобразования частоты терагерцового излучения достичь не удалось [2], что, по-видимому, связано с малой ($\sim 8 \text{ мкм}$) длиной пробега фронта ионизации в кремнии. В работе [3] было предложено использовать трёхфотонную ионизацию кристалла ZnS, что позволяет увеличить длину пробега фронта ионизации до сотен микрон. В этом материале, однако, показатель преломления терагерцовых волн ($n_{\text{THz}} = 2,89$) меньше группового оптического индекса ($n_g = 2,43$ на длине волны 800 нм), что не позволяет сформироваться отраженному от фронта терагерцовому импульсу. Для замедления фронта ионизации предлагалось создавать его лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности, что существенно усложняет экспериментальную реализацию.

В настоящей работе на основе численного моделирования методом FDTD показано, что избежать указанных выше проблем можно путем использования двухфотонной ионизации кристалла GaP импульсами титан-сапфирового лазера (с длиной волны 800 нм). Действительно, двухфотонная ионизация обеспечивает достаточно большую длину пробега фронта ионизации в кристалле и, следовательно, эффективное взаимодействие фронта с падающим на него терагерцовым импульсом. Выполнение же соотношения $n_{\text{THz}} < n_g$ между $n_{\text{THz}} = 3,34$ и $n_g = 3,56$ обеспечивает возможность формирования отраженного импульса в простой коллинеарной схеме распространения фронта ионизации и терагерцового импульса. Как видно из рисунка, однопериодный терагерцовый импульс после отражения от фронта ионизации испытывает многократное сжатие — примерно в 20 раз (при этом спектральный максимум смещается с 0,3 до 6 ТГц), а амплитуда сжатого импульса сравнима с амплитудой импульса, испытавшего френелевское отражение от границы кристалла.

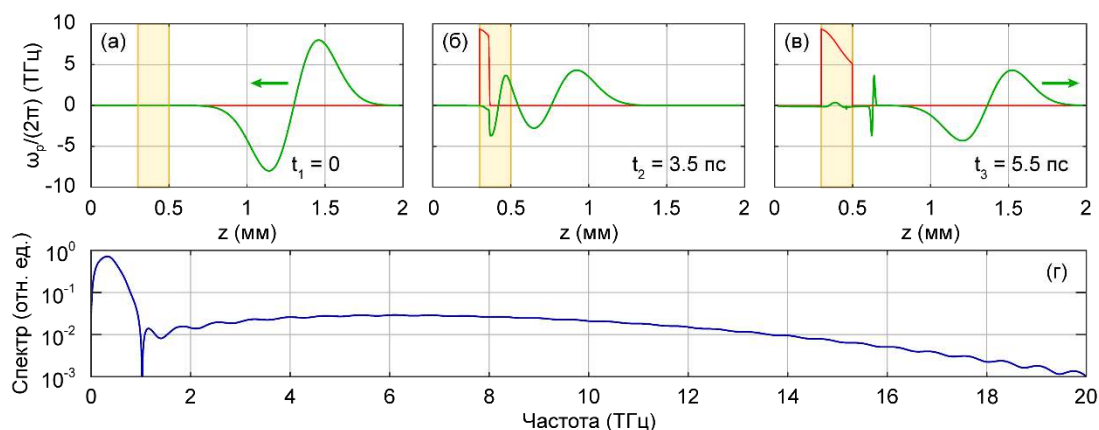


Рисунок. а), б), в) Моментальные снимки электрического поля терагерцового импульса (зеленая линия) в три момента времени. Желтым показан кристалл GaP, красной линией – величина плазменной частоты.

г) Спектр отраженного терагерцового поля

Предложенный метод может быть использован для преобразования излучения мощных субтерагерцовых источников в терагерцовые импульсы с высокой напряженностью поля.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (22-19-00371).

[1] Savage R.L., Brogle R.P., Mori W.B., Joshi C., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **21**, 5-19, (1993).

[2] Meng F., Thomson M.D., Roskos H.G., *Phys. Rev. B*, **90**, 155207, (2014).

[3] Kurnikov M.A., Novokovskaya A.L., Efimenko E.S., Bakunov M.I., *Opt. Exp.*, **28**, 33084, (2020).

ПОПЕРЕЧНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СОЛИТОНОВ В РЕЖИМЕ СИЛЬНОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ СВЕТОМ И ВЕЩЕСТВОМ

Зезюлин Д.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
dmitry.zezyulin@metalab.ifmo.ru

Получены аналитические решения для светлых и темных солитонов, которые описываются двухкомпонентной волновой функцией, учитывающей фотонное и экситонное поле. Исследована неустойчивость солитонов в планарном микрорезонаторе относительно возмущений в поперечном направлении.

Ключевые слова: свет-вещество, солитон.

Режим сильной связи возникает вблизи резонанса между частотами фотонной и экситонной мод при условии, что потери достаточно малы. Такая ситуация может быть в частности реализована в планарном диэлектрическом микрорезонаторе с квантовой ямой. В режиме сильной связи происходит гибридизация дисперсионных характеристик фотонов и экситонов, и формируется поляритонная дисперсионная характеристика, состоящая из нижней и верхней ветвей. Системы, поддерживающие режим сильной связи, обладают уникальной комбинацией свойств, которая в том числе включает сильную дисперсию собственных мод вблизи резонанса, а также сильную нелинейность, связанную с экситонной подсистемой. Сочетание этих факторов позволяет экспериментально генерировать солитоны даже за счет импульсов, несущих энергию порядка всего нескольких сотен фемтоджоулей [1].

Теоретическое описание поляритонных возбуждений вблизи одной из ветвей дисперсионной характеристики может быть сведено к обобщенному нелинейному уравнению Шредингера, записанному для поляритонной волновой функции. Более полное описание, позволяющее учесть обе ветви дисперсионной характеристики, требует изучения двухкомпонентной системы уравнений для фотонного и экситонного полей. В консервативном пределе, когда фотонные потери полагаются пренебрежимо малыми, такая система предсказывает одновременное существование светлых и темных солитонов, локализованных в одном направлении и движущихся с конечной скоростью в этом же направлении [2, 3]. Более того, решения, описывающие двухкомпонентные солитоны, могут быть выписаны в аналитической форме, что оказывается особенно удобным для последующего анализа и развития теории возмущений, учитывающей ранее отброшенные эффекты.

Большая часть теоретических результатов, касающихся существования и устойчивости двухкомпонентных солитонов в режиме сильной связи, получена для одномерного случая, предполагающего, что динамику солитонов можно исчерпывающе описать с помощью единственного пространственного измерения. Однако большинство поляритонных платформ эффективно планарны, и роль второй пространственной координаты, вообще говоря, не пренебрежима. В нашей работе исследуется неустойчивость двухкомпонентных солитонов относительно возмущений во втором (поперечном) пространственном направлении. Характерной особенностью такой задачи является то, что поперечная неустойчивость возникает за счет комбинации эффектов, возникающих в разных подсистемах, а именно из-за нелинейности экситонной компоненты и из-за дисперсии фотонной компоненты. На основе точных решений для двухкомпонентных солитонов получены аналитические результаты для инкремента неустойчивости в пределе длинноволновых поперечных возмущений. С помощью численного счета найден инкремент неустойчивости для возмущений с конечными длинами волн, как для светлых, так и для темных солитонов. Численное моделирование динамического развития поперечной неустойчивости предсказывает, что темные солитоны распадаются на цепочку двухкомпонентных вихрей, которые существуют в течение конечного времени. В ходе динамического распада светлых солитонов формируются локализованные пятна повышенной интенсивности, которые также существуют в течение некоторого переходного времени. Эти численные результаты поднимают вопрос о существовании устойчивых двумерных светлых солитонов (локализованных в обоих направлениях) и двумерных вихрей в модели, описывающей планарный микрорезонатор и учитывающей обе ветви дисперсионной характеристики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-12-00119, <https://rscf.ru/project/25-12-00119/>.

[1] Walker P.M., Tinkler L., Skryabin D.V., Yulin A., Royall B., Farrer I., Ritchie D.A., Skolnick M.S., Krizhanovskii D.N., *Nat. Commun.*, **6**, 8317, (2015).

[2] Kartashov Y.V., Skryabin D.V., *Opt. Lett.*, **41**, 1760, (2016).

[3] Yulin A.V., Zezyulin D.A., *Phys. Rev. E*, **106**, 044202, (2022).

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Львов К.В., Стремоухов С.Ю.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

lvov.kv14@physics.msu.ru

Исследованы особенности спектра коротковолнового излучения, генерируемого атомами в лазерном поле, при совместном применении скоростной модели динамики свободных носителей заряда и непertурбативного подхода к генерации излучения атомами.

Ключевые слова: непertурбативный подход, генерация гармоник, динамика носителей заряда.

Непertурбативный подход [1] к описанию свойств коротковолнового излучения, генерируемого газовыми средами, в частности, гармоник высокого порядка, уже много лет успешно применяется для анализа поляризационных и спектральных особенностей такого излучения [2, 3], а также для поиска новых методов фазового и квазифазового согласования гармоник высокого порядка [4, 5]. Расчеты требуют учета большого числа связанных и свободных электронных состояний в атоме, а также суммирования по многочисленным матричным элементам оператора импульса и оператора перехода между вычислительными базами. В силу своей вычислительной сложности применимость данного подхода к задаче распространения лазерного излучения в среде весьма затруднительна, поскольку требуется расчет плотности тока и нелинейной поляризации в каждой точке пространственной расчетной сетки и в каждый момент времени.

В то же время, благодаря своей вычислительной простоте, широкое распространение получили уравнения одно- и многоскоростной динамики свободных носителей заряда [6], в которых непрерывный спектр свободных состояний заменяется дискретными эквидистантными уровнями, разделенными энергией фотона лазерного излучения. Эти модели, как правило, используются при моделировании распространения интенсивного лазерного излучения в конденсированных средах. Дополнительные уточнения, связанные с временной задержкой ударной ионизации, вызванной необходимостью достижения носителями заряда критической энергии для участия в актах ударной ионизации, а также связанные с учетом зависимости скорости однофотонного поглощения от энергии носителей заряда, заложены в модели EMRE [7]. Эти уточнения позволили корректно описать возникновение микромодификаций объема кремния одиночными фемтосекундными лазерными импульсами среднего инфракрасного излучения [8]. Вместе с тем, помимо энергетического воздействия лазерного излучения на вещество, при его распространении генерируется когерентное излучение.

В данной работе впервые предложено объединение двух подходов: модель динамики носителей EMRE для расчета динамики амплитуд населенностей свободных состояний и непertурбативный подход для расчета плотности тока и спектра генерируемого когерентного излучения. Особенностью динамики амплитуд населенностей уровней, согласно модели EMRE, является «передвижение» носителей вверх по энергии в результате поглощения фотонов лазерного излучения и «перескоки» носителей вниз по энергии в результате ударной ионизации. Для расчета сопровождающую такое движение населенности генерацию микроскопического тока (и, соответственно, поля излучения) можно использовать основы непertурбативного теоретического подхода [1]. Анализ спектра генерируемого излучения продемонстрировал наличие гармоник основной частоты лазерного излучения.

Проведенные исследования являются первым шагом на пути создания теории генерации когерентного излучения в конденсированных средах, взаимодействующих с интенсивными лазерными полями.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-22-00188, <https://rscf.ru/project/24-22-00188/>).

- [1] Andreev A.V., Stremoukhov S.Y., Shoutova O.A., *Eur. Phys. J., D*, **66**, 16, (2012).
- [2] Ganeev R.A., Boltaev G.S., Stremoukhov S.Y. et al., *Eur. Phys. J. D*, **74**, 199, (2020).
- [3] Stremoukhov S.Y., Andreev A.V., Vodungbo B. et al., *Phys. Rev. A*, **94**, 013855, (2016).
- [4] Stremoukhov S., *J. Opt. Soc. Am. B*, **39**, 1203, (2022).
- [5] Stremoukhov S.Yu., Andreev A.V., *Laser Physics*, **28**, 035403, (2018).
- [6] Rethfeld B., *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 187401, (2004).
- [7] Lvov K.V., Potemkin F.V., Stremoukhov S.Yu. et al., *Mat. Today Comm.*, **35**, 105594, (2023).
- [8] Mareev E.I., Pushkin A.V., Migal E.A. et al., *Scientific reports*, **12**, 7517, (2022).

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ ДЛЯ АТМОСФЕРНОЙ СВЯЗИ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Решетников Д.Д., Малютина Е.В., Король Т.К., Голубева Т.Ю., Петров В.М.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

d.reshetnikov@spbu.ru

Квантовые оптические вихри с аксиально-симметричной поляризационной структурой актуальны в качестве носителя информации в каналах связи между подвижными объектами. Обсуждаются особенности разработки каналов связи, их характеристики и перспективы.

Ключевые слова: оптические вихри, пучки с пространственной структурой поляризации, атмосферные оптические каналы связи.

Малофотонные квантовые оптические вихри представляют собой пучки с векторной структурой поляризации и нулевой напряженностью поля на оси распространения пучка [1]. Особенно интересны пучки с аксиально-симметричным распределением поляризации (рис. 1), поскольку при их использовании не требуется синхронизация плоскостей поляризации приемно-передающей аппаратуры (рис. 2), как это делается в традиционных протоколах на основе линейной поляризации. Кроме того, на основе данных пучков возможно формирование базисных состояний для использования их в протоколах квантового распределения ключа [2].

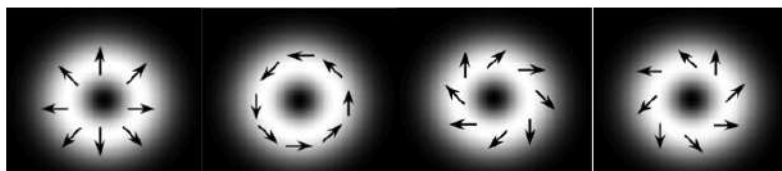


Рис. 1. Оптические вихри с аксиально-симметричной поляризационной структурой: распределение интенсивности и вектор поляризации

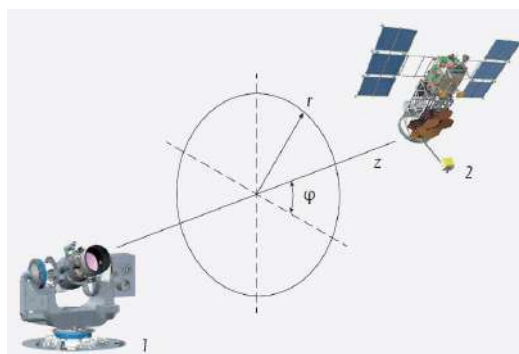


Рис. 2. Геометрия распространения пучка в открытом оптическом канале связи: 1 – получатель (находится на земле), 2 – отправитель (находится на спутнике); φ – угол поворота радиус-вектора r , z – направление распространения (спутник-земля)

На текущий момент основная трудность в применении таких пучков для организации каналов связи – отсутствие быстрых перестраиваемых систем генерации и детектирования. Наиболее распространёнными являются методы с использованием пространственных модуляторов света (SLM), однако они ограничены частотой в несколько кГц. Было показано, что формирование аксиально-симметричных поляризационных пучков возможно в схемах интерферометра с кубическими уголковыми отражателями, причем скорость генерации может достигать сотен МГц [3].

Отдельный интерес представляют вопросы устойчивости таких состояний при распространении в турбулентной среде. Поскольку кодирование осуществляется на поляризационной степени свободы, то произвольные повороты плоскости поляризации не могут привести к потере информации, однако, сильные искажения волнового фронта приводят к резкому росту уровня потерь в схеме детектирования [4]. Хорошо разработанные методы адаптивной оптики для пучков с орбитальным угловым моментом также подходят и для рассматриваемых вихревых пучков, что делает их применение возможным в каналах связи в присутствии атмосферной турбулентности.

[1] Sokolov A.L., *Opt. Eng.*, **56**, 014109, (2017).

[2] Reshetnikov D.D. Sokolov A.L., et al., *Radiophys. Quantum El.*, **67**, 51-63, (2024).

[3] Решетников Д.Д., Рыжая А.А., Павелина М.Е. и др., *Оптим. ж.* **92**, №3, (2025).

[4] Решетников Д.Д., Король Т.К., Малютина Е.В., Петров В.М., *Опм. и спектр.*, **132**, №7, (2024).

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИЕ ПРОЕКТЫ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО TV И 3D ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Шойдин С.А.

Сибирский государственный университет геосистем и технологий (СГУГиТ),
кафедра Фотоники и приборостроения, г. Новосибирск, Россия

shoydin@ssga.ru

Ключевой задачей при создании систем голографического телевидения и 3D дополненной реальности, работающих без дополнительного оборудования, в т.ч. без стереочков и наשלемых приборов, является передача голографической информации по радиоканалу. Предложены три решения поставленной задачи. Обсуждаются направления дальнейших исследований 3D изображений и задачи, переходящие в НИОКР.

Ключевые слова: голографическое телевидение, 3D дополненная реальность.

Целью и задачей проводящихся исследовательских работ и предстоящих опытно – конструкторских проектов в их максимально полной реализации является решение основной проблемы голографической телекоммуникации и телевидения - создания систем 3D дополненной реальности и нахождения способов реализации передачи голографического 3D видеоряда по стандартному радиоканалу.

Запретом на такую передачу являлось слишком большое количество информации, содержащееся в голограммах. Энтропийное сжатие, наподобие JPEG [1], не решало задачу, что наталкивало, до недавнего времени, на мысль о необходимости ожидания развития сетей связи до 5G-6G и появления голографического TV где-то после 2100 года [2].

В отличие от энтропийного подхода к сжатию голографической видеoinформации, гениальный российский учёный, один из основоположников голографии, академик Ю. Н. Денисюк, в работе с красноречивым названием «Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объёмного кинематографа и искусственного интеллекта?», ставил вопрос о необходимости поиска физического метода сжатия. Он писал о необходимости поиска решений по «разработке методов устранения избыточности информации, т. е. к исключению из голографического изображения той информации, которая не используется при зрительном восприятии» [3]. Такие исследования были проведены его учеником и кратко изложены в [4]. В них доказана возможность разделения пространственных гармоник, составляющих голограмму, на несущие пространственные частоты, которые не обязательно передавать, и на их девиацию, несущую информацию о 3D видеоряде. Передача девиации пространственных частот каждой голограммы и в целом голографического видеоряда занимает существенно меньшую полосу частот телевизионного радиосигнала, поскольку представление трёхмерной голографической информации в принципе становится похожим на известный в радиотехнике метод передачи одномерного сигнала на одной боковой полосе (SSB-технология). Дальнейшие шаги в этом направлении позволили ещё лучше сжать голографическую информацию, разлагая 3D сигнал не по гармоническим, а по собственным функциям. И, наконец, было найдено совсем оригинальное решение, чья суть основывается на том, что паттерн латерально падающего структурированного света, позволяет создавать структуру, работающую аналогично радиоголограмме. Это оказало революционное воздействие на методы решения задачи сжатия, да и на многие задачи построения 3D изображений [5].

Решение принципиального вопроса – неэнтропийное сжатие голографической информации, основанное на изучении физической структуры голограмм, позволило передать голографический видеоряд по стандартному радиоканалу [6].

Появившиеся в процессе этой работы вопросы могут быть разделены на две группы: первая-нерешённые задачи теоретической оптики 3D изображений, вторая-вопросы, готовые к вынесению в разряд НИОКР для решения конкретных задач гражданского и специального приборостроения.

Наше видение основных этапов предстоящей работы по реализации технического направления голографической коммуникации и телевидения, систем 3D дополненной реальности на горизонте внедрения 5-10 лет представлены в настоящем докладе.

[1] Lucente M., SMPTE 2nd Annual International Conference on Stereoscopic 3D for Media and Entertainment. New York, NY, June, 2011 [Электронный ресурс]
URL: https://www.researchgate.net/publication/268387890_The_First_20_Years_of_Holographic_Video_-_and_the_Next_20 (дата обращения 22.06.2025).

[2] Blinder D., Ahar A., Bettens S., *Signal Processing: Image Communication*, **70**, 114-130, (2019).

[3] Денисюк Ю.Н., *ЖТФ*, **61**, №8, 155-157, (1991).

[4] Shoydin S.A., Paozov A.L., *Photonics*, **8**, №10, 448-471, (2021).

[5] Shoydin S.A., Paozov A.L., *Applied Sciences*, **13**, №6, 4037-4048, (2023).

[6] Шойдин С.А., Пазов А.Л., *Сборник трудов XXXII международной Школы-симпозиума по голографии, когерентной оптике и фотонике (HOLOSCHOOL XXXII)*, 132-134, (2022).

ФАНТОМНАЯ МИКРОСКОПИЯ НА ОСНОВЕ КЛАССИЧЕСКИХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ

Вьюнышев А.М.^{1,2}, Давлетшин Н.Н.^{1,2}, Чиркин А.С.³

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Сообщаются результаты исследования визуализации микроскопических объектов методом фантомной микроскопии на основе классических световых полей. Произведен анализ качества полученных изображений объекта и глубины резкости оптической системы микроскопа. Полученные результаты демонстрируют широкие возможности метода фантомной микроскопии для развития трёхмерной визуализации тканей и клеточных структур.

Ключевые слова: оптическая микроскопия, фантомные изображения, корреляции интенсивности, глубина резкости.

Оптическая микроскопия является одним из основных методов исследования структурных, морфологических и физиологических характеристик живых тканей и клеток. Ключевой проблемой оптической микроскопии является развитие методов сверхвысокого разрешения, не требующих специальной подготовки образцов и не влияющих на их жизнеспособность. За последнее время предложен ряд оригинальных методов в области микроскопии сверхвысокого разрешения [1]. Другим важным фактором является глубина резкости оптической системы микроскопа, ограничивающая область, в пределах которой достигается высокое пространственное разрешение. Оптические изображения плоскостей вне глубины резкости испытывают существенное размытие и деградацию. Частично указанная проблема решается путем использования вычислительных методов и постобработки изображений, позволяя восстановить объемные изображения изучаемых микроскопических объектов [2].

Авторами работы предложен новый метод – метод фантомной микроскопии, основанный на принципе фантомной визуализации с использованием классических световых полей. Метод фантомной визуализации использует пространственную корреляцию световых полей [3]. Одно из полей взаимодействует с объектом и регистрируется интегральным детектором, не обладающим пространственным разрешением. Изображение объекта восстанавливается с помощью оптического поля второго пучка, который не взаимодействует с объектом, но, тем не менее, используется для поточечного измерения взаимной пространственной корреляции интенсивностей с первым пучком.

В настоящем докладе будут представлены результаты исследований визуализации микроскопического объекта методом фантомной микроскопии на основе классических световых полей. Результаты включают анализ пространственных корреляций интенсивности световых полей, а также качество полученных изображений микроскопического объекта и глубины резкости для рассматриваемого типа микровизуализации.

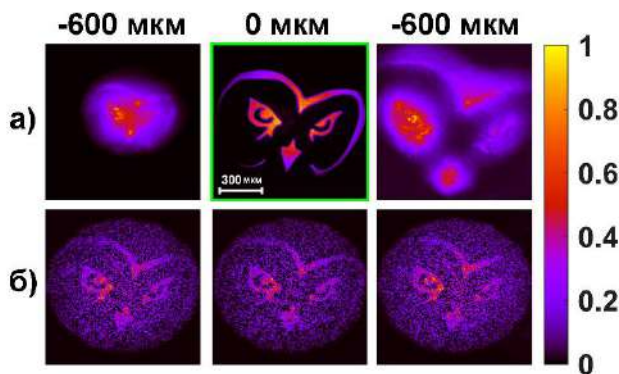


Рисунок. Изображения, полученные методом стандартной (а) и фантомной (б) микроскопией

Полученные результаты (рисунок) демонстрируют новые возможности для трёхмерной визуализации микроскопических объектов, крайне востребованной в области биомедицинских исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН. А.С. Чиркин выполнил исследования в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

[1] Astratov V.N. et al., *Las. & Photon. Rev.*, **17**, 2200029, (2023).

[2] Wu Y. et al., *Optica*, **5**, 704-710, (2018).

[3] Bromberg Y. et al., *Phys. Rev. A*, **79**, 053840, (2009).

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОЕ САМОСЖАТИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНА В КРИСТАЛЛАХ KDP

Арсентьев С.С., Гачева Е.И., Глушков К.А.,
Мухин И.Б., Соловьев А.А., Миронов С.Ю.

ИПФ РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород, Россия

sergey.arsentev@yahoo.com

В экспериментах продемонстрировано временное самосжатие интенсивных лазерных импульсов ближнего ИК диапазона со 196 фс до 36 фс, что с учетом энергетических потерь соответствует росту пиковой мощности в 1.2 раза.

Ключевые слова: самосжатие, посткомпрессия, KDP.

В настоящее время в науке появляется все больше задач, связанных с применением лазерного излучения высокой мощности. Лазеры с пиковой мощностью, достигающей десятков петаватт, позволяют исследовать фундаментальные процессы, такие как взаимодействие света с веществом, генерация и ускорение заряженных частиц, а также образование электронно-позитронных пар.

Пиковая мощность лазерного излучения может быть увеличена двумя основными способами: путем повышения энергии в импульсе или за счет сокращения его длительности. Первый подход требует создания более мощных усилительных систем с увеличенной апертурой, что сопровождается значительными техническими сложностями и высокими финансовыми затратами. Альтернативным методом является уменьшение длительности импульсов, которое достигается за счет использования эффекта фазовой самомодуляции. Этот метод известен как тонкопленочная компрессия или сжатие после компрессора [1]. Однако такой метод на данный момент успешно применен преимущественно к коротким импульсам длительностью менее 100 фс [2]. Для компенсации нелинейной фазы обычно используются chirpiрующие зеркала, которые должны обеспечивать высокое значение GDD (group delay dispersion) порядка $\sim 10\,000$ фс², функционировать в широком спектральном диапазоне и сохранять однородность по всему спектру. Тем не менее зеркала с высоким GDD имеют ограниченную спектральную полосу, что делает их неподходящими для эффективного сжатия субпикосекундных импульсов.

Альтернативой является метод временного сжатия без использования chirpiрующих зеркал, в котором компенсация нелинейной фазы достигается за счет противоположных знаков дисперсии групповой скорости и кубичной нелинейности среды.

В настоящей работе продемонстрировано временное самосжатие интенсивных лазерных импульсов (10 ГВт/см^2) ближнего ИК диапазона со 196 фс до 36 фс (Рисунок), что с учетом энергетических потерь соответствует росту пиковой мощности в 1.2 раза.

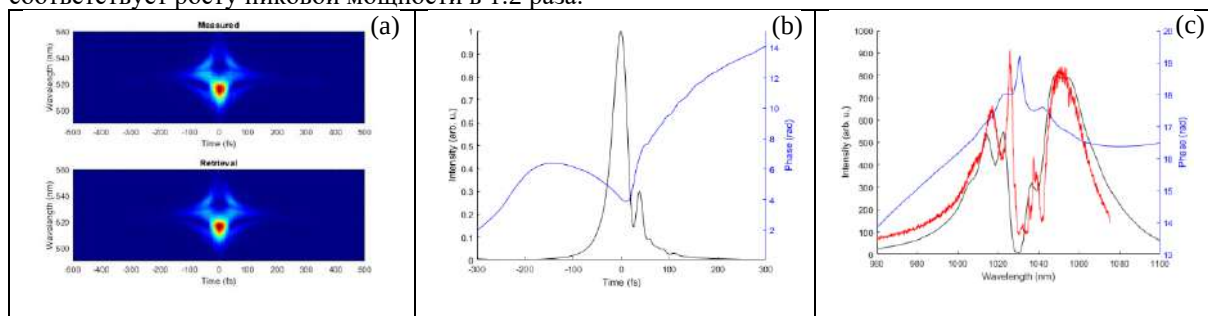


Рисунок. а) – FROG диаграммы сжатого импульса, экспериментальная и восстановленная;
б) – восстановленный временной профиль (черная линия) и временная фаза (синяя линия),
с) – восстановленный спектр (черная линия), экспериментально измеренный спектр (красная линия) и спектральная фаза (синяя линия)

- [1] Mourou G., Mironov S., Khazanov E., and Sergeev A., *Eur Phys J-Spec Top*, **223**, 1181-1188, (2014).
[2] Ginzburg V., Yakovlev I., Kochetkov A., Kuzmin A., Mironov S., Shaikin I., Shaykin A., and Khazanov E., *Opt. Express*, **29**, 28297, (2021).

НАЧАЛЬНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ СЕГМЕНТИРОВАННОГО ЗЕРКАЛА НА ОСНОВЕ Z – СКАНИРОВАНИЯ

Росчихмарова Ю.Д., Буйко С.А.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия

ofimova@otd13.vniief.ru

Приведен новый метод позиционирования сегментированных зеркал и телескопов на основе Z – сканирования. Представлены математическая модель и результаты экспериментальной апробации алгоритма.

Ключевые слова: сегментированное зеркало, z-сканирование, наклоны сегментов зеркала.

В силу технологических и массогабаритных ограничений для создания зеркал для крупногабаритных телескопов в последнее время применяют технологию составных отражающих поверхностей. Обеспечение требуемого качества изображения в телескопе с главным зеркалом, выполненным как составное, достигается юстировкой его зеркальных сегментов (ЗС), проводимой обычно в несколько этапов [1, 2].

Предлагается новый метод измерения наклонов сегментов составного зеркала. Будем называть его метод z-сканирования, так как он основан на анализе расфокусированных изображений, полученных за счет размещения камеры в нескольких точках на оси распространения излучения (ось Z). Метод базируется на геометрической (лучевой) оптике и имеет минимальные дополнительные аппаратные требования. Общая схема метода представлена на рисунке 1.

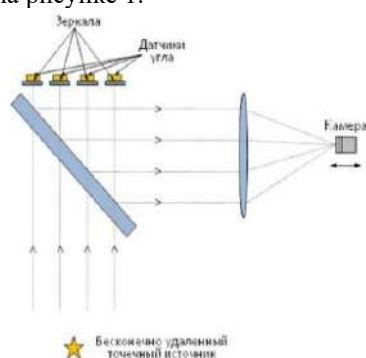


Рис. 1. Принципиальная схема метода z-сканирования

Данный метод схож с методом геометрического фазового поиска (geometrical phase retrieval, GPR) [3-5], который применяется для начальной оценки наклонов зеркал в космическом телескопе Джеймса Уэбба, в том, что использует для анализа расфокусированные изображения точечного источника. Метод z-сканирование основывается на предположении о возможности регистрации пятен на приемнике от каждого сегмента последовательно. Это исключает проблему неоднозначности идентификации пятен, отраженных от различных зеркальных сегментов, отмеченную в статье [4]. На рисунке 2 представлен пример указанной выше неоднозначности, которая мешает правильно оценить ошибку наклона в сегменте.

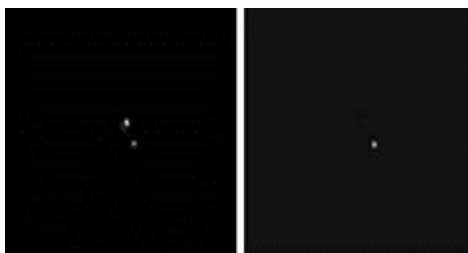


Рис. 2. Пример неоднозначной (слева) и однозначной (справа) идентификаций пятен

В работе представлены математическая модель и первые результаты апробации метода.

- [1] Демин А.В., Ростокин П.В., *Компьютерная оптика*, **41**, №2, 291-294, (2017).
- [2] Демин А.В., *Изв. вузов. Приборостроение*, **58**, №11, 901-907, (2015).
- [3] Carlisle E., Scott Acton D.S., *Applied Optics*, **54**, №21, 6454-6460, (2015).
- [4] Thurman T., *J. Opt. Soc. Am.*, **28**, №21, 1-7, (2011).
- [5] Jurling A., Fienup J., *J. Opt. Soc. Am.*, **31**, 661-666, (2014).

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ И СПЕКТРАЛЬНО СИНГУЛЯРНЫХ МОД В РТ-СИММЕТРИЧНОЙ СРЕДЕ

Бушуев В.А., Манцызов Б.И.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

bmantsyzov@gmail.com

С помощью спектрального метода рассмотрена динамика коротких оптических импульсов в диспергирующем одномерном РТ-симметричном фотонном кристалле вблизи порога лазерной генерации. Исследовано влияние локализованных спектрально сингулярных мод на параметры оптических импульсов.

Ключевые слова: импульс, РТ-симметрия, сингулярность.

Исследования квантово-механических систем с РТ-симметричным (parity-time-symmetric) неэрмитовым гамильтонианом показали возможность существования состояний с действительными собственными значениями энергии. В оптике аналогичными свойствами обладают среды с РТ-симметричной функцией диэлектрической проницаемости [1]. Благодаря балансу усиления и поглощения, возможно распространение РТ-симметричных мод с действительными значениями волновых чисел. Особый интерес представляет рассмотрение процессов распространения коротких оптических импульсов и исследование новых возможностей для управления их динамикой и параметрами в РТ-симметричных средах со спектральной сингулярностью вблизи особой точки.

В настоящей работе полуаналитическим спектральным методом решена граничная задача динамики распространения короткого волнового пакета и формирования локализованной спектрально сингулярной (СС) моды [2] в диспергирующем РТ-симметричном одномерном фотонном кристалле (ФК) вблизи условия Брэгга и особой точки. Используется также условие широкополосной квази-РТ-симметрии [3]. Распространение импульса рассматривается в режиме *усиления*, т.е. ниже порога лазерной генерации. Показано, каким образом наличие СС мод меняет динамику, форму и амплитуду отраженного и прошедшего импульсов.

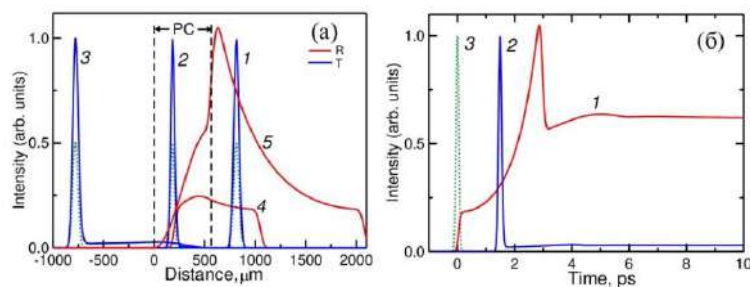


Рисунок. (а) Интенсивность прямого (кривые 1-3) и отраженного (4, 5) импульсов в различные моменты времени. (б) Интенсивность падающего (кривая 3), отраженного (1) и прошедшего (2) импульсов

По мере распространения импульса, внутри ФК (рисунок (а), кривая 2) формируются две локализованные СС моды – проходящая и отраженная (кривые 3, 4 и 5). Каждая из этих мод состоит из двух бегущих сонаправленных волн с одинаковыми частотами и различными волновыми векторами, что приводит к стоячей огибающей амплитуд суммарной бегущей волны (СС мод). Нулевые групповые скорости огибающих СС мод объясняются наличием материальной дисперсии среды. После выхода импульса из ФК, СС моды внутри среды продолжают излучать волны со сверхузким спектром и медленно затухающей огибающей амплитуд с характерным временем жизни СС мод (рисунок (б), кривые 1 и 2). Амплитуды СС мод зависят от длительности входного импульса. Короткий импульс формирует СС волны малой амплитуды, поэтому спектральная сингулярность незначительно меняет форму и амплитуду прямого и отраженного импульсов. Групповая скорость импульсов внутри ФК также не изменяется и равна скорости импульса в прозрачной однородной среде. Однако, в случае увеличения длительности входного импульса выше определенного порогового значения, амплитуды СС мод значительно увеличиваются. Это приводит к радикальным изменениям профилей огибающих выходных импульсов, они приобретают форму ступенчатой функции. Для СС мод существует явление однонаправленного отражения, когда амплитуды прямых СС волн не зависят от направления падения входного сигнала, а амплитуды отраженных волн могут отличаться на несколько порядков при изменении знака угла падения. Амплитуды СС мод также зависят от степени близости к ОТ, усиления среды и толщины ФК.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

[1] Зябловский А.А., Виноградов А.П., Пухов А.А., Дорофеев А.В., Лисянский А.А., *УФН*, **184**, 1177-1198, (2014).

[2] Mostafazadeh A., *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 220402, (2009).

[3] Bushuev V.A., Tsvetkov D.M., Konotop V.V., Mantsyzov B.I., *Optics Lett.*, **44**, 5667-5670, (2019).

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СУБПУЧКОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЗАДАННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ И ПОЛЯРИЗАЦИИ СИНТЕЗИРОВАННОГО ПУЧКА

Адамов Е.В., Богач Е.А., Дудоров В.В., Колосов В.В.

ИОА СО РАН, г. Томск, Россия

adamov@iao.ru

Впервые представлен метод определения начальных параметров субпучков, позволяющий одновременно формировать заданные распределения интенсивности и поляризации в рамках одной технологии путём управления амплитудой, фазой и поляризацией субпучков в решетке лазерных излучателей.

Ключевые слова: структурированные пучки, управление, синтезированные пучки.

Структурированный свет уже сегодня находит применения в лазерной обработке материалов, оптическом микроманипулировании, зондировании и во многих других отраслях науки и техники [1].

На основе метода когерентного сложения излучения волоконной лазерной решетки [2] с адаптивным управлением мощностью, фазой и поляризацией гауссовых субпучков возможна реализация полностью цифрового лазера, позволяющего обеспечить управление распределением интенсивности и поляризации синтезированного пучка [3]. Однако, для создания целевого распределения необходимо определить начальные параметры матрицы когерентных излучателей, а именно, амплитуды, фазы, поляризации и количество субпучков.

Нами был разработан метод определения начальных параметров матрицы когерентных излучателей, обеспечивающих заданные распределения поляризации и интенсивности излучения синтезированного пучка. Алгоритм (см. рисунок) представляет собой независимое применение для каждой из осей модифицированного нами метода Гершберга–Сакстона в системе когерентного сложения [4]. Задание параметров целевого векторного пучка обеспечивалось за счет распределения интенсивности и двух углов эллипса поляризации. Достоверность метода подтверждается тем, что параметры Стокса исходного и итогового распределений имеют высокую степень взаимной корреляции. Кроме того, метод демонстрирует сходимость с увеличением количества итераций, что говорит о его устойчивости.

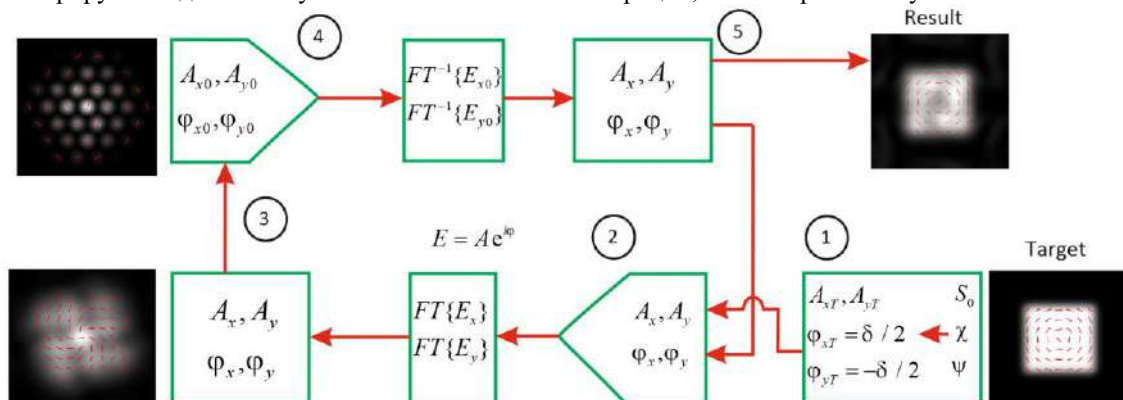


Рисунок. Схема модифицированного алгоритма Гершберга -Сакстона для синтезированного пучка в задаче формирования заданных распределений интенсивности и поляризации

[1] Rubinsztein-Dunlop H. et al., *J. Opt.*, **19**, №1, 013001, (2017).

[2] Vorontsov M.A., Lachinova S.L., *J. Opt.*, **15**, №10, 105501, (2013).

[3] Adamov E.V., Aksenov V.P., Dudorov V.V., Kolosov V.V., Levitskii M.E., *Opt. Laser Technol.*, **154**, 108351, (2022).

[4] Adamov E.V., Aksenov V.P., Atuchin V.V., Dudorov V.V., Kolosov V.V., Levitsky M.E., *OSA Continuum*, **4**, 182-192, (2021).

**РАЗРАБОТКА МУЛЬТИПУЧКОВОЙ СИСТЕМЫ
КОГЕРЕНТНОГО СЛОЖЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
В ГЛАВНОМ ФОКУСЕ ДЛЯ ПРОЕКТА XCELS**

**Бурдонов К.Ф.¹, Соловьев А.А.¹, Земсков Р.С.¹, Золотавин М.А.¹,
Кузнецов И.И.¹, Мухин И.Б.¹, Пестов А.Е.², Сиднев А.А.¹,
Шайкин А.А.¹, Стародубцев М.В.¹, Хазанов Е.А.¹**

¹ИПФ РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород, Россия

²ИФМ РАН, Нижний Новгород, Россия

k.burdonov@ipfran.ru

В работе представлен маломощный четырехканальный прототип системы геометрического сведения и когерентного сложения остросфокусированного фемтосекундного оптического излучения во встречной геометрии, разрабатываемый в интересах суб-экзаваттного лазерного комплекса XCELS.

Ключевые слова: суб-экзаваттный лазер XCELS, когерентное сложение оптических импульсов.

Активно обсуждаемый амбициозный проект XCELS (eXawatt Center for Extreme Light Studies) [1] направлен на создание в России крупной научной инфраструктуры на основе источника лазерного излучения с суммарной пиковой мощностью более 0,5 экзаватта. Прототипом проекта является функционирующий в Институте прикладной физики петаваттный лазерный комплекс PEARL [2].

Проект XCELS предполагает одновременную доставку в мишенную камеру оптических пучков ультракороткой длительности по двенадцати каналам, фокусировку этих пучков при помощи внеосевых параболических зеркал с остротой фокусировки, близкой к $F/1$, а также сведение и когерентное сложение пучков в одной точке, называемой главным фокусом. Образующаяся в фокусе топология оптического поля, является экспериментальной аппроксимацией инвертированной во времени дипольной волны.

Задачи геометрического сведения и когерентного сложения оптических каналов требуют согласованной работы целого ряда технологий, включающих стабилизацию направления каждого канала, стабилизацию фазы каналов в главном фокусе, а также коррекцию волнового фронта каждого канала с помощью адаптивной оптики.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по созданию маломощного малоапертурного прототипа системы когерентного сведения четырех оптических каналов в топологии, аналогичной многопучковой фокусировке проекта XCELS [3]. Попарно встречные оптические каналы, сходятся в один общий фокус посредством параболических фокусирующих зеркал $F/2$. Для данной геометрии отношение квадрата амплитуды электрического поля в фокусе от максимально возможной амплитуды поля, называемой дипольным пределом, составляет примерно 0.1, в то время как для геометрии XCELS данное соотношение имеет значение около 0.81.

В рамках работы выполнена экспериментальная реализация системы стабилизации положения пучка на входе в схему сведения и системы стабилизации относительной фазы четырех когерентно складываемых оптических импульсов, а также разработана методика измерения устойчивых структур оптического поля с применением сканирующего субволнового зонда.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 25-62-00019).

[1] Хазанов Е.А., Шайкин А.А., Костюков И.Ю., Гинзбург В.Н., Мухин И.Б., Яковлев И.В., Соловьев А.А., Кузнецов И.И., Миронов С.Ю., Коржиманов А.В., Буланов Д.Н., Шайкин И.А., Кочетков А.А., Кузьмин А.А., Мартыанов М.А., Ложкарев В.В., Стародубцев М.В., Литвак А.Г., Сергеев А.М., *Квантовая электроника*, **53**, №2, 95-122, (2023).

[2] Соловьев А.А., Бурдонов К.Ф., Гинзбург В.Н., Глявин М.Ю., Земсков Р.С., Котов А.В., Кочетков А.А., Кузьмин А.А., Мурзанов А.А., Мухин И.Б., Перевалов С.Е., Пикуз С.А., Стародубцев М.В., Степанов А.Н., Фукс Ж., Шайкин И.А., Шайкин А.А., Яковлев И.В., Хазанов Е.А., *Успехи Физических Наук*, **194**, №3, 313-335, (2024).

[3] Бурдонов К.Ф., Соловьев А.А., Земсков Р.С., Кузнецов И.И., Мухин И.Б., Пестов А.Е., Шайкин А.А., Стародубцев М.В., Хазанов Е.А., *Известия вузов. Радиофизика*, **67**, №11-12, 1020-1028, (2024).

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПО ДВУМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМ
ФЛЮЕНСА В ОКРЕСТНОСТИ ПЕРЕТЯЖКИ
НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

Котов А.В., Соловьев А.А.

ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия

kotov@ipfran.ru

Предлагается алгоритм восстановления формы волнового фронта на основе анализа двух распределений флюенса в окрестности перетяжки. Метод основан на использовании сверточной нейронной сети, обученной на численно сгенерированных данных.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, адаптивная оптика, коррекция волнового фронта.

В последние годы активно развиваются методы коррекции волнового фронта на основе нейронных сетей [1]. Их суть состоит в восстановлении волнового фронта по картине распределения интенсивности в фокальной плоскости. В отличие от дорогих с точки зрения времени работы и количества итераций стандартных подходов [2, 3], нейросетевые методы способны предсказать необходимый для коррекции волновой фронт за малое число шагов, вплоть до одного. Поэтому данные методы являются перспективным в задачах коррекции искажений волнового фронта, в том числе способными решить проблему разностных и динамических аберраций [4] и облегчить калибровку адаптивной оптической системы.

В работе предложена модель сверточной нейросети типа энкодер-декодер на базе TensorFlow. Архитектура включала по четыре блока в энкодере и декодере. Каждый блок содержал по два сверточных слоя (ядро 3x3, ReLU) и слой изменения размерности (MaxPooling или UpSampling с ядром 2x2). Число фильтров увеличивалось в энкодере и симметрично уменьшалось в декодере. Финальный слой был сверточный с линейной активацией и ядром 1x1.

Данные для обучения нейронной сети были сгенерированы численно. Генерация данных происходила следующим образом. Изначально задавалось распределение энергии в ближней зоне, оно представляло из себя круглую апертуру с единичной амплитудой. Далее генерировались амплитуды мод Цернике, после чего искажения волнового фронта задавалась как суперпозиция мод с соответствующими амплитудами. Для моделирования распределений флюенса в окрестности фокуса использовалось преобразование Фурье.

В численных исследованиях модель показала максимальную эффективность более 0.9 и положительную эффективность в широких пределах СКО искажений волнового фронта. Проверка работы предложенной модели на реальных данных показала хорошее соответствие реальных и восстановленных распределений в фокусе и в окрестности фокуса, а также возможность итерационной коррекции до числа Штреля > 0.8 [5].

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования РФ (проект № FFUF-2024-0038).

- [1] Youming Guo, Libo Zhong, Lei Min et al., *Opto-Electronic Advances*, **5**, №7, 200082-1, (2022).
- [2] Yang Huizhen, Li Xinyang., *Optics & Laser Technology*, **43**, №3, 630-635, (2011).
- [3] Ying Liu, Jianqiang Ma, Baoqing Li et al., *SPIE*, **8415**, 27-33, (2012).
- [4] Котов А.В. и др, *Квантовая электроника*, **51**, №7, 593-596, (2021).
- [5] Котов А.В., дис. канд. физ.-мат. наук: 1.3.19. – Нижний Новгород, 2025. - 129 с.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

АРТФОТОНИКА

**КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СМАЛЬТ
ИЗ ПАМЯТНИКОВ ДОМОНГОЛЬСКОЙ РУСИ**

**Гусева В.А.¹, Асеев В.А.¹, Ходасевич М.А.²,
Смолянская О.А.¹, Гаврилова К.А.¹, Леонидова А.А.¹**

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Институт физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь
gvera182002@gmail.com

Проведена классификация образцов смальт из памятников домонгольской Руси по рентгено-флуоресцентным спектрам. Исследовано более 200 образцов смальт из Киева, Новгорода и Переславля Хмельницкого. Выделены 4 кластера смальт и производится обсуждения их происхождения.

Ключевые слова: иерархический анализ смальт, химический состав, домонгольская Русь.

Химический состав различных культурных объектов дает объективную информацию, анализ которой может помочь в установлении социальных, культурных, технологических и торговых связей между различными народами и территориями в разные периоды времени. Исследование химического состава изделий из стекла I тысячелетия н. э., а также обнаружение первичных мастерских по производству стекла на территории Египта и Леванта в значительной мере расширило представления о способе организации стеклоделательных мастерских, торговых связях и распространении технологии обработки стекла по территории Средиземноморья и Ближнего Востока. На территории Древней Руси была сформирована отличная от византийской и европейской школа стеклоделания, что проявилось, в том числе, в отличие химического состава древнерусских и типичных европейских стекол. Вместо натриево-кальциево-силикатного стекла на Руси в X-XIII веках использовалось два типа стекол: свинцово-силикатное и калиево-свинцово-силикатное. К настоящему времени обнаружено около 30 памятников архитектуры Древней Руси, украшенных стеклянной мозаикой. Исследование химического состава мозаичных смальт может давать более точную информацию о месте стеклоделательного производства, поскольку мозаики можно связать с конкретными архитектурными памятниками, а также они встречаются в значительных количествах, что позволяет более точно выделять объединяющие признаки групп стекол. Актуальной задачей является разработка классификации данных, основанной на подробном археологическом описании с одновременным химическим анализом древнерусских стекол. Такая классификация позволит определить локальные и хронологические особенности стеклоделательного мастерства на территории Древней Руси. Проведена классификация образцов смальт из памятников домонгольской Руси по рентгено-флуоресцентным спектрам. Образцы были сгруппированы по географическому нахождению: из Рюрикова Городища (73 образца), Переславля Хмельницкого (34), Новгорода (65), Полоцка (49), Киева (37). Отдельным классом рассмотрена подъемный материал, найденный в реке Волхов близ Рюрикова Городища (75 образцов).

Классификация будет проводиться в пятимерном пространстве главных компонент методом с учителем – методом k ближайших соседей [1], в котором по правилу большинства из k ближайших соседей происходит отнесение объекта к известному классу (k nearest neighbors – kNN). Преимуществами метода kNN являются простота, которая не мешает достигать результатов классификации, не уступающих по качеству более сложным методам; независимость от статистических предположений, таких, например, как нормальное распределение переменных; эффективность, не зависящая от пространственного распределения классов. Среди возможных метрик пространства главных компонент было выбрано расстояние Махаланобиса, которое учитывает корреляции между переменными и инвариантно к масштабу. Также для повышения точности классификационной модели был применен оригинальный метод выбора спектральных переменных – поиск комбинации движущихся окон (search combination moving window – SCMW) оптимальной ширины, которая на единицу превышает размерность пространства главных компонент. Для лучшей по точности модели kNN ее точность равна 0,875, прецизионность – 0,725, а коэффициент корреляции Мэтьюса – 0,849. Полученные высокие показатели качества классификации показывают применимость предложенного метода многопараметрической классификации с учителем по географическому нахождению образцов древних восточно-славянских смальт по рентгено-флуоресцентным спектрам с приемлемой для практического использования точностью.

[1] Berrueta L.A., Alonso-Salces R.M., Héberger K., *Journal of Chromatography A*, **1158**, 196-214, (2007).

ИССЛЕДОВАНИЕ ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ПИГМЕНТОВ ИКОНЫ
«СПАС ВСЕДЕРЖИТЕЛЬ» МЕТОДОМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО
АНАЛИЗА IN SITU: ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДА

Волкова Т.В.¹, Магнитская Е.Р.¹, Гладкова Е.С.²,
Андреев И.И.¹, Басманов М.Д.¹, Смолянская О.А.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Международный центр реставрации, Ленинградская обл., с. Рождествено, Россия

elimagrom@gmail.com

В данной работе представлены результаты исследования иконы «Спас Вседержитель» методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) с использованием портативного спектрометра. Выявлены основные пигменты (свинцовые белила, охра, киноварь) и грунтовый слой, а также неожиданное присутствие серебра в декоративных элементах вместо ожидаемого золота. Отмечены возможности и ограничения метода для анализа органических материалов.

Ключевые слова: рентгенофлуоресцентный анализ, пигменты, икона.

Исследование иконы «Спас Вседержитель» (рис. 1) середины XIX века [1] методом рентгенофлуоресцентного анализа позволило определить элементный состав пигментов и грунта непосредственно на объекте. Портативный спектрометр (Tracer5) с родиевым анодом использовался для неинвазивного анализа 15 точек на различных участках иконы.



Рис. 1. Объект исследования и точки интереса, для которых снимались РФА-спектры

Анализ по данным [2] выявил наличие свинца, железа, ртути и кальция в соответствующих материалах (рис. 2). Серебро было обнаружено вместо ожидаемого золота в некоторых декоративных элементах. Метод позволил получить информацию о поверхностных и подповерхностных слоях, однако органические материалы (паволока, связующие) определить не удалось. Это подчеркивает важность сочетания РФА с другими методами.

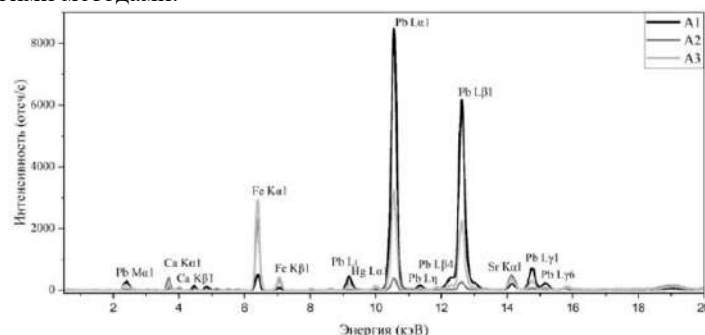


Рис. 2. Спектры, снятые с точек интереса A1, A2, A3

Данные исследования важны для понимания структуры памятника искусства и демонстрируют ценность инструментальных методов для реставрационной атрибуции. Результаты подчеркнули расхождения с предыдущими реставрационными заключениями, подчеркнув необходимость комплексного подхода.

[1] Волынский М.А., Гладкова Е.С., Гуров И.П. и др., *Оптический журнал*, **88**, № 8, 40-47, (2021).

[2] Elam W.T., Ravel B.D., Sieber J.R. X-ray Reference Data in SQLite, including a Python interface [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/xraypy/XrayDB/tree/master?tab=readme-ov-file> (дата обращения: 07.04.2025).

БИОФОТОНИКА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСМОТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЛИФЕРАЦИЮ КЛЕТОК МЕЛАНОМЫ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АНСАМБЛЯ РАКОВЫХ КЛЕТОК

Крапивина Н.А., Тучин В.В., Семенова Н.И.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия
nadyasvetiknadya@mail.ru

В данной работе исследуется влияние осмотического давления, которое прикладывается к некоторой части рассматриваемой поверхности в разные моменты времени с разной длительностью, на рост раковых клеток на двумерной поверхности эпидермиса.

Ключевые слова: меланома, просветление, эпидермис.

В данной работе исследуется влияние осмотического давления на меланому кожи. В качестве системы рассматривается двумерная клеточная решетка, представляющая собой слой эпидермальных клеток на базальной мембране [1] размером 200×200 (2×2 мм). Модель усложнена возможностью введения осмотического давления (далее «давление»), значение которого варьируется с помощью параметра Ω [2], в выбранной области поверхности или пространства.

Ранее в нашей статье [3] было показано, что изменение степени преобладания раковых клеток происходит нелинейным образом и эту зависимость можно условно разделить на две фазы. Первая фаза (до $t=2000$, что соответствует 48 часам) характеризуется активным увеличением степени преобладания раковых клеток Φ , а вторая фаза (после $t=2000$) характеризуется более медленным ростом Φ с выходом к некоторому значению насыщения. Экспериментальные данные, полученные в статье [3], показали, что наличие давления позволяет замедлить пролиферацию раковых клеток, что позволяет проводить дальнейшие исследования с вариацией входных параметров.

На рисунке представлены результаты влияния изменения длительности введения краткосрочного давления во время первой фазы на пролиферацию раковых клеток. Оно было введено в виде пятикратного увеличения нормального давления с $\Omega = 5$ в центральной области размером 100×100 . На фрагменте (а) показана эволюция степени преобладания раковых клеток Φ за безразмерное время для невозмущенного случая (оранжевая кривая) и после введения давления начиная с времени $t_0 = 240$ (сплошная линия) и $t_0 = 400$ (пунктирная линия) на промежуток времени равный $\Delta t = 25$ (синяя кривая), $\Delta t = 50$ (зеленая кривая) и $\Delta t = 100$ (красная кривая). Безразмерная длительность $\Delta t = 25$ соответствует примерно 30 минутам. Можно заметить, что при увеличении длительности введения краткосрочного давления во время фазы 1, начиная с момента времени $t_0 = 400$, значение Φ уменьшается более заметно. В то время как для $t_0 = 240$ зависимость имеет нелинейный характер, что может быть связано с тем, что $t_0 = 240$ является моментом, когда Φ резко увеличивается.

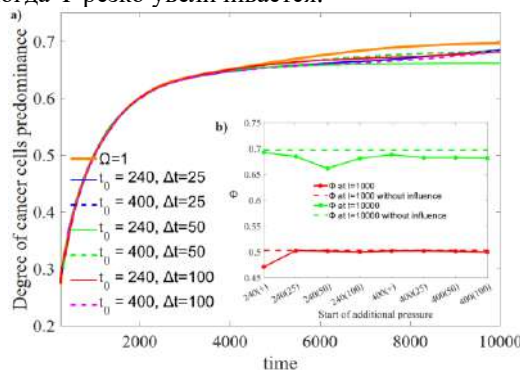


Рисунок. Эволюция модели с давлением $\Omega = 5$ в центральной части размером 100×100 . На фрагменте (а) показана эволюция степени преобладания раковых клеток Φ , а на фрагменте (b) показаны значения Φ в моменты времени $t = 10^3$ (красный) и $t = 10^4$ (зеленый) для разных начальных времен введения и длительностей давления. Обозначения «(25)», «(50)», «(100)» соответствуют кратковременному давлению, т.е. когда давление вводится на протяжении временных интервалов $\Delta t = 25$, $\Delta t = 50$, $\Delta t = 100$, а затем выключается

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (проект № FSRR-2023-0007).

[1] Hoshino T., Liu M.-W., Wu K.-A. et al., *Phys. Rev. E.*, **99**, №3, P. 032416, (2019).

[2] Семенова Н.И., Тучин В.В., *Известия вузов. ПНД*, **29**, №4, 559-570, (2021).

[3] Svetlitsyna N., Semenova N., Tuchin V.V., *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, **34**, №2, 0211024, (2024).

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Вьюнышева С.А.¹, Давлетшин Н.Н.^{1,2}, Мысливец С.А.^{1,2}, Вьюнышев А.М.^{1,2}

¹Институт Физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

s.vyunisheva@iph.krasn.ru

Исследовано влияние длительности лазерных импульсов (фемто- и наносекундных) на спектральные характеристики флуоресценции cgreGFP и флуоресцеина в микрорезонаторе. Использование наносекундных импульсов приводит к усилению сигнала и сужению пиков (~1 нм), что перспективно для гиперспектральной визуализации и биозондирования.

Ключевые слова: лазерно-индуцированная флуоресценция, микрорезонатор, ультракороткие лазерные импульсы.

Метод лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) активно используется для визуализации биологических тканей и зондирования молекулярных процессов. Метод ЛИФ позволяет получать высококонтрастные изображения биологических объектов благодаря селективному возбуждению флуоресцентных маркеров [1]. Оптимизация режима возбуждения в микрорезонаторе обеспечивает устойчивость модового состава, снижая шумы и другие нежелательные эффекты.

В нашем исследовании применялись две экспериментальные конфигурации, объединенные общим конструкционным элементом – микрорезонатором на основе фотоннокристаллических структур. В качестве активной среды использовались флуоресцентные среды со схожими спектральными характеристиками (cgreGFP и водный раствор флуоресцеина). Сравнивались два режима возбуждения: наносекундными (10 нс, 10 Гц) и фемтосекундными лазерными импульсами (140 фс, 80 МГц). Расчетное значение добротности микрорезонатора составило $\sim 4,4 \times 10^3$ [2]. Экспериментальные значения добротности резонансов (микрорезонаторных мод) оценивались по спектральной ширине линий усиления ЛИФ. При фемтосекундном возбуждении добротность составила 156 [3], в то время как при накачке наносекундными импульсами значение добротности превысило 530 (Рисунок). Увеличение добротности и сужение спектральной линии в случае наносекундных импульсов свидетельствуют о режиме предгенерации лазерного излучения.

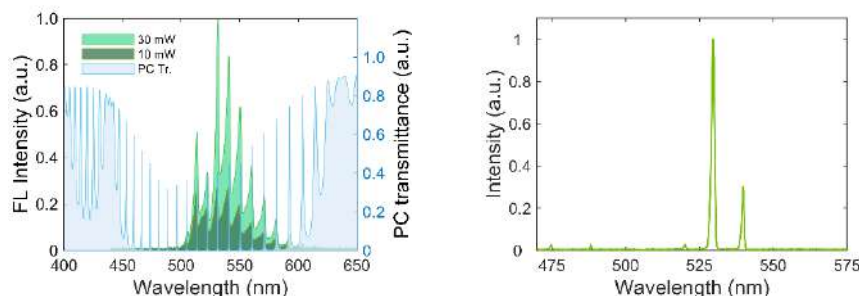


Рисунок. Спектральные характеристики ЛИФ при возбуждении фемтосекундными (слева) и наносекундными (справа) лазерными импульсами

Исследование показало, что наносекундные лазерные импульсы обеспечивают более узкие спектральные пики флуоресценции (~1 нм) по сравнению с фемтосекундными импульсами (>3 нм). Полученные результаты важны для разработки высокочувствительных методов спектроскопии и биомедицинской диагностики.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН.

[1] Qiao Z., Sun W., Zhang N., Ang R., Wang W., Chew S.Y., Chen Y., *Advanced Optical Materials*, **9**, 22, (2021).

[2] Maitland A., Dunn M.H., *Laser Physics*, North-Holland Pub.Co, Amsterdam, (1969).

[3] Vyunisheva S.A., Myslivets S.A., Davletshin N.N., Ereemeeva E.V., Vysotski E.S., Pavlov I.N., Vyunishev A.M., *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **300**, 122885, (2023).

**ПОЛЯРИЗОВАННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ
ЛЮМИНОФОРОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ
КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ С БИОМАКРОМОЛЕКУЛАМИ**
Парфёнова Е.В., Слюсаренко Н.В., Мочалов М.О., Слюсарева Е.А.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия
katrinfly@bk.ru

Методом поляризованной люминесценции исследованы процессы комплексообразования молекул-зондов (Родамин В и 6G, динатриевая соль 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-[(2-сульфонатобензо-ил)амино] бензолсульфокислоты) с биомакромолекулами. По рассчитанному экспериментально размеру излучателя сделан вывод об эффективности связывания.

Ключевые слова: люминофоры, биомакромолекулы, люминесценция.

Изучение образования комплексов малых молекул с биомакромолекулами, такими как полисахариды и белки, интересно как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения. Комплексообразование напрямую затрагивает вопросы функционирования биомакромолекул, их поверхностных свойств, конструирования систем доставки лекарств, создания биосорбентов и др. В качестве модельных объектов удобно использовать люминесцирующие молекулы-зонды, которые являются незаменимым инструментом в современных биомедицинских исследованиях.

В настоящей работе используется метод поляризованной люминесценции, который служит одним из наиболее информативных физических методов исследования молекулярных систем. При образовании комплекса люминофора с макромолекулой, размер которой может превышать размер люминофора в несколько раз, может происходить существенное замедление его диффузионного вращения. Это приводит к изменению степени поляризации люминесценции. Основываясь на соотношениях Перрена и Стокса-Эйнштейна, можно количественно оценить эффективный размер образующегося комплекса, и оценить влияние различных факторов (конформационные, зарядовые) на процесс комплексообразования.

Мы использовали линейку водорастворимых биомакромолекул с молекулярной массой от 14 до 67 кДа, отличающихся знаком и распределением заряда поверхности: сульфатированный арабиногалактан (SAG), бычий сывороточный альбумин (BSA) и лизоцим куриного белка (HEWL). В качестве зондов использовались два типа люминофоров с разным знаком заряда – органические красители Родамин В и Родамин 6G [1] и динатриевая соль 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-[(2-сульфонатобензо-ил)амино] бензолсульфокислоты [2]. Последний люминофор характеризуется конформационно-чувствительной люминесценцией, происходящей в результате фототаутомеризации. Были измерены спектры испускания, анизотропия люминесценции зонда в присутствии макромолекул с разной концентрацией, флуоресцентные времена жизни.

Анализ анизотропии показывает, что динатриевая соль 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-[(2-сульфонатобензо-ил)амино] бензолсульфокислоты наиболее эффективно связывается с BSA и HEWL. В то же время родаминовые красители эффективно связываются с SAG, что сопровождается увеличением размера излучателя. Полученные результаты обсуждаются в терминах различной жесткости связывания люминофора с макромолекулой, обусловленной различными механизмами комплексообразования.

Работа опубликована в рамках субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ.

[1] Khimenko E.V., Slyusareva E.A., Vasilyeva N.YU., Slyusarenko N.V., *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.*, **86**, №10, 1174-1178, (2022).

[2] Parfenova E.V., Slyusarenko N.V., Kulagin S.V., Rogova A.V., Tomilin F.N., Slyusareva E.A., *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.*, **88**, №6, 940-945, (2024).

**МОДЕЛЬ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО БИОСЕНСОРА
НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ АГРЕГАТОВ
ПЛАЗМОН-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ НАНОЧАСТИЦ Au-CeYbF₃**

Избасарова Э.А., Газизов А.Р.

Институт физики, КФУ, Казань, Россия

Izbasarova.E.A@mail.ru

Исследовано влияние плазмонных наночастиц на люминесценцию CeYbF₃-нанозондов. FDTD-моделирование позволило установить параметры плазмонного усиления люминесценции для создания высокочувствительных биосенсоров.

Ключевые слова: плазмонный резонанс, люминесцентные наночастицы, эффект Парселла.

В настоящее время интенсивно развиваются подходы к детектированию молекул в ультранизких концентрациях [1]. Особый интерес представляют люминесцентные наночастицы (ЛНЧ), легированные редкоземельными ионами. Данные материалы демонстрируют ряд уникальных характеристик, таких как способность к преобразованию частоты излучения и температурная зависимость люминесценции [2, 3]. Эти материалы обладают уникальными характеристиками, включая отсутствие фотовыжигания и мерцания, что делает их перспективными для создания сверхчувствительных сенсоров [4, 5].

Ключевым направлением в повышении эффективности таких систем является интеграция плазмонных наноструктур, способных изменять люминесцентные свойства ЛНЧ. Это взаимодействие основано на согласовании частоты локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР) с частотой возбуждения люминофоров, что приводит к усилению электромагнитного поля и, как следствие, к повышению чувствительности [6, 7].

Влияние плазмонных наночастиц на люминесценцию определяется конкуренцией двух эффектов: тушения из-за резонансного переноса энергии по Фёрстеру и усиления благодаря эффекту Парселла.

Наши предыдущие исследования уже показали, что детальный анализ условий доминирования эффекта Парселла является критически важным для оптимизации чувствительности сенсоров [8].

В рамках настоящей работы, посвященной детектированию молекул в растворе, было проведено численное моделирование методом конечных разностей во временной области (FDTD). Это позволило установить оптимальные параметры гибридных агрегатов Au-CeYbF₃, способствующие преобладанию эффекта Парселла над тушением. Результаты моделирования позволили определить ключевые параметры системы, включая межчастичное расстояние и пространственную конфигурацию, которые оказывают наибольшее влияние на соотношение вкладов конкурирующих эффектов.

Дополнительно, на основе результатов численного моделирования, была разработана методика анализа излучательных и безызлучательных каналов релаксации возбужденного состояния. Эта методика предоставляет новые возможности для увеличения чувствительности биосенсоров на основе коллоидных растворов, позволяя не только количественно оценивать коэффициент усиления люминесценции, но и определять оптимальные параметры системы для достижения максимальной эффективности.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (Проект FZSM-2025-0004).

- [1] Cohen L., Cui N., Cai Y., Garden P.M., Li X., Weitz D.A., Walt D.R., *ACS Nano*, **14**, №8, 9491-9501, (2020).
- [2] Qin X., Xu J., Wu Y., Liu X., *ACS Cent. Sci.*, **5**, 29-42, (2019).
- [3] Shah S.J., Li W., Tang Y., Hu Y., Jiang S., He H., Wang R., Zhao Z., Zhao Z., *Appl. Catal. B.*, **315**, 121555, (2022).
- [4] Yang B., Chen H., Zheng Z., Li G., *J. Lumin.*, **223**, 117226, (2020).
- [5] Жарков Д.К., Шмелев А.Г., Леонтьев А.В., Никифоров В.Г., Лобков В.С., Курбатова Н.В., Алюкатани М.Х., Хеммер Ф.Р., *Изв. РАН. Сер. физ.*, **84**, №12, 1746-1750, (2020).
- [6] Izbasarova E.A., Gazizov A.R., *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **88**, №12, 1949-1955, (2024).
- [7] Izbasarova E.A., Gazizov A.R., *J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys.*, **18**, №3, 347-357, (2025).
- [8] Избасарова Э.А., Газизов А.Р., *XIV Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ*, 83-84, (2025).

**ЛАПАРОСКОПИЧЕСКАЯ СПЕКЛ-КОНТРАСТНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ
МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ
АБДОМИНАЛЬНОЙ ИШЕМИИ У ЖИВОТНЫХ**

Приземин В.Н., Голубова Н.В., Серёгина Е.С., Дрёмин В.В., Потапова Е.В.

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева,
Научно-технологический центр биомедицинской фотоники, г. Орёл, Россия
vpriземин@gmail.com

Лапароскопическая лазерная спекл-контрастная визуализация (ЛСКВ) – перспективный метод оценки микроциркуляции крови. Использование ЛСКВ при миниинвазивных операциях позволяет в реальном времени получать пространственные карты распределения микрогемодинамических параметров тканей и выявлять зоны ишемии. В данной работе представлены результаты исследования изменения микроциркуляции крови в кишечной стенке у крыс при моделировании абдоминальной ишемии.

Ключевые слова: лазерная спекл-контрастная визуализация, лапароскопия, минимально инвазивные операции.

Лапароскопическая хирургия широко применяется благодаря минимальной инвазивности и быстрому восстановлению пациентов. Однако возможности объективного мониторинга микроциркуляции крови в биотканях в режиме реального времени во время операций ограничены. Лазерная спекл-контрастная визуализация (ЛСКВ) является перспективным методом, позволяющим объективно оценивать состояние микрогемодинамики тканей, выявлять зоны ишемии и контролировать процессы реперфузии непосредственно в ходе хирургического вмешательства [1, 2].

Цель работы – оценка динамики изменений микроциркуляции крови в кишечнике методом ЛСКВ при лапароскопическом моделировании абдоминальной ишемии.

Исследования выполнены с использованием лабораторных крыс возрастом 4 месяца. Моделирование абдоминальной ишемии осуществлялось путем наложения сосудистой клипсы типа «бульдог» на аркадные сосуды кишечника, что приводило к временному прекращению кровообращения в исследуемой области. Лабораторная установка включала в себя лазер с длиной волны 785 нм, высокоскоростную камеру, стандартный лапароскопический осветитель и стандартный осветительный зонд со специальным Y-образным разветвлением.

Спекл-изображения обрабатывались специализированным алгоритмом с пересчётом спекл-контраста в спекл-перфузию в соответствии с литературными данными [3]. Измерения выполнялись в три этапа: в исходном состоянии, сразу после наложения клипсы и во время реперфузии через 2 минуты после снятия клипсы. Регистрация изображений проводилась на протяжении минуты с частотой 30 кадров в секунду и экспозицией 33 мс.

В ходе эксперимента выявлено значительное снижение перфузии тканей кровью после наложения клипсы (460 [452; 470] отн. ед.) (рисунок а, б). После реперфузии отмечено восстановление кровотока (932 [921; 943] отн. ед.) (рисунок в). Таким образом, метод ЛСКВ демонстрирует чувствительность к изменениям в микрогемодинамике.

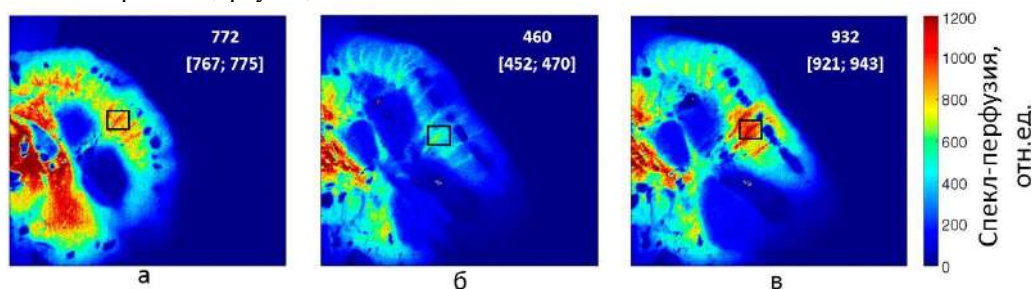


Рисунок. Изображения спекл-перфузии; прямоугольником выделены области интереса, цифрами обозначены результаты в виде медианы и межквартильного размаха: Ме [25%; 75%]

Полученные результаты подтверждают высокую перспективность использования лапароскопической ЛСКВ для объективной оценки микрогемодинамики в биотканях в ходе миниинвазивных хирургических вмешательств, что позволит улучшить контроль состояния тканей и повысить безопасность операций.

[1] Boas D.A., Dunn A.K., *J. Biomed. Opt.*, **15**, №1, 011109, (2010).

[2] Potapova E.V., Seryogina E.S., Dremine V.V., Stavtsev D.D., Kozlov I.O., Zhrebtsov E.A., Mamoshin A.V., Ivanov Y.V., Dunaev A.V., *Quantum Elec.*, **50**, №1, 33-40, (2020).

[3] Fredriksson I., Larsson M., *J. Biomed. Opt.*, **21**, №12, 126018, (2016).

**МЕТОД ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
ДЛЯ ИНТРАОПЕРАЦИОННОЙ ОЦЕНКИ
ИШЕМИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ КИШЕЧНОЙ СТЕНКИ**
**Горюнов И.А.¹, Шуплецов В.В.¹, Адаменков Н.А.², Мамошин А.В.³,
Потапова Е.В.¹, Дрёмин В.В.¹**

¹ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»,

Научно-технологический центр биомедицинской фотоники, г. Орёл, Россия

²БУЗ Орловской области «Орловская областная клиническая больница», г. Орёл, Россия

³ФГБУ «НМИЦ хирургии имени А.В. Вишневского» Минздрава России, Москва, Россия
i.goryunov@oreluniver.ru

Разработана система гиперспектральной визуализации для интраоперационной оценки нарушений кровоснабжения кишечной стенки, сочетающая спектральный анализ и методы машинного обучения для определения степени ишемического повреждения.

Ключевые слова: гиперспектральная визуализация, ишемия кишечной стенки, машинное обучение.

В настоящее время гиперспектральная визуализация (ГВ) активно внедряется в клиническую практику для решения широкого спектра прикладных медицинских задач благодаря своей неинвазивности и высокому потенциалу математической обработки. Высокое спектральное разрешение современных систем ГВ позволяет реализовывать алгоритмы анализа на основе как классических методов обработки и сегментации, так и современных методов машинного обучения [1]. В данной работе предложен метод ГВ, включающий разработанную систему для клинического применения и программные алгоритмы обработки спектральных данных, направленные на интраоперационную оценку ишемических изменений кишечной стенки. В качестве объекта исследования рассматривались участки кишечной стенки у пациентов, поступивших в стационар с острыми абдоминальными состояниями. Таким образом, целью работы являлась разработка и апробация метода ГВ, предназначенного для интраоперационного выявления ишемических изменений кишечной стенки, в условиях клинической практики.

Для реализации поставленной задачи система гиперспектральной визуализации была реализована с использованием медицинской стойки и усиленного шарнирного штатива. В состав системы входили широкополосный источник излучения OSL2 (ThorLabs, США) с волоконно-кольцевым осветителем FRI61F50 (ThorLabs, США) и гиперспектральная камера Specim (Spectral Imaging Ltd., Финляндия) с диапазоном 400–1000 нм. В клинической практике, в условиях острой хирургической патологии, сопровождающейся ишемией кишечной стенки, измерения с использованием гиперспектральной визуализации проводились интраоперационно в ходе лапаротомии. Измерения выполнялись до принятия окончательного решения о резекции, с целью оценки степени ишемических изменений в различных участках кишечной стенки. В исследование были включены пациенты с различными формами острой абдоминальной патологии, включая перитонит, ущемлённые грыжи, спаечную кишечную непроходимость и тромбоз верхней брыжеечной артерии. Измеренные гиперспектральные массивы были предварительно обработаны с использованием линейного двухволнового подхода для расчёта двухмерных карт тканевой сатурации, отражающих пространственное распределение уровня оксигенации в кишечной стенке [2]. Для выделения области интереса применялись методы нейросетевой сегментации, основанные на свёрточной архитектуре, обученной на структурных признаках изображения [3]. После выделения областей кишечной стенки проводилась кластеризация спектральных данных с использованием алгоритма гауссовых смесей без предварительной аннотации. В результате были выделены устойчивые кластеры, соответствующие различным физиологическим состояниям тканей, включая интактные и ишемически изменённые участки.

Предложенный подход продемонстрировал способность к автоматизированной дифференциации зон ишемии и формированию спектральных кластеров, содержащих характерные признаки патологических изменений. Он может быть использован для последующего анализа новых гиперспектральных данных за счёт сравнения их спектральных проекций с ранее полученными типовыми спектральными структурами.

Исследование было поддержано Российским научным фондом в рамках проекта №25-25-00482.

[1] Cui R., Yu H., Xu T., Xing X., Cao X., Yan K., Chen J., *Sensors*, **22**, №24, 9790, (2022).

[2] Adamenkov N.A., Mamoshin A.V., Dremine V.V., Potapova E.V., Shupletsov V.V., Goryunov I.A., Palalov A.A., Dunaev A.V., *Russian J. Oper. Surg. Clin. Anat.*, **8**, №1, 5-13, (2024).

[3] Zhou Y., Zhang L., Huang D., Zhang Y., Zhu L., Chen X., Cui G., Chen Q., Chen X., Ali S., *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.*, **315**, 124298, (2024).

**СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА
ТИХОХОДОК**

Омельченко А.Н., Окотруб К.А., Суровцев Н.В.

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

omelchenko.an.n@mail.ru

В данной работе оцениваются возможности спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) для исследования тихоходок. Рассматриваются спектры КРС, измеренные от различных тканей и органов тихоходок, а также особенности проведения КР-эксперимента.

Ключевые слова: комбинационное рассеяние света, тихоходки.

Тихоходки – микроскопические беспозвоночные, способные выживать в экстремальных условиях среды с помощью перехода в состояние криптобиоза. Данное состояние характеризуется изменением конфигурации животного и может быть вызвано рядом факторов, таких как высокое давление, вакуум или дегидратация. Несмотря на малый размер (часто до 1 мм), тихоходки являются многоклеточными животными и имеют достаточно сложную внутреннюю организацию, что затрудняет исследование процессов, происходящих при переходе в состояние криптобиоза на клеточном уровне.

Все чаще для исследования биологических объектов применяется методика спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) – это неинвазивная и бесконтактная методика, которая позволяет исследовать химический состав даже малого количества образца. Тем не менее, на данный момент существует всего несколько работ [1, 2], посвященных спектроскопии КРС тихоходок, в которых не были рассмотрены спектральные вклады от многих биологически значимых соединений.

В данной работе исследуются возможности спектроскопии КРС для изучения тихоходок. Животные добывались путем оттаивания мха в дистиллированной воде и последующего их извлечения из субстрата. Для обездвиживания на время эксперимента живых тихоходок вводили в состояние криптобиоза, после чего запечатывали в кварцевые лунки в капле воды для предотвращения высыхания. После проведения эксперимента тихоходки извлекались из образцов и наблюдались в течение суток для оценки выживаемости.

В настоящей работе были проведены измерения спектров КРС с использованием возбуждающего излучения с длинами волн на 532 и 780 нм и мощностями 20 и 100 мВт, соответственно. В ходе исследования были впервые зарегистрированы спектры КРС органических соединений (белков, липидов и т.д.), а также определены наиболее выгодные области для измерения с малым вкладом фотолуминесценции. Обнаружены вклад кристаллического карбоната кальция, составляющего ротовой аппарат, и пики резонансного рассеяния каротиноидов в области кутикулы. Также в пищевode тихоходок был зарегистрирован вклад кристаллического гуанина. В экспериментах с использованием лазера на 780 нм выживаемость тихоходок составила около 70%, в то время как использование 532 нм оказалось губительным для животных.

Разработанный подход к изучению внутреннего состава тихоходок с помощью спектроскопии КРС может дать более глубокое понимание процессов, лежащих в основе криптобиоза.

[1] Bonifacio A., Guidetti R., Altiero T., Sergo V., Rebecchi L., *PLoS One*, 7, №11, e50162, (2012).

[2] Guidetti R., Bonifacio A., Altiero T., Bertolani R., Rebecchi L., *Integrative and comparative biology*, 55, №2, 241-252, (2015).

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ
БИОЛОГИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ СИСТЕМ**

Лактионова А.В., Зыкова В.А., Суровцев Н.В.

ИАиЭ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

laktionova_ann2001@mail.ru

Работа посвящена исследованию влияния воды на упругие и релаксационные свойства двухкомпонентных систем, в которых одна компонента – вода, вторая – биологически значимая молекула (коллаген, глюкоза, глицерин) методами оптической спектроскопии.

Ключевые слова: спектроскопия, двухкомпонентные системы, упругие свойства.

Оптическая спектроскопия благодаря своей бесконтактности и неинвазивности представляет собой мощный инструмент для исследования различных биологических объектов. В частности, она позволяет охарактеризовать упругие свойства материала, изменения которых могут быть связаны с нарушениями в функционировании живых клеток. Применение методов оптической спектроскопии к тканям и клеткам сопряжено с рядом трудностей, обусловленных значительным вкладом воды и многокомпонентностью изучаемых систем. Вода играет ключевую роль в функционировании клеток и тканей, однако высокий уровень её содержания создаёт трудности при анализе спектров рассеяния света.

Для решения проблемы интерпретации спектральных данных в случае биологических систем применяются более простые с точки зрения компонентного состава модельные системы, состоящие из двух компонент, одной из которых является вода. Указанные объекты позволяют детально изучить влияние воды на упругие свойства конкретных веществ, обеспечивая возможность выявления специфических эффектов для каждого компонента отдельно.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния воды на упругий модуль модельных биологических систем путем анализа их свойств методами оптической спектроскопии. Основная задача состоит в анализе упругих характеристик и релаксационных свойств объектов при варьировании содержания воды в двухкомпонентных составах. В рамках настоящей работы были рассмотрены различные двухкомпонентные смеси биологически значимых веществ, включающие гидрогели на основе коллагена, водные растворы глицерина и глюкозы. Данные соединения представляют интерес благодаря своей роли в физиологии организма, помимо этого указанные вещества находятся в различном агрегатном состоянии в условиях отсутствия растворителя. Например, сухой коллаген находится в стеклоподобном состоянии, а при повышении содержания воды формирует гидрогель – трехмерную полимерную сетку, наполненную водой. Глюкоза образует кристаллическую структуру, растворимую водой, а глицерин представляет собой вязкую жидкость.

В работе для исследования влияния содержания воды на свойства перечисленных выше объектов были использованы методы оптической спектроскопии, включая спектроскопию комбинационного рассеяния света (КРС), рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (РМБ) и деполяризованное рассеяние света. Каждый из этих методов позволяет получать информацию о структуре и динамике молекул, входящих в состав исследуемого объекта. Спектры КРС содержат информацию о колебательных подуровнях системы, что отражает качественный состав исследуемого объекта. Детальное рассмотрение спектральной области, включающей в себя линии, соответствующие колебаниям –СН и –ОН групп, позволило охарактеризовать содержание воды в рассматриваемых модельных смесях. Спектроскопия РМБ позволяет получить информацию о продольном гигагерцовом модуле упругости материала, а деполяризованное рассеяние света позволяет исследовать релаксационные свойства объекта. Благодаря комплексному применению методов оптической спектроскопии было детально рассмотрено влияние воды на упругие и релаксационные свойства изучаемых модельных систем. Более того, реализация синхронного измерения спектров КРС и РМБ от одной точки образца с применением волоконного канала связи, позволила получить уникальные концентрационные зависимости рассматриваемых величин.

В ходе данной работы было выявлено, что уменьшение содержания воды приводит к значительному увеличению значения упругого модуля для всех рассматриваемых систем. Также концентрационная зависимость ширины бриллюэновской линии демонстрирует немонотонное поведение, заключающееся в наличии максимума при содержании воды 30%. Проведение комплексного исследования данных систем с использованием спектроскопических методов позволило выявить несколько причин, приводящих к данному явлению. Причиной уширения бриллюэновских линий является как возрастающая неоднородность в составе модельных систем при уменьшении содержания воды, так и влияние релаксационного спектра на спектр РМБ [1]. Однако для разных систем наблюдается разный характер изменения релаксационного спектра при варьировании водной компоненты, что свидетельствует о различных механизмах взаимодействия указанных соединений с водой.

[1] Bailey M., Alunni-Cardinali M., Correa N., Caponi S., Holsgrove T., Barr H., Stone N., Winlove C.P., Fioretto D., Palombo F., *Science advances*, **6**, №44, eabc1937, (2020).

BIOMIMETIC HYDROXYAPATITE-SILVER NANOCOMPOSITES FOR CONTROLLED ANTIBIOTIC DELIVERY VIA PHOTOTHERMAL STIMULATION

Olumakinde O.C.

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

oomiiale@itmo.ru

This research is devoted to the development of a biomimetic system based on hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, HA), modified with silver nanoparticles and infrared-sensitive polyelectrolytes to prolong drug release.

Keywords: silver nanoparticles, hydroxyapatite, photothermal stimulation.

The multifunctionality of HA in terms of biocompatibility and osteoconductivity is well known, which makes it a great biocoating option for drug delivery systems, especially in applications related to bone implants, solid tissue restoration, and replacement. It can produce Liesegang rings (LRs) inside an agar matrix under controlled and slow conditions. Gradient and patterned biomaterials like HA are necessary for life because they can precisely modulate the development, differentiation, and behavior of cells by replicating the innate complexity of biological tissues. By adding silver nanoparticles (Ag NPs) to HA matrices, we hope to combine these qualities including silver's well-established antibacterial capabilities. We also hope to investigate their potential involvement in infrared (IR)-triggered drugs release. Because of its capacity to attach to bone tissue, the broad-spectrum antibiotic tetracycline was selected as a model drug and is therefore a perfect fit for bone-targeted drug delivery systems [1].

The use of infrared radiation stands out as a very promising method among the current drug release techniques. Utilizing infrared light as a source of energy for drug release provides a non-invasive way to regulate the rate of release, enhancing therapeutic effectiveness and minimizing side effects. However, IR cannot activate unmodified or pure HA to induce drug release; instead, surface functionalization or a trigger is required for significant results. We have chosen to incorporate Ag NPs inside the HA rings in order to address this (Figure). Depending on their sizes (40-100 nm in diameter), Ag NPs are known to absorb infrared light within a wavelength of 808-960 nm and transform it into thermal energy. This can result in localized heating, a structural leak, or an increase in the matrix's permeability, which ultimately causes the packed drugs to leak out. We used the photothermal characteristics of Ag NPs incorporated within HA matrix systems in our work to provide on-demand medication release following infrared irradiation [2].

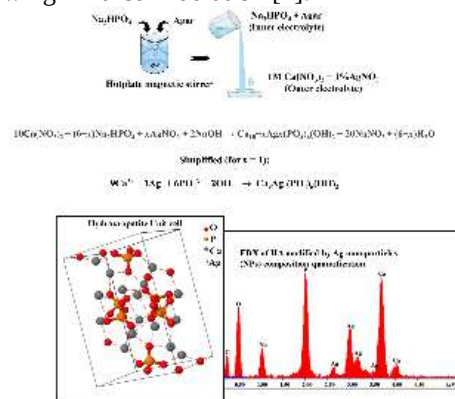


Figure. Scheme of research. The diffusion of 1M CaCl_2 (control), or 1M $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ or a mixture of 1% AgNO_3 and $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ was used as an outer electrolyte into inner solution containing agar and 0.2M Na_2HPO_4

We then coated the rings with thermosensitive polymers, heparin, and poly (diallyldimethylammonium chloride) (PDADMAC), to regulate the drug release mechanism. Ag NPs are believed to be heated by infrared light, and this energy is then transferred to polymers, which have been reported to change how they conform, allowing for a stimuli-responsive release process that can be precisely adjusted to satisfy specific therapeutic requirements and provide drug release [3].

We chose to use limited diffusion aggregation to incorporate silver into the rings as it ensures precise control over the size and distribution of Ag NPs to achieve consistent photothermal and antibacterial characteristics, enables homogeneous incorporation of silver into the HA structure, enhancing the mechanical and functional properties of the composite material. Finally, because this approach is scalable and consistent, it can generate silver-modified HA on a huge scale for use in medical research [1].

The study reveals that Infrared exposure enabled more controlled antibiotic release due to silver nanoparticle peaks in the composition.

[1] Eltantawy M.M., Belokon M.A., Skorb E.V., Ulasevich S.A., *Adv NanoBiomed Res*, **1**, (2021).

[2] Ma H., Shi J., Zhu X., *Adv Compos Hybrid Ma*, **2**, 242-253, (2019).

[3] Nikolaev K.G., Ulasevich S.A., Skorb E.V., *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2**(2), 105-112, (2020).

**МНОГОУГЛОВОЕ СТАТИЧЕСКОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА
В РАСТВОРАХ, СОДЕРЖАЩИХ ИНСУЛИН**

Гибизова В.В.¹, Ибрагимова Ф.В.²

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²МГУ имени М.В. Ломоносова, филиал г. Баку, Азербайджан

gibizova@physics.msu.ru

В работе приведены угловые зависимости интенсивности рассеянного света для растворов инсулина. Экспериментальные данные позволяют определить массу, размеры и форму рассеивающих частиц, что используется для разработки и создания новых лекарственных препаратов.

Ключевые слова: метод статического рассеяния света, индикатриса рассеяния, инсулин.

В современном мире, согласно данным Всемирной организации здравоохранения [1], участились случаи заболевания диабетом. Число взрослых, живущих с диабетом, выросло примерно в 4 раза за последние 25 лет. В тяжелых случаях для лечения диабета требуется инъекционное введение инсулина. Помимо своей роли в регуляции углеводного обмена, инсулин и инсулиноподобные факторы роста (IGF) играют важную роль в патогенезе различных заболеваний, включая эндометриоз [2]. Патогенез эндометриоза остается недостаточно изученным, однако известно, что ростовые факторы, включая инсулин и IGF-1, играют важную роль в развитии этого заболевания. За последние десятилетия были сделаны значительные открытия, касающиеся роли инсулина в работе центральной нервной системы. Установлено, что инсулин и его рецепторы присутствуют в структурах головного мозга, где он принимает участие в активации нейрональных стволовых клеток, росте и развитии нейрональной сети, синаптической передаче и формировании когнитивных функций [3]. Нарушения метаболизма и передачи сигнала инсулина связывают с развитием нейродегенеративных заболеваний, в частности болезни Альцгеймера. Существует всё больше данных, подтверждающих наличие общих патофизиологических механизмов между сахарным диабетом 2 типа и болезнью Альцгеймера.

Данная работа посвящена изучению формы и молекулярной массы рассеивающих частиц в водных растворах инсулина с помощью метода многоугольного статического рассеяния света. Были проведены измерения для двух длин волн полупроводникового лазера – 450 нм и 647 нм, что позволило провести детальный анализ свойств рассеивающих частиц. Мощность лазеров составляла 25 мВт. Все эксперименты были проведены на многоугольном анализаторе размеров частиц Photocor Complex. Температура исследуемых образцов поддерживалась с помощью встроенного в прибор термостатируемого кюветного отделения и составляла ~ 25°C.

В качестве объекта исследования был выбран медицинский препарат, являющийся растворимым инсулином. Данный препарат относится к группе препаратов короткого действия. В нём 1 МЕ соответствует 35 мкг безводного человеческого инсулина. Длительность его действия в организме 8 часов. Выводится в основном почками.

В работе были построены индикатрисы рассеяния света, которые определяют угловое распределение рассеянного света. При построении индикатрисы рассеяния для длины волны падающего излучения 647 нм при концентрации препарата 8 мкМЕ/мл были зафиксированы дополнительные максимумы, что может указывать на формирование агрегатов. Обработанные методом Дебая данные позволили получить значение массы рассеивающих частиц, которая составила (31250 ± 7692) г/моль для длины лазера 647 нм, что близко к литературным значениям [4], а для длины волны лазера 450 нм было получено значение массы рассеивающих частиц 8000 г/моль, что соответствует массе мономера белка.

Получено, что второй вириальный коэффициент, учитывающий межмолекулярные взаимодействия имеет в растворах положительное значение, что говорит о преобладании отталкивающих сил взаимодействия между частицами, которые в свою очередь препятствуют агрегации рассеивающих частиц. Можно сделать вывод, что метод многоугольного рассеяния света применим для исследований лекарственных препаратов.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 121102500073-0.

[1] Всемирная организация здравоохранения [Электронный ресурс]: Четырехкратное увеличение числа случаев заболевания диабетом во всем мире за последние десятилетия требует неотложных мер. URL: <https://www.who.int/ru/news/item/13-11-2024-urgent-action-needed-as-global-diabetes-cases-increase-four-fold-over-past-decades> (дата обращения: 19.06.2025).

[2] Флорова М.С., Ярмолинская М.И., Ткаченко Н.Н., Толибова Г.Х., Траль Т.Г., *Журнал акушерства и женских болезней*, **70**, №3, 65-74, (2021).

[3] Булгакова С.В., Романчук П.И., Тренева Е.В., *Бюллетень науки и практики*, **6**, №3, 96-126, (2020).

[4] Chang X., Jorgensen A.M., Bardrum P., Led J.J., *Biochemistry*, **36**, №31, 9409-9422, (1997).

ДИАГНОСТИКА ХРОНИЧЕСКОЙ СЕРДЕЧНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СЫВОРОТКИ КРОВИ

Пименова И.А., Матвеева И.А.

Самарский университет, г. Самара, Россия

pimenova.0312@list.ru

Диагностика сердечно-сосудистых заболеваний зачастую связана с необходимостью использования сложных и дорогостоящих методов, что ограничивает ее широкое применение, особенно в рамках регулярных медицинских осмотров. В связи с этим актуальным направлением является разработка новых методов диагностики, в частности, на основе рамановской спектроскопии [1].

Ключевые слова: хроническая сердечная недостаточность, рамановская спектроскопия, интеллектуальный анализ данных.

Рамановская спектроскопия позволяет получать спектральную информацию о молекулярном составе сложных биологических образцов, включая сыворотку крови, что делает ее мощным инструментом для выявления биохимических изменений, связанных с сердечно-сосудистыми заболеваниями.

Основной целью исследования является разработка эффективного подхода, который сочетает преимущества рамановской спектроскопии с интеллектуальными методами обработки данных для создания автоматизированной системы диагностики ХСН.

В исследовании использовались *in vitro* спектры сыворотки крови, полученные с применением технологии поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии (SERS), подробно описанной в [2]. Всего проанализировано 229 образцов, из которых 180 принадлежали пациентам с подтвержденной ХСН, а 49 – контрольной группе. Для выделения информативных признаков из спектральных данных сыворотки крови используется метод разрешения многомерных кривых (MCR-ALS), который позволяет снизить размерность данных, сохраняя ключевые компоненты спектров и предотвращая потерю информации.

В рамках данного исследования используются следующие алгоритмы машинного обучения: логистическая регрессия, метод опорных векторов (SVM), случайный лес и градиентный бустинг. Это позволит провести классификацию контрольной группы и пациентов с ХСН. В данном подходе концентрации каждого отдельного компонента, выделенные в исследуемых образцах, служат в качестве признаков для последующей классификации.

Для повышения качества итоговой модели был применен метод стекинга, при котором базовые модели формировали мета-признаки, которые затем подавались на вход финальной модели — логистической регрессии. Такой подход позволяет учитывать особенности каждого алгоритма. Помимо профилей концентраций, в качестве дополнительных признаков для классификации использовались клинические данные пациентов: систолическое и диастолическое артериальное давление, конечный систолический размер, общий билирубин, гематокрит.

Перспективным направлением данного исследования является разработка программного обеспечения для автоматической диагностики ХСН (рисунок). Данное приложение представляет собой оконную программу, в которую загружается спектр исследуемого образца и клинические данные пациента. На основе обработанных данных система выдает предполагаемый диагноз: наличие или отсутствие ХСН.

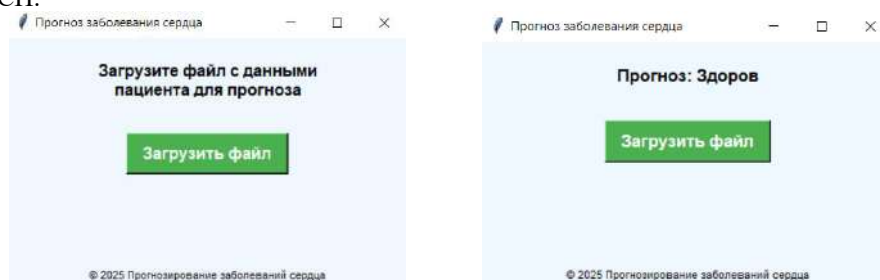


Рисунок. Интерфейс разработанного приложения

Рамановская спектроскопия становится привлекательным инструментом для использования в клинической практике. Данный подход открывает широкие возможности для дальнейшего развития — от расширения спектра анализируемых биологических состояний до создания портативных приборов и мобильных диагностических платформ. Предлагаемая методика может быть адаптирована под другие биологические жидкости, состояния и заболевания, в том числе онкологического, аутоиммунного и метаболического профиля.

[1] Atkins C.G., Buckley K., Blades M.W., Turner R.F., *Applied spectroscopy*, **71**, №5, 767-793, (2017).

[2] Al-Sammarraie S.Z., Bratchenko L.A., Typikova E.N., Zakharov V.P., Bratchenko I.A., Lebedev P.A., *Biomedical Photonics & Engineering*, **8**, №1, 010301, (2022).

**ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА КАК МОДУЛЯТОР
ВИЗУАЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ ЕДЫ**

Черкашина А.А., Коржнева Т.Г., Туранов С.Б., Толкачева К.П.

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

shanshina229@mail.ru

В рамках исследования изучалось влияние параметров световой среды, в частности цветовой температуры (в диапазоне 2700-6000K), на восприятие продуктов питания. Актуальность работы обусловлена значимостью освещения как фактора, способного модулировать поведение человека – от выбора блюда до количества и продолжительности его приема.

Ключевые слова: цветовая температура, оценка освещения, визуальное восприятие.

Современные социально-экономические и медицинские вызовы требуют поиска решений, направленных на формирование здорового образа жизни и профилактику заболеваний, связанных с неправильным питанием.

Психология потребления показывает, что до 70% решений о покупке или употреблении пищи принимаются автоматически, под влиянием внешних факторов, таких как оформление пространства, звуковое сопровождение и параметры освещения [1].

В последние годы всё большее внимание уделяется изучению световой среды как потенциального модулятора поведения человека [2]. Исследования в области биофотоники, изучающей взаимодействие света с биологическими системами, демонстрируют, что оптические параметры могут влиять не только на диагностику и терапию, но и на психофизиологическое состояние, эмоциональное восприятие и когнитивные процессы [3]. Цветовая температура, являясь ключевой характеристикой освещения, способна воздействовать на циркадные ритмы, уровень бодрствования, настроение и аппетит [4].

Разработка и экспериментальная проверка гипотезы о модулирующем влиянии параметров световой среды на согласованность и интенсивность оценок привлекательности различных продуктов представляет собой актуальную научную задачу, способную внести вклад в развитие мультисенсорного дизайна и прикладной биофотоники.

Для проведения исследования была разработана контролируемая осветительная установка с регулируемой цветовой температурой (от 2700K до 6000K). Сбор данных проводился с участием 82 респондентов, отобранных с учётом стратификации по полу (50/50%) и возрастным группам (18-30, 31-45, 46-55 лет). В ходе эксперимента участникам предлагалось оценить три категории продуктов (свежие фрукты, хлебобулочные изделия и готовые блюда) при различных режимах освещения (2700K, 3000K, 4000K, 5000K, 6000K), но при постоянной освещённости (400лк), чтобы исключить влияние других переменных. Фиксация реакций проводилась через онлайн-опрос с использованием 5-балльной шкалы Лайкерта, где участники указывали визуальную привлекательность продуктов, а также указывали желаемое время пребывания за едой. Собранные данные анализировались с применением описательной и аналитической статистики, включая расчёт средних значений, стандартных отклонений, доверительных интервалов и коэффициентов вариации, что позволило выявить статистически значимые различия в восприятии пищи при разных параметрах освещения.

Результаты эксперимента показали, что цветовая температура оказывает значительное влияние на восприятие пищи и может быть использована как инструмент коррекции пищевого поведения: тёплый свет (2700-3000 K) способствует более положительному восприятию продуктов, повышает их визуальную привлекательность, увеличивая время пребывания за едой, тогда как холодный свет (5000-6000 K) снижает оценки привлекательности, особенно у сложных блюд, усиливает разброс мнений среди потребителей и ассоциируется с более быстрым завершением приёма пищи.

Установленные эффекты могут быть применены на практике для формирования здоровых пищевых привычек. Данные позволяют расширить понимание механизмов неинвазивного воздействия света на восприятие и поведение, а также может быть использовано для разработки мультисенсорных световых сценариев, где цветовая температура будет рассматриваться как адаптируемый элемент дизайна гастрономического пространства.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-28-20162, <https://rscf.ru/project/25-28-20162/>.

[1] Spence C., Puccinelli, N.M., Grewal D., Roggeveen A.L., *Psychol. Market*, **31**(7), 472-488, (2014).

[2] Wansink B., *Annual Review of Nutrition*, **24**, 455-479, (2004).

[3] Katsuura T., Jin X., Baba, Y., Shimomura Y., Iwanaga K., *J. Physiol. Anthropol.*, **24**(4), 321-325, (2005).

[4] Bscheiden A., Dörsam A.F., Cvetko K., *Food Quality and Preference*, **79**, (2020).

ИЗГОТОВЛЕНИЕ КРЕМНИЙ-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ ДЛЯ БИОФОТОНИКИ

Нестеров В.Ю., Шулейко Д.В., Заботнов С.В., Преснов Д.Е.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

nesterovvy@my.msu.ru

В работе показана возможность синтеза кремниевых наночастиц, поверхность которых декорирована включениями серебра или золота, методом лазерной абляции в жидкости.

Ключевые слова: кремниевые наночастицы, лазерная абляция, декорирование.

Кремниевые наночастицы (КНЧ), покрытые (декорированные) включениями золота или серебра, способны проявлять свойства как диэлектрических, так и металлических наночастиц [1, 2]. Такие наноконпозиты перспективны для диагностических и терапевтических применений в биофотонике [3] благодаря относительно высокой биосовместимости и низкой токсичности.

В настоящей работе для получения декорированных серебром или золотом КНЧ (ДКНЧ Si/Ag и Si/Au) был использован метод импульсной лазерной абляции (ИЛА) мишеней кристаллического и пористого кремния в водно-этанольном растворе. Для формирования ДКНЧ Si/Ag в раствор добавлялся прекурсор серебра – нитрат серебра AgNO_3 , а в случае изготовления ДКНЧ Si/Au раствор содержал прекурсор золота – золотохлористоводородистая кислота HAuCl_4 . Облучение производилось лазером Nd:YAG EKSPILA PL 2143A (1064 нм, 34 пс, 10 Гц, 5-10 мДж) в течение 30-60 минут. В ходе экспериментов варьировались соотношение воды и этанола в растворе и исходные молярные концентрации AgNO_3 и HAuCl_4 . Метод ИЛА является относительно простой одностадийной и эффективной технологией, которая позволяет получать стабильные и химически чистые наноконпозиты с требуемой морфологией в количествах, достаточных для дальнейшего использования в биомедицинских приложениях.

По данным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии изготовленные взвеси ДКНЧ Si/Ag содержали Si и Ag, а взвеси ДКНЧ Si/Au – Si и Au. Результаты растровой электронной микроскопии показали, что морфология ДКНЧ соответствует наноконпозиту типа «ядро-спутник» (рисунок), гладкая сферическая КНЧ декорируется изолированными друг от друга включениями Ag (рисунок а) или Au (рисунок б) произвольной формы и размерами в диапазоне от 5 до 30 нм. Для ДКНЧ Si/Ag средний размер кремниевого ядра составил около 120 нм, а для ДКНЧ Si/Au около 150 нм. Процесс декорирования не влияет на размер и гладкость, механически не деформирует форму КНЧ, что должно способствовать безопасному внедрению таких наноконпозитов в биоткани.

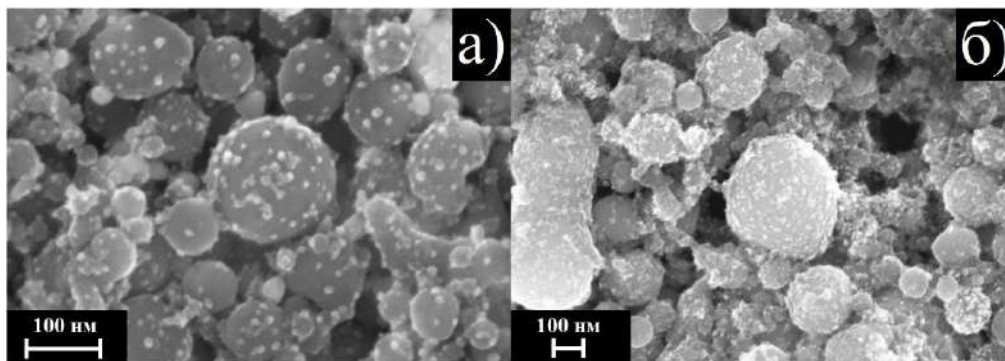


Рисунок. Изображения растровой электронной микроскопии ДКНЧ а) Si/Ag и б) Si/Au

Детальный анализ изображений растровой электронной микроскопии ДКНЧ выявил морфологические особенности наноконпозитов, зависящие от соотношения воды и этанола в растворе и исходных молярных концентраций AgNO_3 и HAuCl_4 . Для ДКНЧ Si/Ag дополнительные измерения значений дзета-потенциалов показали, что pH-фактор буферной жидкости (вода, уксусная кислота, аммиак), в которую помещались наночастицы после изготовления, оказывает непосредственное влияние на декорирующее покрытие и стабильность наноконпозитов [4].

Таким образом, ДКНЧ Si/Ag и Si/Au, формируемые методом ИЛА в жидкости, представляются перспективными для дальнейшего использования в биофотонике, например, в качестве агентов в задачах фотогипертермии.

Авторы выражают благодарность Смирнову Н.А. и Кузьмину Е.В. за измерение спектров энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-20016.

- [1] Gurbatov S.O., Puzikov V.A., Modin E.B., et al., *Materials*, **15**, №22, 8091, (2022).
- [2] Gurbatov S.O., Puzikov V.A., Cherepakhin A.B., et al., *Opt. Laser Tech.*, **147**, 107666, (2022).
- [3] Al-Kattan A., Tselikov G.I., Metwally K., et al., *Nanomaterials*, **11**, №3, 592, (2021).
- [4] Nesterov V.Yu., Zaboltnov S.V., Shuleiko D.V., et al., *Nanobiotech. Rep.*, **19**, 50-58, (2024).

ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ
РАМАНОВСКИХ СПЕКТРОВ КОЖИ

Томникова К.Е., Матвеева И.А.

Самарский университет, г. Самара, Россия
ksetomnikova@yandex.ru

В работе рассматривается разработка приложения для идентификации доброкачественных и злокачественных новообразований на основе классификации рамановских спектров кожи, а также анамнеза пациентов с помощью ансамблевого алгоритма.

Ключевые слова: рамановская спектроскопия, новообразование кожи, приложение.

Рамановская спектроскопия может быть использована для определения заболевания или типа новообразования [1]. Современные рамановские спектрометры не адаптированы для диагностики кожных заболеваний, поэтому актуальным является разработка специального программного обеспечения для классификации рамановских спектров кожи.

К рамановским спектрам был применен MCR-анализ. Применение MCR способствовало уменьшению размерности исходных данных без потери важной информации, повысило устойчивость к шуму и выбросам, а также позволило связать интенсивность спектральных полос с реальными биохимическими характеристиками тканей, что особенно важно для диагностики кожных заболеваний [2, 3].

Далее был разработан ансамблевый алгоритм для классификации доброкачественных и злокачественных новообразований на основе стекинга. В ансамблевую модель включены такие алгоритмы, как случайный лес, градиентный бустинг и многослойный перцептрон, которые комбинируются с использованием логистической регрессии в качестве мета-модели для финального принятия решения. ROC AUC разработанной модели равен 0,81.

Разработанный ансамблевый алгоритм был сохранен и на его основе разработано оконное приложение для идентификации доброкачественных и злокачественных новообразований кожи. Интерфейс приложения представлен на рисунке.

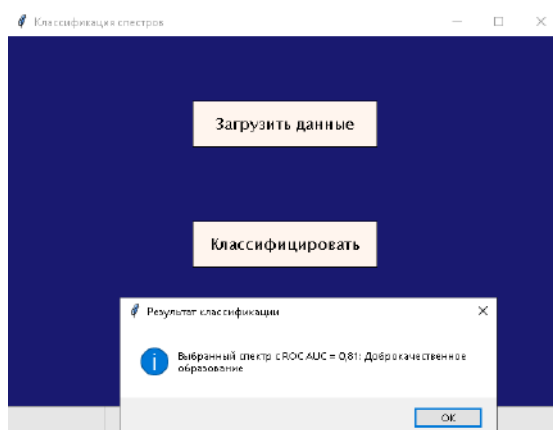


Рисунок. Интерфейс приложения

Все разработки велись на языке программирования Python. В приложение необходимо загрузить файл, содержащий рамановский спектр и анамнез пациента, в формате excel. Далее, нажав на кнопку «Классифицировать», в всплывающем окне появляется результат классификации.

Разработанный ансамблевый алгоритм и оконное приложение может быть внедрено в медицинские учреждения в небольших региональных городах и селах для первичного скрининга населения, поскольку там не хватает высококвалифицированных врачей и технического оснащения.

[1] Наумик А.В., *ЖУР МИКРОБ ЭПИД ИММУНОБИО*, **90**, №4, 100-110, (2013).

[2] Matveeva I.A et al., *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*, **10**, №1, 58-66, (2024).

[3] Tomnikova K., Matveeva I., *2024 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, Moscow, Russian Federation, 1-5, (2024).

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ АПТАМЕРОВ
С ХЕЛАТНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ

Томилин Ф.Н.^{1,2}, Рогова А.В.², Щугорева И.А.², Кичкайло А.С.², Коловская О.С.²

¹Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

²Красноярский научный центр СО РАН, г. Красноярск, Россия

felixnt@gmail.com

Получены атомные структуры комплексов аптамеров с хелаторами. Рассчитаны спектральные характеристики хелаторов. Показана перспективность использования их в биомедицинских приложениях. Представлена возможность фотодинамической терапии тканей диффузной астроцитомы с фотосенсибилизаторами.

Ключевые слова: DFT, аптамер, хелатор.

Глиальные опухоли являются наиболее распространённым и агрессивным типом первичных злокачественных опухолей головного мозга. Эти новообразования очень сложны для диагностики и лечения из-за их гетерогенности, инфильтративной природы и защитного гематоэнцефалического барьера, который препятствует доставке лекарств. Для опухолей головного мозга особенно критично удаление только опухолевых очагов без затрагивания функционально активных зон головного мозга, сосудов и нервов, особенно в случаях прорастания опухолей в них, поэтому адресная терапия для этого заболевания исключительно важна. Аптамеры — короткие одноцепочечные нуклеиновые кислоты, отобранные для высокоаффинного связывания с мишенью — стали перспективными агентами в нейроонкологии, благодаря их высокой специфичности, низкой иммуногенности и способности проникать вглубь ткани по сравнению с обычными антителами. Фотодинамическая терапия (ФДТ) один из современных и перспективных методов терапии различных онкозаболеваний поскольку она обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами лечения, например, отсутствие резистентности при многократном проведении.

Фотосенсибилизаторы (ФС) — природные или синтетические вещества, которые активируются под воздействием света соответствующей длины волны и генерируют активные формы кислорода. Органические фотосенсибилизаторы, такие как хлорофиллины и порфирины, используются чаще всего из-за их способности поглощать свет в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (до 800 нм). Препараты на основе порфириновых производных принято называть фотосенсибилизаторами «первого поколения». Они имеют полосу максимума поглощения в длинноволновой области, чем порфирины ($\lambda_{\text{max}}=630$ нм). Хлорины и производные хлорина еб являются представителями препаратов «второго поколения» фотосенсибилизаторов. Эти ФС имеют полосу максимума поглощения в более длинноволновой области, чем порфирины ($\lambda_{\text{max}}=650 - 670$ нм для хлоринов и $\lambda_{\text{max}}=730 - 800$ нм для бактериохлоринов), и более высокий квантовый выход синглетного кислорода. Также данные агенты можно использовать в качестве хелаторов для металлов — например для гадолиния тем самым можно создавать специфические контрастные агенты для магнитно-резонансной томографии (МРТ), ориентированных на более точную диагностику и визуализацию злокачественных gliom.

В работе применялся широкий инструментарий для теоретического моделирования комплексов, состоящего из аптамера и хелатора а также с ионом металла. Ранее разработанные аптамеры (Gli-55, Gli-233 и Gli-35) показали высокую специфичность и аффинность к глиальным опухолям в исследованиях на животных, они взяты за основу. С помощью программы для сворачивания ДНК-молекул (mFold, Olygoanalyzer) определена вторичная структура аптамера. Третичная структура смоделирована и далее рассчитана с помощью метода молекулярной динамики с использованием программного пакета GROMACS с последующим кластерным анализом траекторий. Геометрия структур, полученных после расчётов молекулярной динамики, оптимизирована с использованием квантово-механического метода DFTB3 (Density Functional Tight Binding) в сочетании с методом молекулярных орбиталей фрагментов FMO [1] (Fragment molecular orbital method). Для учёта влияния растворителя при моделировании будет использована модель поляризуемого континуума PCM (polarizable continuum model). Квантовохимические расчёты выполнены с помощью программного пакета GAMESS.

Получены атомные структуры комплексов аптамеров с хелаторами. Рассчитаны спектральные характеристики хелаторов. Показана перспективность использования их в биомедицинских приложениях. Представлена возможность фотодинамической терапии тканей диффузной астроцитомы с фотосенсибилизаторами. В результате возможных экспериментов *in vivo* можно ожидать что объём опухоли будет уменьшаться. Получены фундаментальные данные о пространственной структуре молекулярных комплексов аптамеров с хелаторами и гадолинием, что является подходящей основой для разработки контрастирующих агентов для приложений МРТ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ № 25-72-20052.

[1] Fedorov D.G., Kitaura K., *The Journal of Chemical Physics*, **120**, №15, 6832-6840, (2004).

**ОПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ТЕТРАПИРРОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ДЛЯ ТАКСОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МИКРООРГАНИЗМОВ**

Багрянская У.Ю., Якимов Б.П., Рубекина А.А., Ширшин Е.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

bagrianskaya@my.msu.ru

Диагностика бактериальных инфекций является ключевой задачей современной клинической микробиологии. В настоящей работе предложен метод анализа микроорганизмов по спектрам эндогенной флуоресценции порфиринов, выделенных из комплексных спектров бактерий, возбуждаемых на длине волны 405 нм. Исследована специфичность спектральных характеристик порфиринов для различных видов бактерий и продемонстрировано, что накопление порфиринов определяется преимущественно видовой принадлежностью.

Ключевые слова: тетрапиррольные соединения, эндогенная флуоресценция, комбинационное рассеяние.

Бактериальные инфекции представляют собой большой вызов для медицины и общественного здравоохранения, обуславливая высокие показатели заболеваемости и смертности [1]. Быстрая и точная диагностика бактериальных инфекций является приоритетной задачей современной микробиологии и клинической диагностики. Оптические методы, основанные на регистрации и анализе спектральных характеристик эндогенных молекулярных маркеров микроорганизмов, представляют перспективный инструмент для их анализа [2-4].

В рамках настоящей работы рассматривается вопрос о возможности анализа микроорганизмов с использованием флуоресцентной спектроскопии по спектрам эмиссии эндогенных флуорофоров бактерий, при этом акцент делается на исследовании свойств флуоресцентного отклика порфиринов, присутствующих в микроорганизмах. Порфирины – тетрапиррольные соединения, спектр флуоресценции которых лежит в области 550-750 нм [5]. В биологических системах они играют ключевую роль в процессах дыхания и окислительно-восстановительных реакций, участвуя в синтезе гема и других металлопорфиринов. В микроорганизмах порфирины могут быть как промежуточными метаболитами биосинтетического пути гема, так и конечными продуктами, накапливающимися в клетке в результате особенностей метаболизма.

Эндогенная флуоресценция микроорганизмов, обусловленная накоплением порфиринов и их производных (протопорфирина IX, копропорфирина и др.), потенциально обладает высокой специфичностью, и может быть использована в таксономическом анализе микроорганизмов. В данной работе продемонстрированы особенности накопления различных производных порфиринов в бактериях и оценена возможность диагностики и определения вида и рода бактерий на основе эндогенной флуоресценции тетрапиррольных соединений и спектров резонансного комбинационного рассеяния.

[1] Ikuta, Kevin S et al., *The Lancet*, **400**, №10369, 2221-2248, (2022).

[2] Sundaramoorthy A., Bharanidharan G., Prakasarao A., Ganesan S., *Journal of Biophotonics*, **17**, №7, (2024).

[3] Du R., Yang D., Yin X., *Sensors*, **22**, №3, 1168, (2022).

[4] Ho CS., Jean N., Hogan C.A. et al., *Nat Commun*, **10**, 4927, (2019).

[5] Ricchelli F., *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **29**, №2-3, (1995).

**ОПИСАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ
МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ
НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА**

**Золоторенко Д.А., Адищев С.В., Лактионова А.В.,
Добрынина Е.А., Суровцев Н.В.**

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия
d.skazhutina@g.nsu.ru

Данная работа посвящена описанию упругих свойств различных биологических тканей в условиях непрерывно изменяющейся гидратации образцов с помощью синхронного измерения спектров неупругого рассеяния света (РМБ и КРС).

Ключевые слова: неупругое рассеяние света, гидратация, модуль упругости.

Исследование упругих свойств биологических объектов открывает новые возможности в диагностике и изучении патологических изменений различных заболеваний [1, 2]. Существует большое число методик, позволяющих определять упругие свойства [3], среди которых широко известны атомно-силовая микроскопия, оптический пинцет, оптическая когерентная эластография, механические тесты и спектроскопия рассеяния Мандельштама - Бриллюэна (РМБ). Спектроскопия РМБ позволяет бесконтактно измерять продольный модуль упругости, что дает информацию о локальной жесткости биологических образцов. Атомно-силовая микроскопия, определяющая модуль Юнга на низких частотах с помощью индентирования, требует механического контакта с тканью. Оптический пинцет позволяет оценивать сдвиговый модуль упругости посредством отслеживания движения частиц-маркеров. Оптическая когерентная эластография дает информацию о модуле Юнга с помощью деформации материала под действием силы возбуждения (например, с помощью воздушного потока) и последующем использовании оптической когерентной томографии для измерения пространственно-разрешенной волны деформации. Механические тесты, направленные на прямое измерение модуля Юнга путем растяжения (сжатия), требуют контакта с образцом и неизбежно приводят к его повреждению, а также не подходят для изучения различных динамических процессов (например, изменения гидратации в образце). В отличие от этих методов, спектроскопия РМБ связана с акустическими колебаниями на гигагерцовых частотах, является полностью неинвазивной и неразрушающей, а также обладает высоким пространственным разрешением, благодаря чему часто используется для описания упругих свойств биологических объектов.

Получаемый из эксперимента по РМБ, модуль упругости определяется положением позиции (частотой максимума) бриллюэновской линии, которая изменяется в зависимости от различных условий, в том числе, от уровня гидратации исследуемого образца [4]. В качестве методики, позволяющей неинвазивно определять уровень гидратации может выступить спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) [5]. Таким образом, объединение методик в виде синхронного измерения спектров РМБ и КРС является многообещающей комбинацией для непрерывного локального исследования образцов.

Данная работа посвящена описанию упругих свойств различных биологических тканей в условиях непрерывно изменяющейся гидратации с помощью синхронного измерения спектров неупругого рассеяния света (РМБ и КРС).

Полученные результаты могут быть использованы для более глубокого понимания свойств биологических тканей с целью моделирования и описания их структурных особенностей.

- [1] Massey A., Stewart J., Smith C. et al., *Nat. Rev. Phys.*, **6**, №4, 269-282, (2024).
- [2] Zhang H., Asroui L., Tarib I. et al., *Am. J. Ophthalmol.*, **254**, 128-140, (2023).
- [3] Handler C., Testi C., Scarcelli G., *Curr. Opin. Cell Biol.*, **88**, 102341, (2024).
- [4] Shao P., Seiler T.G., Eltony A.M. et al., *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, **59**, №7, 3020-3027, (2018).
- [5] Bauer N.J., Hendrikse F., March W.F., *Cornea*, **18**, №4, 483-488, (1999).

**АНТИМИКОТИЧЕСКОЕ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ
ИЗЛУЧЕНИЯ СИНЕГО (405-450 НМ) СПЕКТРА
НА ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ TRICHOPHYTON RUBRUM**

**Молчанова К.А.¹, Нестерова Т.Б.², Нечаева О.В.^{3,4},
Тучина Е.С.¹, Тучин В.В.¹, Шнайдер Д.А.^{2,5}**

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

²Государственное учреждение здравоохранения «Саратовский областной клинический
кожно-венерологический диспансер», г. Саратов, Россия

³ФГБУ «НМИЦ АГП им. В.И. Кулакова» Минздрава России, Москва, Россия

⁴ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования»
Минздрава России, Москва, Россия

⁵Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского, г. Саратов, Россия
ksenia13052005@gmail.com

В работе изучено фотодинамическое действие фиолетового (405 нм) и синего (450 нм) на жизнеспособность *Trichophyton rubrum* – возбудителя онихомикоза человека. Показано снижение жизнеспособности на 90% после воздействия фиолетовым (405 нм) излучением в течение 15 мин.

Ключевые слова: онихомикозы, дерматофиты, *Trichophyton rubrum*, синее излучение, 405 нм, 450 нм, фотодинамическое воздействие.

Высокая распространенность и заразность онихомикозов ставит перед медицинским сообществом задачу поиска новых подходов к антимикотической терапии. Затруднения при лечении данных заболеваний возникают и из-за анатомо-физиологических особенностей ногтя и из-за развития у части штаммов дерматофитов устойчивости к противогрибковым препаратам [1]. Альтернативой стандартной антимикотической терапии может стать противогрибковое фотодинамическое воздействие (ФДВ), заключающееся в генерации повреждающих клетки активных радикалов и синглетного кислорода под действием света определенной длины волны на эндогенный или экзогенный фотосенсибилизатор [2]. Наличие в клетках грибов родов *Trichophyton*, *Microsporum*, *Epidermophyton* пигментов, поглощающих свет в фиолетовой и синей области спектра, делает их потенциальными мишенями для фотодинамического воздействия с участием эндогенных фотосенсибилизаторов [3].

Целью данной работы стало изучение чувствительности возбудителя онихомикоза человека *Trichophyton rubrum* к фотодинамическому действию фиолетового (405 нм) и синего (450 нм) излучения.

Объектом исследования служила культура *T. rubrum* (коллекция бактериологической лаборатории ГУЗ «СОККВД»). Грибы выращивали при температуре 28 °С на среде Сабуро. Воздействие осуществляли на фрагменты мицелия, помещенные на поверхность плотной питательной среды. Жизнеспособность культуры оценивали как соотношение диаметра экспериментальных образцов к контрольным, выражали в процентах. Во всех экспериментах использовали непрерывный режим облучения. Плотность мощности фиолетового (405 нм) источника излучения составляла 180 мВт/см², сообщаемые дозы излучения 54 Дж/см² (экспозиция 5 мин), 107 Дж/см² (экспозиция 10 мин) 160 Дж/см² и (экспозиция 15 мин). Плотность мощности синего (450 нм) источника излучения составляла 160 мВт/см², сообщаемые дозы излучения 43 Дж/см² (экспозиция 5 мин), 85 Дж/см² (экспозиция 10 мин) и 128 Дж/см² (экспозиция 15 мин). Все опыты проводились в пятикратной повторности.

Установлено, что воздействие фиолетового (405 нм) излучения на *T. rubrum* в течение 5 мин вызывает снижение жизнеспособности на 10%, после 10 мин – на 18%, после 15 мин – на 90%. Отмечено уменьшение коричнево-красной пигментации мицелия у культур, подвергнутых воздействию дозы излучения 160 Дж/см². Воздействие с использованием синего (450 нм) излучения на *T. rubrum* обеспечивало менее выраженный угнетающий эффект. ФДВ в течение 5 мин приводило к снижению жизнеспособности на 5%, после 10 мин – на 13%, после 15 мин – на 47%. В этом случае также отмечено уменьшение пигментации мицелия.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности *T. rubrum* к действию фиолетового (405 нм) излучения, что может рассматриваться в качестве перспективного направления для дальнейшего исследования альтернативной терапии онихомикозов с использованием ФДВ.

[1] Leung A., Lam J., Leong K., Hon K., Barankin B., Leung A., Wong A., *Recent Patents on Inflammation & Allergy Drug Discovery*, **13**, 32-45, (2020).

[2] Wang X., Peng J., Meng C., Feng F., *Chem. Sci.*, **15**, P. 12234-12257, (2024).

[3] Wu X., Hu Y., *Dove Medical Press*, **15**, 3251-3266, (2022).

**ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЖИ
ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ В ХОДЕ АНТИМИКРОБНОГО
ФОТОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ *EX VIVO* И *IN VIVO***

**Шарабарина Т.В., Сурков Ю.И., Серебрякова И.А.,
Генин В.Д., Тучина Е.С., Тучин В.В.**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия
tanuha290902@gmail.com

В работе были получены сведения об изменении оптических свойств кожи лабораторных крыс при антимикробной фотодинамической терапии с использованием оптического просветления.

Ключевые слова: оптическое просветление биотканей, фотодинамическая терапия, синее излучение, 428 нм.

Одним из подходов к повышению эффективности антимикробного фотодинамического воздействия (АФДВ) в ходе лечения гнойно-септических заболеваний является изменение оптических характеристик тканей, расположенных вокруг инфицированного участка, улучшение распределения света внутри очага воспаления, с помощью комплекса веществ, называемых оптическими просветляющими агентами (ОПА) [1]. Целью данного исследования была сравнительная оценка изменения оптических характеристик кожи лабораторных крыс до и после нанесения ОПА в ходе АФДВ.

В качестве источника излучения использовали светодиод с максимумом спектра испускания на длине волны $\lambda=428,5$ нм и плотностью мощности $7,7$ мВт/см². Источник располагали над поверхностью кожи на расстоянии 5 см. Во всех экспериментах режим излучения был непрерывным. Время облучения составляло 15 мин. В качестве фотосенсибилизатора использовали водный раствор порфирина Zn-TBBut3PyP в концентрации 0,03 мкг/мл. В качестве оптически-просветляющего агента использовали смесь глицерина, ДМСО и воды в объемных долях 70%: 5%: 25%, соответственно. Спектры диффузного отражения в диапазоне 400-2100 нм с поверхности кожи регистрировали при помощи спектрометров USB4000-Vis-NIR и NIRQuest (Ocean Optics, США).

Исследования на животных проводились в соответствии с Международными рекомендациями по проведению биомедицинских исследований с использованием животных (CIOMS, 1985 г.) и были одобрены местным этическим комитетом Саратовского государственного медицинского университета (протокол №2 от 16.09.2022). Эффективность АФДВ оценивали по изменению численности бактерий после воздействия относительно контроля. Эксперименты *ex vivo* проводили с использованием предварительно полученных кожных лоскутов от здоровых белых лабораторных крыс как описано ранее [2]. Эксперименты *in vivo* проводили на животных с предварительно сформированным подкожно гнойным абсцессом по оригинальной методике [3].

После обработки образцов с помощью ОПА зафиксировано существенное уменьшение коэффициента рассеяния кожи. Важно отметить, что формирование спектра транспортного коэффициента рассеяния зависит как от действительной, так и от мнимой составляющей комплексного показателя преломления рассеивающих элементов биологической ткани. В результате в спектральных диапазонах с интенсивным поглощением (например, в области 400–450 нм, где активно поглощает гемоглобин) наблюдается увеличение транспортного коэффициента рассеяния. Глубина проникновения света в обработанные ОПА образцы оказалась существенно больше по сравнению с контрольными образцами. Анализ данных при длине волны поглощения используемого фотосенсибилизатора (432 нм) показывает впечатляющие результаты: 15-минутная обработка образцов кожи ОПА приводит к увеличению глубины проникновения света на 80-120% по сравнению с необработанными образцами. Результаты эксперимента также демонстрируют увеличение общего светопропускания на 55-61% после обработки кожи ОПА. Изменение распределения световой энергии после процедуры просветления убедительно подтверждает эффективность данного метода в улучшении проникновения света в глубокие слои биологической ткани.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №25-24-00370 от 28.12.2024 г.

[1] Tuchin V.V., Zhu D., Genina E.A., *Handbook of Tissue Optical Clearing*, 628 p., (2022).

[2] Тучина Е.С., Сурков Ю.И., Серебрякова И.А., Шарабарина Т.В., Генин В.Д., Мусаелян А.Г., Долотов Л.Е., Тучин В.В., *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*, **25**(1), 76-88, (2025).

[3] Алипов В.В., Тучина Е.С., Мусаелян А.Г., Ефимова Е.С., Грицай У.О., Гаджиева Э.Э., Гасымов З.И., *Forcipe*, **6**, 6-8, (2023).

**СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО
ФИОЛЕТОВОГО (405 НМ) И СИНЕГО (428 НМ) ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ АНТИМИКРОБНОМ ФОТОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ *IN VIVO***
**Аванесян А.А.¹, Шарабарина Т.В.¹, Грицай У.О.², Мусаелян А.Г.², Напшева А.М.²,
Тучина Е.С.¹, Алипов В.В.², Тучин В.В.¹**

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

²Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского, г. Саратов, Россия
lina.avanesyan@list.ru

В исследовании проведено сравнение эффективности антимикробного фотодинамического воздействия с использованием фиолетового (405 нм) и синего (428 нм) излучения в сочетании с цинк-содержащим пиридилпорфирином в ходе лечения моделированного гнойного абсцесса у лабораторных крыс.

Ключевые слова: антимикробное фотодинамическое воздействие, гнойный абсцесс, фиолетовое излучение, синее излучение, 405 нм, 428 нм.

Синтетические и природные порфириновые соединения в сочетании с излучением фиолетово-синей области спектра демонстрируют значительный потенциал в лечении гнойно-воспалительных заболеваний, особенно в случаях устойчивости микроорганизмов к традиционным антибиотикам [1]. В данном исследовании была поставлена цель сравнить эффективность АФДВ с использованием фиолетового (ФИ, 405 нм) и синего (СИ, 428 нм) излучения в сочетании с цинк-содержащим пиридилпорфирином в ходе лечения моделированного гнойного абсцесса (МГА) у лабораторных крыс.

Исследования проводились на 32 крысах-самцах породы «стандарт» массой 200±50 г с абсцессами, моделированными по описанному ранее методу [2]. Животных делили на 4 группы: 1) контроль без обработки и облучения, 2) обработка полости МГА фотосенсибилизатором (ФС), 3) обработка МГА излучением, 4) обработка МГА ФС и облучением. Облучение области МГА животным 3-й и 4-й проводили по 15 мин в течение 10 дней, начиная с пятых суток после формирования МГА. В 1-й, 5-й, 10-й и 15-й день эксперимента осуществляли забор 0,1 мл содержимого полости МГА для посева на ГРМ-агар и определения численности микроорганизмов. В 1-й и 15-й день эксперимента проводился забор крови у экспериментальных животных для общего и биохимического анализа. По завершении эксперимента образцы ткани в области МГА иссекали для гистологического анализа. В качестве ФС использовали водный раствор цинк-содержащего мезозамещенного пиридилпорфирина $Zn-TBut_3PyP$ в концентрации 0,1 мкг/мл и максимумом спектра поглощения 432 нм. Для в качестве источников излучения использовали: 1) светодиод с максимумом спектра испускания 405 нм, 2) светодиод с максимумом спектра испускания 428 нм.

Анализ бактериальной обсемененности полости МГА при комбинированном АФДВ с помощью ФС и ФИ показал следующую динамику. К 15 дню эксперимента у животных 1 и 2 групп количество микробных клеток в области МГА снижается на 46-48% по сравнению с 1 днем эксперимента. При этом очевидны различия в обсемененности области МГА у крыс, подвергавшихся ФДВ. Для 3 группы показатели уменьшаются на 95%, а у 4 группы наблюдается полное уничтожение микроорганизмов в полости МГА.

При использовании комбинации ФС+СИ в момент завершения лечения наблюдается наиболее заметное снижение численности микроорганизмов у всех групп животных. За весь период лечения у 1 группы животных снижение микроорганизмов происходит на 56%, у 2 группах количество микробных клеток снижается на 76%. Для 3 группы показатели уменьшаются на 35%, а у 4 группы наблюдается отсутствие микроорганизмов в полости МГА. При сравнении эффективности двух источников излучения небольшие различия заметны только к 10 дню эксперимента. Синее (428 нм) излучение обеспечивает селективность взаимодействия с молекулами фотосенсибилизатора, однако фиолетовое (405 нм) излучение, по всей видимости, позволяет дополнительно активировать эндогенные порфирины в клетках микроорганизмов.

Исследование показателей крови, включая лейкоцитарную формулу, СОЭ и уровень С-реактивного белка, продемонстрировало выраженный противовоспалительный эффект АФДВ. При анализе гистологических образцов показано, что у животных 3-й группы к десятому дню эксперимента наблюдалось существенное уменьшение объема МГА, у животных 4-й группы зафиксировано полное исчезновение полости абсцесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №25-24-00370 от 28.12.2024 г.

[1] Wang Y., Zhu W., Shu M., Jiang Y., Gallo R.L., Liu Y.T., Huang C.M., *PLoS One*, 7, 1-7, (2012).

[2] Алипов В.В., Урусова А.И., Андреев Д.А. и др., Патент РФ №2601378, опубл. 10.11.2016.

**НАНОКОНТЕЙНЕРЫ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ-ЗОЛОТА
ДЛЯ ТЕРАНОСТИКИ ОНКОЗАБОЛЕВАНИЙ**

Васильева М.И.¹, Назаровская Д.А.¹, Тюрин-Кузьмин П.А.^{1,2}, Осминкина Л.А.^{1,2}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт биологического приборостроения РАН, г. Пущино, Россия

vasileva.mi21@physics.msu.ru

Синтезированы наночастицы пористый кремний-золото. Показано усиление сигнала комбинационного рассеяния света лекарств, загруженных в поры наночастиц за счет эффекта локализованного плазмонного резонанса. Полученные системы можно использовать для тераностики онкозаболеваний.

Ключевые слова: наночастицы пористого кремния, комбинационное рассеяние света, тераностика.

Тераностика - инновационный и активно развивающийся подход, объединяющий диагностику и лечение онкологических заболеваний. Нанокмозиты на основе пористого кремния являются перспективным материалом, поскольку сочетают в себе биосовместимость и уникальные физико-химические и оптические свойства. Кремниевые наночастицы нетоксичны, биodeградируют до содержащейся в организме человека кремниевой кислоты и обладают большой удельной площадью поверхности. Морфологические особенности - пористая структура и возможность функционализации поверхности - позволяют использовать частицы в качестве наноконтейнеров для адресной доставки лекарств [1].

В данной работе синтезирован новый композитный материал - пористые кремниевые наночастицы, модифицированные наночастицами золота (Au-пКНЧ). Были изучены физико-химические характеристики Au-пКНЧ с помощью ИК-спектроскопии, метода комбинационного рассеяния света (КРС), метода динамического рассеяния света, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, а также цитотоксичность. Размер полученных наночастиц составил около 200 нм, дзета-потенциал поверхности - 35 мВ. Метод дифракции электронов подтвердил кристаллическую структуру пКНЧ, а из полученных спектров КРС рассчитан размер нанокристаллов кремния – около 2,3 нм.

Метод КРС также применялся для исследования поведения наноконтейнеров с загруженным в поры лекарств как *in vitro*, так и при инкубации с раковыми клетками. Модификация поверхности пКНЧ наночастицами золота позволила значительно усилить сигнал КРС от лекарства благодаря явлению гигантского комбинационного рассеяния (ГКР), обусловленного локализованным поверхностным плазмонным резонансом (ЛППР) на наноструктурированных металлических поверхностях [2]. Пик плазмонного резонанса находится в области ~520 нм. Получено усиление сигнала комбинационного рассеяния от молекул сунитиниба и доксорубина в 15 раз, что позволило получить карты распределения наночастиц с лекарством в клетках. Также отработана методика загрузки данных лекарств в поры композитных наночастиц и релиза в модельном эксперименте; эффективность загрузки составила ~60% для сунитиниба и 75% для доксорубина.

Анализ цитотоксичности Au-пКНЧ, загруженных доксорубином, показал, что их накопление в цитоплазме клеток MDA-MB-231 вызывает апоптоз, что подтверждается морфологическими изменениями клеток и характерным спектральным профилем КР.

Полученные результаты показывают потенциал применения композитных наночастиц Au-пКНЧ в качестве наноконтейнеров для тераностики онкологических заболеваний [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 24-15-00137.

[1] Maximchik P.V., et al., *ACS Biomater Sci Eng*, 5, №11, 6063-6071, (2019).

[2] Kartashova A.D., et al., *ACS Biomater Sci Eng*, 8, №10, 4175-4184, (2022).

[3] Shatskaia M.G., Nazarovskaia D.A., Gonchar K.A., Lomovskaya Ya.V., Tsiniiaikin I.I., Shalygina O.A., Kudryavtsev A.A., Osminkina L.A., *Condensed Matter and Interphases*, 26, №1, 161-167, (2024).

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛА ФОТОПЛЕТИЗМОГРАММЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДАВЛЕНИЯ ТОНОМЕТРОМ С МАНЖЕТОЙ

Рогаткин Д.А., Тарасов А.П.

ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского, Москва, Россия

rogatkin@medphyslab.com

Моделируется кровенаполнение пальца руки и сигнал фотоплетизмограммы при пережатии плечевой артерии манжетой тонометра с учётом тонуса сосудов. Обоснована и изучена задержка сигнала фотоплетизмограммы от момента фиксации систолического давления.

Ключевые слова: артериальное давление, фотоплетизмограмма, моделирование.

Известен ряд проблем при измерении артериального давления (АД) автоматическими тонометрами, реализующими осциллометрический метод с плечевой манжетой [1, 2]. В частности, известна проблема больших погрешностей измерений у пациентов с сосудистыми дисфункциями при сахарном диабете, атеросклерозе и т.д., что говорит о влиянии состояния сосудов на точность измерений [1]. Также известны недорогие оптические *in vivo* методы оценки состояния сосудов [3, 4]. Задача данного исследования - разработка технологии повышения точности измерений АД за счет одновременной с АД оценки тонуса и реактивности сосудов и коррекции показаний тонометра на индивидуальные свойства сосудов.

Решалась численно система дифференциальных уравнений линейного движения крови по сосудам с податливыми стенками [5]. Скорость $v(t)$ пульсовой волны (ПВ) бралась из волнового уравнения как:

$$v(t) = \sqrt{\frac{A(t)}{\rho} \cdot \frac{\partial P_t(t)}{\partial A(t)}}, \quad (1)$$

где: $A(t)$ – площадь просвета сосуда, $P_t(t)$ – трансмуральное давление, ρ – плотность крови, t – время.

Тонус сосудов моделировался введением в модель дополнительного внешнего давления гладких мышц на внешнюю стенку артерий. Ослабление тонуса при стравливании давления в манжете тонометра оценивали по методике [3]. Моделировались сфигмограмма (пульсации давления) в манжете, динамика объемного кровенаполнения в коже пальца руки и сигнал фотоплетизмограммы (ФПГ) при стравливании давления. На рисунке представлен пример полученных зависимостей. Видна задержка Δt времени появления сигнала ПВ на графике кровенаполнения и, соответственно, ПВ в сигнале ФПГ по сравнению с моментом достижения в манжете уровня систолического АД (уровня САД) с возобновлением тока крови. Реактивная гиперемия выражалась в снижении тонуса артерий и увеличении кровенаполнения кожи пальца руки с соответствующим снижением постоянного уровня сигнала ФПГ и увеличением пульсаций сигнала от ПВ.

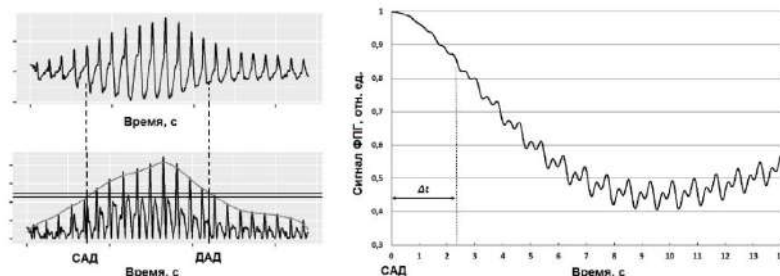


Рисунок. Сфигмограмма и огибающая ПВ в манжете тонометра (слева) с указанием времени достижения уровня САД в манжете и нормированный сигнал ФПГ (справа) с момента достижения уровня САД

Пилотные исследования в клинике выполнены с участием 36 волонтеров разного пола и возраста с разными индексами массы тела, показателями АД и состоянием сосудов с использованием комплексной оптической технологии и прототипа прибора «Вазотест» [3]. Сигнал ФПГ регистрировался выносными оптическими датчиками на указательных пальцах рук. Показания автоматического тонометра прибора «Вазотест» верифицировались стандартно с помощью аускультативного метода двумя экспертами [2].

Результаты сравнения теории и эксперимента показали хорошее соответствие. При малых (< 5 мм рт ст) расхождениях в оценке САД типовые значения времени задержки Δt ПВ в сигнале ФПГ находились в районе $2,3 \pm 0,7$ с [$M \pm SКО$]. При ошибочных показаниях САД > 5 мм рт ст, это время могло как возрастать в 1,5 и более раз, так и уходить в отрицательные значения, сигнализируя об ошибочно заниженном САД.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-25-00222 (<https://rscf.ru/project/24-25-00222/>).

[1] Посохов И.Н., Мороз-Водолажская Н.Н., *Кардиоваск. терапия и проф.*, **23**(9), 131-142, (2024).

[2] Grim S.E., Grim S.M., *J. of the American Society of Hypertension*, **10**(3), 191-193, (2016).

[3] Рогаткин Д.А., Ивлиева А.Л., Штыфлюк М.Е., *Медицинская физика*, №3, 65-82, (2024).

[4] Allen J., *Physiological measurement*, **28**, №3, R1-R39, (2007).

[5] Волобуев А.Н., *УФН*, **165**, №2, 177-186, (1995).

ИИ В ФОТОНИКЕ

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ АНАЛИЗЕ ВИДЕОДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИНАХ

Яковлев А.В.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия
s240178@stud.spmi.ru

В работе рассмотрены особенности применения сверточных нейронных сетей для анализа видеоданных, полученных глубинными телевизионными системами в нефтяных скважинах. Использование нейросетей позволяет оперативно определять повреждения, помогая в принятии решений о ремонте.

Ключевые слова: обработка изображений, нейронные сети, нефтегазовая отрасль.

В современном мире добыча углеводородов занимает важную часть экономики нашей страны. Многие отрасли зависят от цен на энергоносители, а также от сырья, которое добывается из-под земли. При этом важно помнить, что скважины и оборудование, которое расположено в них, требуют регулярного обслуживания, а иногда экстренного ремонта. Для этого применяют глубинные телевизионные системы.

Телевизионные системы позволяют получить изображение из скважины с глубины до нескольких тысяч метров. Благодаря этому операторы могут принять своевременные решения о ремонте или устранении аварии [1]. Чтобы помочь оператору в анализе видеозаписи, которая может длиться до нескольких часов, предлагается использовать нейронные сети. Они позволят выделять поврежденные объекты, улучшат позиционирование системы, благодаря определению точного положения в скважине.

Предлагается использовать сверточную нейронную сеть (CNN), способную определять и классифицировать элементы скважины и скважинного оборудования. Для обучения нейронной сети предлагается использовать предварительно натренированную версию VGG-19. Она считается классической для такого рода задач. Также будет осуществлена тонкая настройка верхних слоёв нейронной сети, после которой можно начать обучение на специально подготовленной базе данных. К сожалению, собрать обширный датасет для обучения нейронной сети с нуля будет сложно из-за небольшого количества информации в свободном доступе.

Для эффективной работы CNN требуется использовать достаточно яркие и чёткие изображения. Однако, часто видеокдры в скважинах получаются затемненными или смазанными, это связано со спецификой съёмки. Предлагается использовать методы гистограммной обработки изображений для повышения яркости и чёткости видеокдров [2]. Как видно на рисунке, после обработки изображение стало светлее и проявились ранее незаметные детали. Например, в верхней части видеокдра стало больше деталей. Для объективной оценки яркости и чёткости изображения предлагается вычислить средний уровень яркости и Tenengrad. Средний уровень яркости увеличился с 29.76 до 85.37 (на 187%), а Tenengrad с 111.62 до 150.42 (на 35%).

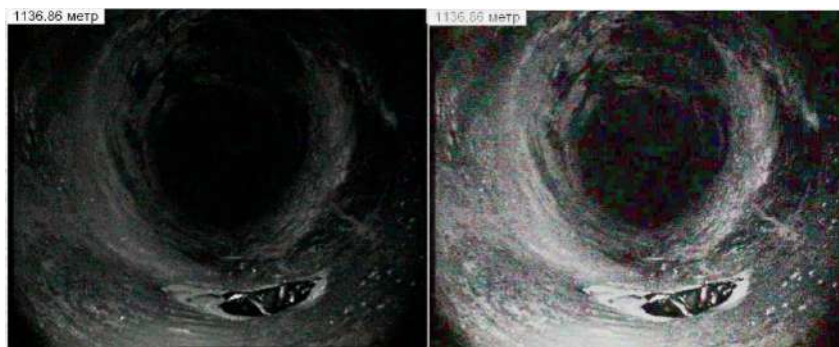


Рисунок. Изображение перфорационного отверстия в газовой скважине. Слева оригинальное изображение, справа обработанное методами гистограммной коррекции

Предобработку видеоданных необходимо использовать как на этапе обучения нейросети, так и на этапе распознавания и идентификации. Применение CNN позволит сократить затрачиваемые время и ресурсы компании, а также поможет увеличить безопасность объектов добычи. Предлагается обучать нейронную сеть методом переноса обучения, чтобы при помощи ограниченного набора данных создать эффективную модель. Затронут вопрос предварительной обработки видеопотока, чтобы увеличить точность и скорость работы нейронной сети. В дальнейшем планируется изучить вопрос повышения быстродействия, чтобы интегрировать модель в работу оператора глубинной телевизионной системы.

[1] Черников А.Д., *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*, **243**, №3, 36-44, (2025).

[2] Зайцева Е.В., Кочнева А.А., Катунцов Е.В., Киба М.Р., *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*, **65**, №1, 62-67, (2024).

НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОБРАБОТКА КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНВАРИАНТНЫХ ФИЛЬТРОВ С ФОРМИРУЮЩИМИ ФУНКЦИЯМИ И МИНИМИЗАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ

Павленко Д.В., Стариков Р.С.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

daryapdv@gmail.com

В работе представлены результаты численных экспериментов по нейросетевому распознаванию изображений по взаимнокорреляционным сигналам, получаемым с применением метода синтеза инвариантных фильтров с минимизацией средней энергии корреляции с формирующими функциями.

Ключевые слова: распознавание изображений, свёрточная нейронная сеть, инвариантный корреляционный фильтр.

В настоящее время подход, состоящий в комбинировании высокого быстродействия оптико-цифровых систем и гибкости нейросетевой обработки информации представляется весьма перспективным и активно исследуется. При решении задач распознавания изображений применение сигналов коррелятора изображений позволяет снизить размерность и упростить форму входных данных для последующей классификации с помощью нейросети [1, 2]. В настоящей работе представлены результаты моделирования распознавания изображений по корреляционным сигналам, полученным с применением инвариантных фильтров. В качестве модельной выбрана задача бинарной классификации полутонковых изображений объектов интереса размером 256×256 пикс в условиях пространственного поворота. В работе применена оригинальная модификация корреляционного фильтра на основе минимизации средней энергии корреляции с формирующими функциями. Такой фильтр синтезируется аналогично известным фильтрам со сглаживающим гауссианом [3] и позволяет получать взаимнокорреляционные функции заданной формы, поясняющие примеры приведены на рисунке. В работе использовались формирующие функции двух размеров: 32×32 и 64×64 пикс.

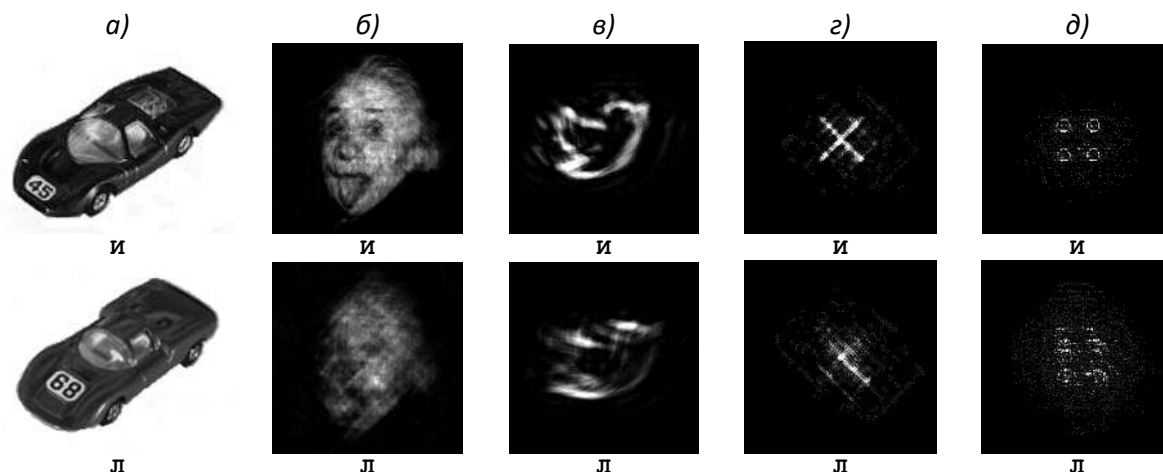


Рисунок. Слева направо столбцами: а) примеры истинного и ложного изображений, б) примеры вида взаимнокорреляционных функций при использовании в качестве формирующей функции полутонкового изображения размерности 256×256 пикс, в) то же при использовании в качестве формирующей функции бинарного изображения размерности 256×256 пикс, г) и д) то же для использованных при моделировании формирующих функций размерности 64×64 пикс; везде «И» для истинного, «Л» для ложного

Моделирование продемонстрировало, что качество распознавания изображений размерности 256×256 пикс свёрточной нейронной сетью, обученной по корреляционным сигналам заданной формы малой размерности может достигать 99%. При этом при смене объекта интереса сеть не требует повторного обучения на новых данных, поскольку входными сигналами являются не сами изображения, а полученные взаимнокорреляционные отклики, которые не меняют своей формы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного фонда (РНФ), грант № 23-12-00336.

[1] Стариков Р.С., *Оптический журнал*, **92**, №3, 5-31, (2025).

[2] Goncharov D., Starikov R., *arXiv:2004.09430*, (2020).

[3] Casasent D., Ravichandran G., Bollaapragada S., *Appl. Opt.*, **30**, 5176, (1991).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Романовский Я.О.^{1,2,3}, Рожко М.В.², Митрофанов А.В.^{1,2,3}

¹Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Российский квантовый центр, Сколково, Москва, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

romanovskii.io17@physics.msu.ru

Для характеристики фемтосекундных лазерных импульсов используются методы машинного обучения, основанные на изменениях спектра при фазовой самомодуляции. Продemonстрировано применение на экспериментальных данных нейросетевой модели, обученной на результатах численного моделирования.

Ключевые слова: фемтосекундные лазерные импульсы, машинное обучение в нелинейной оптике.

Создание фемтосекундных импульсов требует как существенную ширину спектра, так и минимизацию фазовой задержки между спектральными компонентами. Спектральная фаза импульса определяет его временную огибающую, меняя её форму, и, таким образом, влияя на длительность и пиковую интенсивность – одни из ключевых экспериментальных параметров.

При прохождении достаточно интенсивного сверхкороткого импульса через нелинейную среду возникает эффект Керра и фазовая самомодуляция (ФСМ), в результате форма спектра импульса меняется. Характер изменения формы спектра после ФСМ связан с исходным временным профилем импульса. Эту информацию можно использовать для восстановления фазы исходного импульса при помощи нейросетевой модели [1].

В этой работе рассматривается применение машинного обучения для восстановления спектральной фазы и длительности импульсов реальной лабораторной лазерной системы [2], основанного на ФСМ импульсов ближнего ИК-диапазона в пластине оптического стекла (КУ-1). Для обучения полносвязной нейросетевой модели [3] был создан датасет с результатами численного моделирования распространения фемтосекундных импульсов с начальными параметрами, близкими к диапазону реальной лазерной системы в лаборатории (1030 нм, 200 фс, 1 мДж). Входными данными нейросетевой модели являются спектры исследуемого лазерного импульса до и после нелинейного взаимодействия, выходные данные – исходная спектральная фаза импульса. При обучении в качестве функции потерь использовалась среднеквадратичная ошибка, в качестве целевой метрики анализа точности – процентная ошибка между предсказанным максимальным значением временной огибающей и её целевым значением из датасета (целевое значение однозначно определяется исходным спектром и фазой импульса). На рисунке (а) показано распределение такой ошибки для импульсов тестовой части датасета: средняя ошибка 3.2% со стандартным отклонением 4.9%. На экспериментальных данных (рисунок (б)) модель восстановила импульс длительностью 217 фс. для независимой проверки использовался метод FROG [4] – 213 фс (рисунок (в)).

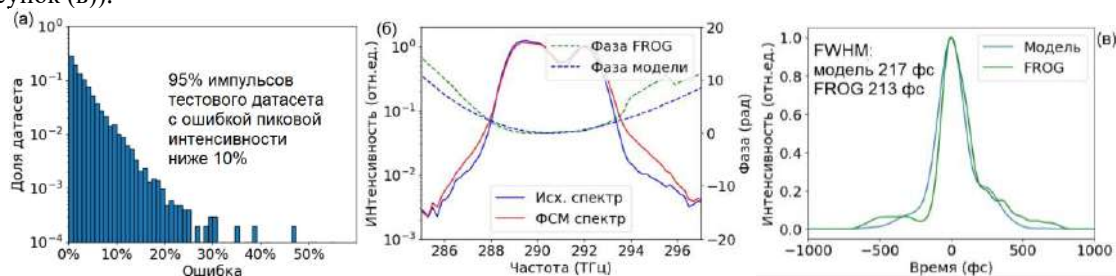


Рисунок. (а) Доли ошибки уровня пиковой интенсивности на тестовом датасете, (б) экспериментальные спектры и фаза, (в) временные огибающие, полученные нейросетевой моделью и методом FROG

Рассмотренная методика позволяет без использования нелинейных кристаллов и итеративных алгоритмов получать информацию о длительности импульса в режиме реального времени всего из двух спектральных измерений.

Я.О. Романовский является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» и Некоммерческого Фонда развития науки и образования "Интеллект". Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ №24-22-00425.

[1] Stanfield M., et al., *Scientific Reports*, **12**, №1, 5299, (2022).

[2] Mitrofanov A.V., et al., *Optics Letters*, **39**, №16, 4659-4662, (2014).

[3] Данные и код [Электронный ресурс]: Характеризация фемтосекундных лазерных импульсов ближнего инфракрасного диапазона методами машинного обучения. URL: https://github.com/YaroslavRomanovskiy/NS271_Romanovskii.git (дата обращения: 20.06.2025).

[4] DeLong K.W., et al., *JOSA B*, **11**, №11, 2206-2215, (1994).

ГИБРИДНЫЕ МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ВОЛНОМЕРА НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРОВ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ

Саечников И.В., Чернявская Э.А., Саечников А.В.

Белорусский Государственный Университет, г. Минск, Беларусь

saetchnikovivan@gmail.com

Предлагается новый компактный и масштабируемый чиповый волномер, основанный на тысячах оптических микрорезонаторов, который объединяет модель мод шепчущей галереи с гибридной моделью машинного обучения для точной идентификации длины волны в спектральном диапазоне 10 нм видимого излучения на уровне 100 фм.

Ключевые слова: кластер оптических микрорезонаторов, машинное обучение, волномер.

Точное измерение длины волны важно для науки и промышленности, например, в спектроскопии и производстве полупроводников [1]. Оптические микрорезонаторы с модами шепчущей галереи (МШГ) обладают высокой добротностью, но ограничены узкой полосой и периодичностью, что ограничивает возможность широкополосной идентификации длин волн. Предложенная модель использует массив микрорезонаторов с наведенным расщеплением мод [2], что позволяет создать компактный и широкополосный реконструирующий волномер с чувствительностью 100 фм. Он использует мультиплексную визуализацию тысяч микрорезонаторов [3, 4] для генерации уникальных шаблонов длин волн путем одновременного зондирования. В рамках гибридных методов машинного обучения интегрированы ансамблевые методы бустинга и сверточные нейронные сети (CNN), доказавшие ранее эффективность при обработке многопараметрических данных [5, 6].

Предложенная модель волномера основана на исходном возбуждении расщепления МШГ в полимерных микросферах для обеспечения уникальных спектральных картин в видимом спектральном диапазоне. Посредством интеграции множества сотен микрорезонаторов на чипе и их последующей мультиплексированной визуализации, обеспечивается собственная чувствительность (~100 фм), сравнимая с интегрирующими сферами, но более компактными и лучшей интегрируемостью. Для проверки эффективности расщепления мод и определения длины волны применялись смоделированные данные спектров с разной деформацией микросфер и, как следствие, расщепления резонансов. Каждый из наборов данных содержал отклики 200 микрорезонаторов в диапазоне 1.2 нм и разрешением 0.3 пм. Было выявлено, что точность растет с увеличением числа микрорезонаторов, а расщепление мод увеличивает точность идентификации длины волны по сравнению с дегенерированными резонансами. В рамках анализа был определен оптимальный уровень расщепления (1.2%) который обеспечивает максимальную точность при минимальном числе резонаторов.

Экспериментальная эффективность подхода исследовалась на примере чипа с 5563 микросферами, где для согласованности с результатами моделирования, диапазон прогнозирования был ограничен 1.2 нм, и включал 2352 циклов измерений. Для оценки точности регрессионной модели сформировали 30 случайных подмножеств микрорезонаторов с количеством от 0 до 100 из всего доступного набора. Интерпретатор длины волны на основе гибридного машинного обучения включал вариационные автоэнкодеры, построенные из 5 сверточных слоев с увеличивающимся числом фильтров и уменьшением размера входа в латентном пространстве в 32 раза для извлечения признаков. Также для задачи регрессии использовалась ансамблевая модель на основе деревьев решений LightGBM с 1000 итерациями бустинга. Результаты показали, что чип с расщепленными спектрами обеспечивает лучшую точность предсказаний по сравнению с чипом без наведенного расщепления вне зависимости от числа микрорезонаторов. При увеличении числа резонаторов с расщепленными спектрами до 100 медианная точность достигает уровня 80 фм с 95% квантилем на уровне 0.4 пм, что лучше модели, обученной на данных с дегенерированными МШГ на порядок. При увеличении числа резонаторов до 200 95% квантиль опускается до 0.2 пм, что ниже уровня спектрального разрешения. Таким образом, кластер оптических микрорезонаторов с управляемым расщеплением мод через деформацию полимерных микросфер реализует новый компактный и точный реконструктивный волномер. В отличие от интегрирующих сфер, он миниатюрен, интегрируем в чип и преодолевает ограничения одиночных резонаторов, обеспечивая сверхширокополосные измерения и открывая новые возможности для высокоточных приложений.

[1] Udem T., Holzwarth R., Hansch T., *Nature*, **416**, 233-237, (2002).

[2] Saetchnikov I., Tcherniavskaia E., Ostendorf A., Saetchnikov A., *arXiv preprint*, URL: <https://arxiv.org/abs/2412.08339> (Accessed: 17.06.2025).

[3] Saetchnikov A.V., Tcherniavskaia E.A., Saetchnikov V.A., Ostendorf A., *Advanced Photonics Research*, **7**, 2100242, (2021).

[4] Saetchnikov A.V., Tcherniavskaia E.A., Saetchnikov V.A., Ostendorf A., *Photonics Research*, **11**, A88, (2023).

[5] Saetchnikov I., Skakun V., Tcherniavskaia E., *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, **4**, №3, 250-256, (2023).

[6] Saetchnikov I., Skakun V., Tcherniavskaia E., *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, **2**, №2, 98-103, (2021).

ИНДУСТРИАЛЬНАЯ ФОТОНИКА

ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОГЛОЩЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ КАЛОРИМЕТРИИ

Ватник С.М.

ООО «ВПГ Лазеруан», г. Фрязино, Россия
sVatnik@vpglaserone.ru

С помощью лазерного калориметра оригинальной конструкции измерены показатели поглощения, поглощение на фронтальной поверхности и проведена оценка рассеяния в объеме образцов высококачественного кварцевого стекла пр-ва Негеус и кристаллов LBO пр-ва ООО «Кристаллы Сибири».

Ключевые слова: лазерная калориметрия, показатель поглощения прозрачных материалов, рассеяние лазерного излучения.

С помощью лазерного калориметра оригинальной конструкции, прототип которого представлен в [1], измерены показатели поглощения, поглощение на фронтальной поверхности и проведена оценка рассеяния в объеме образцов высококачественного кварцевого стекла пр-ва Негеус и кристаллов LBO пр-ва ООО «Кристаллы Сибири». Результаты калориметрических измерений показателей поглощения хорошо совпадают с данными однолучевой интерферометрии (PCI). Для образцов в форме прямоугольных параллелепипедов 3x3x20 мм абсолютная точность и воспроизводимость измерений составляет 0.1 ppm/cm. В качестве примера, на рис. 1 представлена серия из 10 последовательных измерений показателя поглощения α и поглощения фронтальной поверхности $\alpha(F)$ кристалла LBO №0/83.

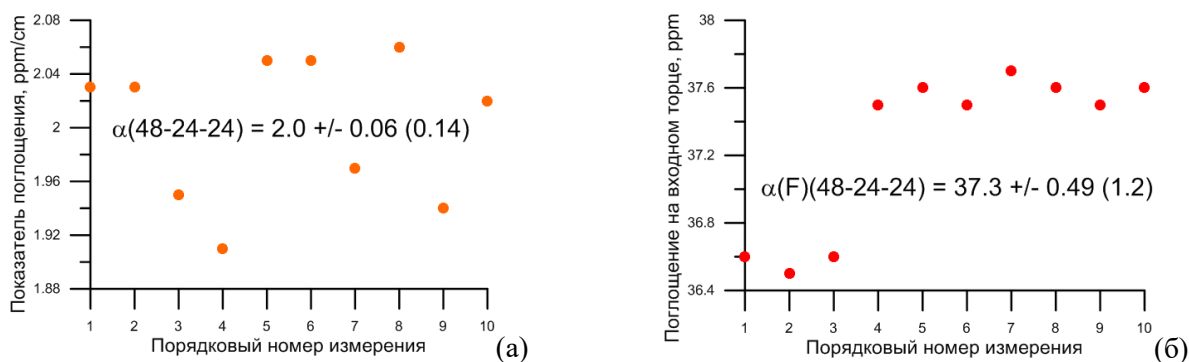


Рис. 1. Показатель поглощения α (а) и поглощение фронтальной поверхности (входной торец) $\alpha(F)$ кристалла LBO №0/83

На рис. 2 изображены экспериментальные зависимости (сплошная синяя и красная линии) и их аппроксимации калибровочными зависимостями, а также среднеквадратичное отклонение (невязка) аппроксимации от результатов измерений.

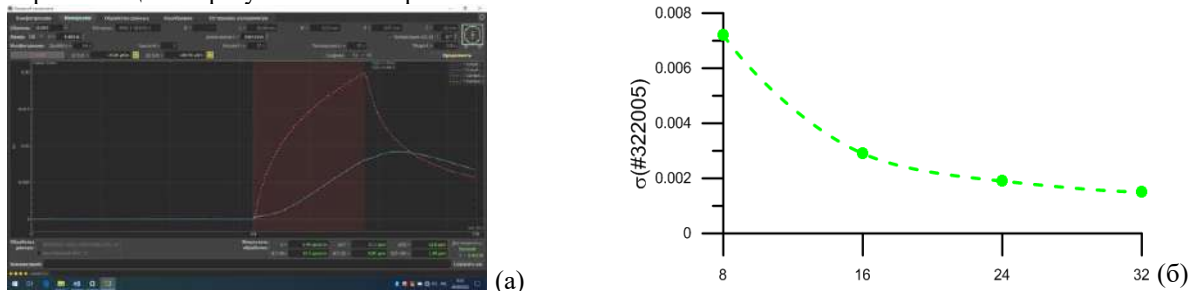


Рис. 2. Графическое представление экспериментальных данных и их аппроксимации (а) и среднеквадратичное отклонение (невязка) аппроксимации от результатов измерений (б) в зависимости от длительности цикла нагрев-охлаждение

Статистический анализ погрешности измерений был проведен по методике ГОСТ 8.736-2011. Воспроизводимость и статистическая погрешность соответствуют уровню ~ 0.1 ppm/cm и практически не зависят от длительности циклов нагрев-охлаждение. Время одного измерения параметров образца – показателя поглощения α , поглощения на входном торце $\alpha(F)$ и рассеяния – составляет около 3-х минут, что позволяет использовать лазерный калориметр для массового контроля оптических элементов. В настоящее время калориметр оптимизирован под размеры образцов 3x3x20 мм. Поскольку воспроизводимость и погрешность измерений определяются величиной перегрева, то они при изменении размеров будут зависеть от сечения образца.

[1] Ватник С.М., Ведин И.А. и др., *Квантовая электроника*, **49**, №4, 363-365, (2019).

АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО АБСОРБЦИОННОГО ЛИДАРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАНА

Верхошенцева С.Л., Ципотан А.С., Непомнящий О.В.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

acipotan@sfu-kras.ru

Предложен аппаратный комплекс на основе дифференциального абсорбционного лидара, позволяющий определять концентрации метана в приземном слое. Результаты моделирования показывают возможность определения концентраций метана до 987 ppm с погрешностью не более 4%.

Ключевые слова: лидар, дистанционное зондирование, концентрация метана.

Метан (CH_4) является вторым по значимости парниковым газом, оказывающим существенное влияние на климат. Его мониторинг представляет важную задачу для экологии и промышленности. Одним из наиболее эффективных методов дистанционного обнаружения метана является лидарное зондирование, основанное на дифференциальном поглощении (DIAL) [1]. Данный метод позволяет измерять концентрации газа на расстоянии, используя лазерное излучение на двух близких длинах волн, одна из которых поглощается метаном, а другая служит опорной.

Ранее проведенные расчеты [2] показали, что в качестве таких волн могут быть выбраны следующие значения $\lambda_1=3,3922$ мкм и $\lambda_2=3,3912$ мкм, λ_1 на порядок сильнее, нежели λ_2 поглощается метаном. В качестве источников излучения в передающем блоке могут выступать He-Ne лазеры серии ГНИК, а именно ГНИК3-3 и ГНИК 3-3А с мощностями 20 мВт и 10 мВт, соответственно. Излучение модулируется в последовательность импульсов с частотой 3400 Гц, что позволяет минимизировать влияние фоновых помех. Приемная часть включает телескоп, спектроанализатор и фоторезистор УФРО2 с высокой удельной обнаружительной способностью ($3 \cdot 10^{10} \text{ см}^2 \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$). Сигнал с фотоприемника усиливается и обрабатывается микропроцессорным блоком, что обеспечивает синхронизацию передающего и приемного трактов.

Основываясь на ранее предложенном математическом аппарате [2] и данных по поглощению метана [3], было проведено моделирование величины принятого сигнала для опорной и поглощаемой длин волн для различных концентраций метана при высоте лета 100 м (Рисунок).

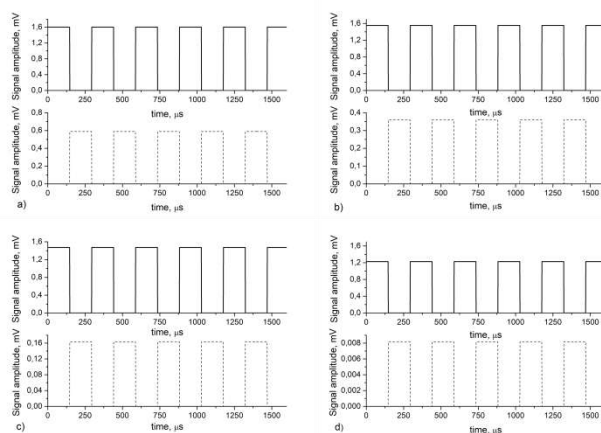


Рисунок. Зависимость амплитуда принятого сигнала для опорной (сплошная линия) и поглощаемой (штриховая линия) длин волн для следующих концентраций метана
а) 197,4 ppm, б) 493 ppm, в) 987 ppm, г) 2467 ppm

Результаты расчетов показывают, что предлагаемый подход позволяет определять концентрации метана, возможности по диагностике будут ограничены только соотношением сигнал-шум приемника. Для высоких концентраций метана ее оценка требует немного другого подхода, поскольку пропускание поглощаемой длины волны стремится к нулю. В этом случае предлагается проводить оценку концентрации по поглощению опорного сигнала.

Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант №23-27-10035) и Красноярского краевого фонда науки.

- [1] Tehrani K., Mohammad M.M., Jaafari M., Mobashery A., *Laser Phys.*, **25**, N3, 1-5, (2015).
- [2] Verkhoshentseva S.L., Tsipotan A.S., Nepomnuashy O.V., Slabko V.V., *J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys.*, **15**, I.4, 482-492, (2022).
- [3] Kopica M., Choi J.W., *Proc. SPIE, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII*, 5234, (2004).

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ
В ФОТОННЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ НА ОСНОВЕ
ТОНКОПЛЕНОЧНОГО НИОБАТА ЛИТИЯ**

Корягин В.А.¹, Шабалин Р.Р.¹, Москалев Д.Н.^{1,2}, Криштон В.В.^{1,2}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия
MoskalevDm@yandex.ru

Цель исследования – рассматривается расчет эффективности торцевого ввода излучения в фотонные интегральные схемы из тонкопленочного ниобата лития Х-среза для различных конфигураций элементов ввода, включая прямой волновод, инвертированный тейпер и рупор. Для каждой конфигурации показана зависимость оптических потерь от положения оптического волокна относительно волновода.

Ключевые слова: эффективность ввода, волновод, тонкопленочный ниобат лития, оптические потери.

В настоящее время активно ведутся разработки фотонных интегральных схем (ФИС), на основе тонкопленочного ниобата лития (ТНЛ) [1]. Основная проблема изготовленных волноводных устройств заключается в том, что распределение профиля моды волновода, отличается от распределения профиля моды в оптическом волокне [2]. Это приводит к оптическим потерям при вводе/выводе оптического излучения и снижению эффективности передачи оптического излучения. Для решения данной проблемы используют переходные элементы (тейперы) на торце ФИС [3].

Настоящая работа посвящена анализу эффективности торцевого ввода излучения в ФИС на основе ТНЛ Х-среза для прямого волновода, инвертированного тейпера и рупора. В ходе расчета эффективности ввода оптического излучения в ФИС на основе тонкопленочного ниобата лития были вычислены значения оптических потерь при вводе оптического излучения в торец ФИС в зависимости от смещения оптического волокна относительно элемента ввода (рисунок).

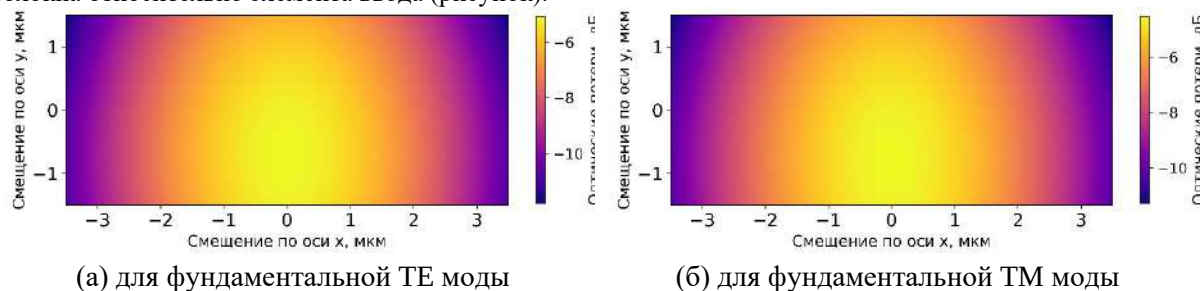


Рисунок. Распределение оптических потерь при вводе оптического излучения из оптического волокна UHNA 1 в рупор из ТНЛ

[1] Овчинников К.А., *Прикладная фотоника*, **11**, №4, 50-58, (2024).

[2] Qiu W., Bernal M.P., Ndao A., et al., *Applied Physics B*, **118**, 261-267, (2015).

[3] Парфенов М.В., Агрозов П.М., Ильичев И.В. и др., *Журнал технической физики*, **92**, вып.1, 113-117, (2022).

**КОМПАКТНАЯ СИСТЕМА ЛАЗЕРНОЙ ЧИСТКИ НА ОСНОВЕ 500ВТ
ПЯТИКАНАЛЬНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА**

Юревич В.И.¹, Цыпкин А.Н.², Цветков А.Р.^{1,2}

¹ООО «Лазерный Центр», Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

tsvetkovan56@gmail.com

Данная работа посвящена разработке, сборке и испытаниям компактной системы лазерной чистки на основе 500Вт пятиканального волоконного лазера.

Ключевые слова: лазерная чистка, волоконный лазер, лазерные технологии.

В ходе проделанной работы была разработана и собрана система лазерной очистки (Рисунок) поверхностей на основе иттербиевого импульсного волоконного пятилучевого лазера с водяным охлаждением YLQ-V2-1-100-100x5 в конфигурации с подвижным крейтом и ручной лазерной головой.

Была разработана конструкция самой головы с размещением необходимых узлов, рассчитана оптическая система установки, спроектирован внешний корпус [1]. Для решения задачи обеспечения долговременной работы установки в условиях производственного помещения предусмотрено охлаждение управляющих элементов и элементов оптической системы с использованием набора радиаторов и потока сжатого воздуха [2]. Также в конструкции предусмотрено легкоъемное защитное стекло.

Первичные испытания системы показали, что она способна проработать не менее 60 мин на мощности в 60% без перегрева (t элементов внутри лазерной головы не превышает 42-44°C) в условиях отсутствия подачи сжатого газа и выключенного сканирования. Дальнейшие испытания покажут возможности системы к долговременной работе в реальных условиях, с включенным сканом, подачей газа и во внешнем корпусе.

Был получен также отпечаток пучков на нержавеющей стали, что дало возможность определить реальные характеристики оптической системы. Регистрация импульсов источника с помощью фотодиода в отраженном излучении дала возможность оценить форму и длительность импульсов.

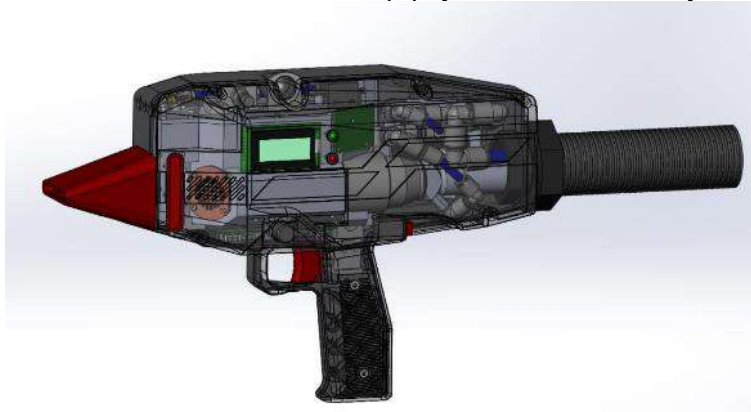


Рисунок. Общий вид головы системы лазерной чистки в САПР SolidWorks

[1] Yiqun J., Weimin Sh., Jianjun Yu, *Proc. Of SPIE*, **6034**, 67-74, (2006).

[2] Zhou Zh., Sun W., et al., *MDPI Processes*, **1445**, 11-28, (2023).

**ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ НА НЕВЕ
(ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ)**

Бутузов В.В., Малахов М.А., Анисимов В.И., Жуков В.В.

АО «НИИ «Экран», г. Самара, Россия
Anisimov_vi@mail.ru

АО «НИИ «Экран» с 2009 года выполняет ОКР по разработке светотехнического оборудования для мобильных аэродромов. Результаты ОКР, могут быть использованы в инновационном проекте «Лазерная система визуальной навигации на Неве».

Ключевые слова: лазерные лучи, визуальные линейные ориентиры, разводные мосты.

Уникальность судоходства по Неве заключается в проводке судов **только в ночное время**. Для повышения точности и безопасности судоходства с 1979 года на разводных мостах Невы была апробирована лазерная система [1], информация о которой «Глиссада ведет суда» опубликована в журнале «Советский Союз» [2]. Лоцманы по виду лазерных лучей определяли положение судна и ориентировали его по оси проводки. На рисунках 1, 2 (фото) показан вид лазерных лучей перед проводкой.

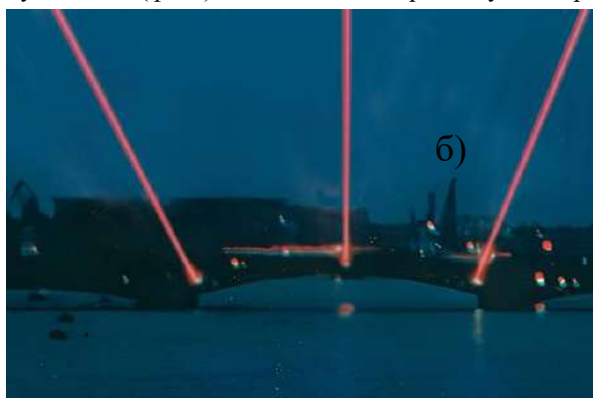


Рис. 1. Вид лазерных лучей перед проводкой



Рис. 2. Вид лазерных лучей из кабины судоводителя

В течение 3-х лет эксплуатации проведено анкетирование лоцманов, была выполнена оценка функциональности системы, проведены расчеты и измерения характеристик лазерного излучения для проводки при разных метеоусловиях и удалениях от мостов, разработан и утвержден санитарный паспорт, доработаны некоторые элементы системы. Был разработан проект ТЗ ОКР по разработке системы проводки через 10 мостов Невского фарватера. Но в практическую реализацию проекта вмешались технические и экономические причины того времени: ненадежность и высокая цена лазеров, их ночное обслуживание, высокая стоимость энергопотребления и т.д. Сохранились отчеты по проекту.

Сейчас, на основе разработанных в России лазеров, можно разработать систему нового поколения – дешевую, надежную, удобную в эксплуатации, с возможностью автоматического или диспетчерского управления, безопасную для судоводителей, которая повысит безопасность проводки судов по Неве.

[1] Бережной И.А. и др., *Авторское свидетельство*, 722020 СССР, (21.11.1979).

[2] Чуба А., *Советский Союз*, **375**, №10, 18-19, (1979).

**ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛИРОВАННОЙ
PUMP-PROBE СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ
И СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ
БИОЛОГИЧЕСКИ ВАЖНЫХ МОЛЕКУЛ**

Белашов М.В.^{1,2}, Сасин М.Э.², Волков Д.А.², Горбунова И.А.², Васютинский О.С.²

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

belashov2406@gmail.com

Представлены результаты работы по оптимизации метода pump-probe спектроскопии для исследования NADH и других важных биологических молекул в водных растворах. Предложены пути модификации установки для минимизации погрешностей эксперимента.

Ключевые слова: фемтосекундная спектроскопия, pump-probe спектроскопия.

Метод pump-probe спектроскопии является перспективным направлением, который, в силу высокого временного разрешения, позволяет изучать сверхбыструю динамику молекулярных систем. Исследование основано на классической схеме pump-probe, в которой возбуждающий импульс накачки (pump) провоцирует переход молекул в возбужденное состояние, а зондирующий (probe) импульс регистрирует изменения, происходящие в системе спустя заданное линией задержки время [1]. Использование фемтосекундных лазерных импульсов наряду с прецизионной линией задержки позволяет достичь высокого временного разрешения порядка 0.5 пикосекунд, а способ регистрации изменений пробного луча позволяет использовать этот метод для анализа даже не флуоресцирующих веществ. Важным ограничением методов pump-probe в традиционном исполнении является необходимость использования высокой мощности импульса накачки для достижения приемлемого уровня сигнал/шум при регистрации изменения зондирующего импульса. В данной работе рассматриваются способы оптимизации экспериментальной установки pump-probe спектроскопии для повышения точности получаемых данных без использования высоких энергий импульса накачки. Использование обновленного подхода позволяет повысить точность и временное разрешение при регистрации молекулярной динамики в коротких временных масштабах, а также избежать возникновения ряда систематических ошибок. Метод позволяет изучать времена релаксации различных веществ, играющих ключевую роль в биологических процессах, что в перспективе может позволить проводить неинвазивный анализ состояния живых организмов.

В ходе исследования растворов NADH, одного из ключевых коферментов, играющих важную роль во многих биологических процессах, был выявлен ряд факторов, негативно влияющих на точность получаемых данных. С целью избежать постепенной деградации исследуемого вещества под воздействием интенсивного излучения была обеспечена непрерывная циркуляция раствора. Использование в системе трубок малого диаметра позволило минимизировать расход реагентов, а её конструкция позволяет избежать возникновения рассеивающих пузырьков.

Другая проблема, выявленная в рамках исследования растворов NADH, заключается в том, что наблюдаемое изменение характеристик зондирующего импульса связано с его взаимодействием не только с молекулами исследуемого вещества, возбужденными импульсом накачки, но и со стенками кюветы, в которую помещен раствор. Для решения этой задачи была разработана и изготовлена модель устройства, позволяющего вместо использования стеклянной кюветы сформировать ламинарный поток исследуемого раствора в виде струи жидкости.

Также нами было отмечено, что дифракция зондирующего излучения на наведённой накачивающим импульсом в растворителе дифракционной решетке может значительно искажать на регистрируемый время-разрешенный сигнал. Еще один важный фактор, который необходимо учитывать в качестве калибровочного коэффициента при анализе полученных результатов - временная стабильность интенсивности излучения накачки, поскольку ее изменение за время сканирования линией задержки напрямую влияет на количество возбуждаемых молекул исследуемого вещества.

Учет указанных факторов и надлежащая оптимизация экспериментальной установки позволяют повысить точность получаемых данных и их интерпретацию с помощью теоретических моделей.

[1] Gorbunova I.A., Sasin M.E., Beltukov Y.M., Semenov A.A., Vasyutinskii O.S., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **22**, 18155-18168, (2020).

ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОГО СЕНСОРА N₂OАнтоненко Я.В.^{1,2}, Шерстов И.В.^{1,2}¹ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия²НГТУ, г. Новосибирск, Россияantonen-ko.y@yandex.ru

В настоящем исследовании разработан макет оптико-акустического сенсора N₂O на основе квантово-каскадного лазера и резонансного дифференциального оптико-акустического детектора. По результатам эксперимента чувствительность разработанного сенсора составила $(36,85 \pm 6,01)$ ppb N₂O.

Ключевые слова: закись азота, резонансный дифференциальный оптико-акустический детектор, квантово-каскадный лазер.

Россия является одной из крупнейших газодобывающих стран в мире. На газоперерабатывающем производстве примесь закиси азота (N₂O) является отравляющей, поскольку осложняет процессы полимеризации этилена и пропилена виду своих сильных окислительных свойств [1].

Закись азота имеет сильную полосу поглощения в области $\lambda = 4,5$ мкм. В данном исследовании рассмотрен перспективный способ определения концентрации примеси N₂O оптико-акустическим (ОА) сенсором, построенным на основе квантово-каскадного лазера (ККЛ) и резонансного дифференциального оптико-акустического детектора (ОАД) вблизи $\lambda = 4,5$ мкм. Стоит отметить, что подобные системы детектирования не требуют предварительного отбора проб в отличие от широко используемых газовых хроматографов.

Определено оптимальное волновое число для детектирования N₂O $\nu = 2234$ см⁻¹ ($\lambda = 4,476$ мкм) по наибольшему коэффициенту поглощения искомой примеси и наименьшему влиянию остаточного поглощения мешающих газов вблизи выбранной рабочей частоты, включая поглощение паров воды, на основе данных из спектральной базы HITRAN [2].

В ходе исследовательской работы разработан макет ОА-сенсора N₂O (рисунок а). ККЛ (QD4472HH, Thorlabs) работает в импульсно-периодическом режиме на длине волны 4,476 мкм, которая попадает на пик поглощения закиси азота вблизи $\lambda = 4,5$ мкм. Модуляция тока, рабочая температура и частота повторения импульсов лазера, равная резонансной частоте ОАД (~1,8 кГц), поддерживаются контроллером тока и температуры [3]. Средняя мощность лазера составляет ~50 мВт. Импульсы излучения ККЛ возбуждают акустические колебания в исследуемой газовой смеси, которые улавливаются микрофоном. Нормировка сигналов ОАД производится по мощности лазера.

Проведен эксперимент по определению чувствительности ОА-сенсора закиси азота. На рисунке б приведена экспериментальная запись показаний макета ОА-сенсора N₂O при заполнении измерительного детектора поверочной газовой смесью (N₂ + 10 ppm N₂O) или техническим азотом, калибровка отклика проводилась по поверочной газовой смеси. Как видно из рисунка б, чувствительность ОА-сенсора N₂O достигает $n_{min} = 36,85$ ppb N₂O при дисперсии (1σ) = 6,01 ppb N₂O и времени интегрирования 0,1 секунды.

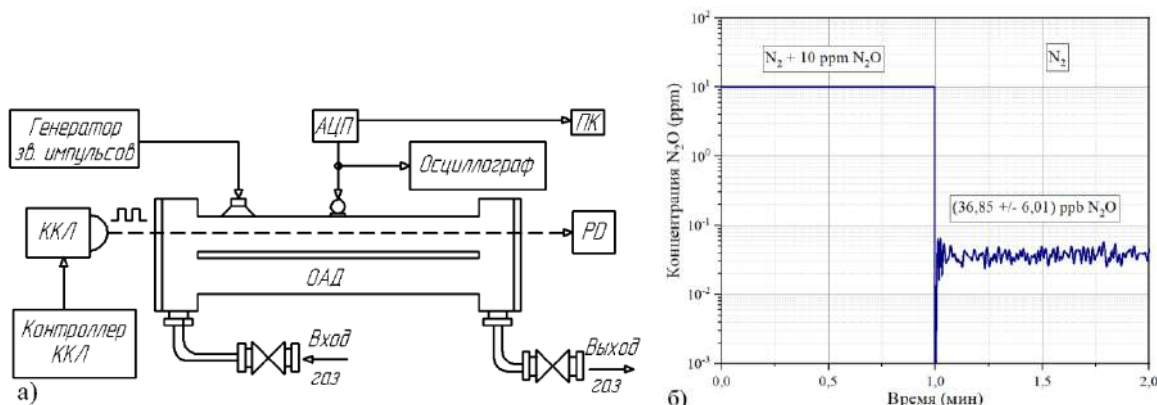


Рисунок. (а) – Схема макета ОА-сенсора N₂O; (б) – Экспериментальная запись показаний ОА-сенсора N₂O

Разработанный макет ОА-сенсора закиси азота обеспечивает высокую чувствительность ~30 ppb N₂O и проведение измерений в режиме реального времени. Это открывает перспективы потенциального использования ОА-сенсора N₂O на газоперерабатывающих заводах как альтернативы газовым хроматографам в порядке реализации программы импортозамещения.

Исследование выполнено при поддержке компании «Остек-АртТул».

[1] Dubkov K.A., Panov G.I., Parmon V.N., *Russ. Chem. Rev.*, **86**, №6, 510-529, (2017).

[2] HITRAN [Электронный ресурс]: URL: <https://spectra.iao.ru/> (дата обращения: 25.09.2024).

[3] Sherstov I.V., et al., *Infrared Phys. Technol.*, **133**, 104865, (2023).

**СПЕЦИФИКА ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ
НА ПОЛЯРНЫХ СРЕЗАХ КРИСТАЛЛА α -LiIO₃**

**Корчагин А.В., Умылин В.Е., Козлова Н.С.,
Забелина Е.В., Петраков В.С., Овсянников Д.А.**

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

korchagin_av_msk@mail.ru

Исследованы температурные зависимости токов короткого замыкания в полярных Z-срезах кристалла α -LiIO₃ с различными токопроводящими покрытиями. Установлено влияние материала токопроводящих покрытий и полярности поверхности их нанесения на характеристики токов.

Ключевые слова: иодат лития, деградация поверхности, ток короткого замыкания.

Полярные срезы пьезоактивных монокристаллов используются в качестве чувствительных элементов различных физических величин, основанных на прямом пьезоэлектрическом эффекте, в резонансных пьезодатчиках, а также в электрооптических приборах [1]. Для такого использования на полярные срезы кристаллов наносятся токопроводящие покрытия. В результате этого наблюдается деградации их поверхностей, что приводит к получению недостоверных данных в процессе работы элементов, вплоть до полного отказа. Эти явления особенно выражены при эксплуатации устройств в условиях, близких к экстремальным, например, при воздействии высоких температур [2]. Процессы деградации напрямую влияют на надежность и срок службы устройств, однако, природа этих процессов и способы их ослабления изучены слабо.

В связи с этим актуальной задачей является исследование специфики механизмов деградации поверхности в связи с нанесением токопроводящих покрытий.

Целью данной работы было изучение температурных зависимостей токов короткого замыкания (ТКЗ) полярных срезов модельного монокристалла α -LiIO₃ с различными материалами токопроводящих покрытий, а именно In, Ag, Al, Cr в различных комбинациях.

Эксперименты проводились на программно-аппаратном комплексе «СКИП» (система контроля и измерения параметров), включающем в себя высокотемпературную печь с контроллером Термолукс-010, электромтр Keithley 6517A, персональный компьютер и программное обеспечение «ИТКЗ-1.0», разработанное в лаборатории (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025615960, авторы: Корчагин А. В., Умылин В. Е.). Образцы α -LiIO₃ не подвергались предварительным стимулирующим внешним воздействиям. Измерения проводились без приложения внешнего электрического поля, в температурном диапазоне от комнатной температуры до 210 °С. До и после нагрева проводилось визуальное исследование состояния поверхности образцов при помощи микроскопа Axio Imager M1m (Zeiss).

В ходе экспериментов были зафиксированы температурные зависимости ТКЗ. Показано, что температурные зависимости ТКЗ характеризуются нелинейностью. Установлено, что как величина, так и направление ТКЗ существенно зависят от материала токопроводящих покрытий и стороны их нанесения.

Исследования проводились в аккредитованной лаборатории полупроводниковых материалов и диэлектриков «Монокристаллы и заготовки на их основе» НИТУ МИСИС при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам FSME-2023-0003.

[1] Buzanov O.A., Zabelina E.V., Kozlova N.S., Sagalova T.B., *Crystallography Reports*, **53**, 5, 853-857, (2008).

[2] Умылин В.Е., Козлова Н.С., Забелина Е.В., Корчагин А.В., Петраков В.С., *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*, **28**, 1, 5-8, (2025).

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ ПИЛООБРАЗНОГО ТИПА

Соловьев В.С., Тимошенков С.П., Тимошенков А.С.

Московский институт электронной техники, Зеленоград, Россия

solov_06_v@mail.ru

Предложена технология изготовления дифракционной решетки пилообразного типа. Вначале изготавливается бинарная решетка, а потом производится напыление хрома на вращающуюся решетку в определенном секторе углов со сменой направления. Конечная процедура анизотропное травление и перенос рельефа хрома в подложку.

Ключевые слова: дифракционная решетка, хром, анизотропное травление.

Дифракционные решетки широко применяются в различных оптических устройствах: спектральных приборах для получения монохроматического света (монохроматоры, спектрофотометры и др.), в качестве оптических датчиков линейных и угловых перемещений, для поляризаторов и оптических фильтров и даже в так называемых антибликовых покрытиях. В настоящее время в связи с быстрым развитием фотоники, дифракционные решетки стали широко применять в фотонных устройствах для ввода света в плоские волноводы. Эффективность ввода в плоские волноводы сильно зависит от формы дифракционной решетки. Форма решетки, которая дает максимальную дифракционную эффективность – пилообразная. Поэтому была поставлена задача изготовить пилообразную дифракционную решетку.

В настоящее время используется метод нарезных дифракционных решеток, заключающийся в формировании поверхностного треугольного микро-профиля штрихов алмазным резцом на специальной делительной машине в слое металла, чаще всего алюминия, напыленного в вакууме на стеклянную подложку [1].

По сравнению с используемыми бинарными решетками ввода излучения позволяет теоретически вводить 100 процентов излучения в волновод [2]. Были запрограммированы решетки с периодами 1.6 мкм, 3 мкм, 6 мкм и 25 мкм. После изготовления фотошаблона, производили заготовку для создания пилообразной решетки. Заготовка создавалась на кремниевой подложке методом оптической литографии с последующим анизотропным травлением для получения бинарного рельефа.

Высота бинарной решетки выбирается в соответствии с периодом дифракционной решетки T , и может быть выбрана с коэффициентом 1-0.25 от необходимого периода дифракционной решетки. Соотношение периода решетки с шириной выступа желательно брать как можно больше насколько позволит разрешающая способность литографа, так как ширина выступа ограничит протяженность пилообразного участка по зоне и уменьшит в конечном итоге дифракционную эффективность решетки. Во время всего процесса напыления решетка непрерывно поворачивается в прямом и обратном направлениях. По отношению к падающему потоку испаряемого вещества, бинарная решетка располагается таким образом, чтобы вектор потока напыляемого материала при повороте плоскости решетки менялся от нормального падения до выбранного.

Не попавший на дно между выступами хром задерживается соседней зоной, и оседает на вертикальной стенке с противоположной стороны соседней зоны. Впоследствии на завершающем этапе, этот вертикальный столб хрома убирается щелочным травителем. При вращении заготовки с бинарным рельефом от нормального угла падения хрома до крайнего противоположного направления с углом, зависящим от высоты рельефа на образце (мы брали угол порядка 20 градусов) происходит плавное изменение толщины напыляемого хрома. В затененную зону с правой стороны зоны, хром попадет только при нормальном угле падения 90 градусов. Максимальное количество хрома будет осаждаться с левой стороны зоны, где время напыления при вращении будет максимальным. В результате такого неравномерного по толщине напыления, которое при равномерном вращении туда-сюда, получается пилообразный профиль, показанный на рисунке. Далее анизотропным травлением этот рельеф на хrome переносится в кремниевую подложку.

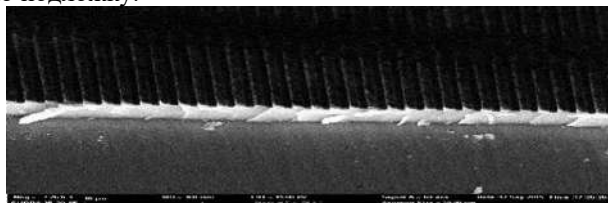


Рисунок. Скан профиля пилообразной дифракционной решетки, полученной на электронном микроскопе с увеличением X50000

В результате изготовлены и испытаны на отражение пилообразные дифракционные решетки с высотой 0.4 мкм и периодами 1.5 мкм, 3 мкм и 6 мкм, и 25 мкм. При испытании решеток на лазере с длиной волны 650 нм, по интенсивности минус первые порядки в 30 раз меньше, чем плюс первые порядки.

[1] Гужов В.Ю., Патент РФ № 2 615 020/ 03.04.2017.

[2] Соловьев В.С. и др., Патент РФ № 2841334/ 06.06.2025.

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ДЛЯ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОТОННЫХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И УСТРОЙСТВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

Гончаров Ф.М.^{1,2}, Киселев Ф.Д.^{1,2}, Самсонов Э.О.^{1,2}

¹ООО «КвантКАД», Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

fedor_goncharov@itmo.ru

Программное обеспечение предназначено для схемотехнического моделирования устройств оптоэлектроники и фотонных интегральных схем.

Ключевые слова: схемотехническое моделирование, фотонные интегральные схемы, устройства оптоэлектроники.

Оптоэлектронные устройства уже сейчас находят широкое применение в различных областях: от телекоммуникаций до медицины. Интеграция объемных волоконно-оптических компонентов на чип обещает удешевление их производства благодаря высокой масштабируемости, а также миниатюризацию устройств и повышение их стабильности. Так, например, фотонные интегральные схемы (ФИС) открывают новые горизонты для квантовых коммуникаций [1], высокочувствительных сенсоров [2] и оптических вычислений [3]. Однако, проектирование ФИС является трудоемкой задачей и требует ряд специализированных подходов и инструментов. Отдельные элементы моделируются численными методами распространения поля, такими как, например, метод конечных элементов (FDTD). Однако для схем, состоящих из множества элементов, данный подход становится сильно ресурсоемким и зачастую нецелесообразным. Здесь находит свое применение схемотехническое моделирование.

Схемотехническое моделирование опирается на готовые физические модели используемых в схеме устройств, учитывающие основные параметры, влияющие на выходные характеристики. Для реализации данного типа моделирования используется специализированное программное обеспечение (ПО). Разрабатываемое ПО «КвантКАД» предназначается для схемотехнического моделирования, которое реализуется путем создания схемы из оптических и электрических компонентов, широкая номенклатура которых представлена в библиотеке элементов. Вычисления проводятся двунаправленным или однонаправленным решателем, позволяя получить результат как во временной, так и в частотной области. Отображение результатов гибко реализуется различными инструментами визуализации (анализаторы спектра, глаз-диаграмма и другие). Доступны параметрические расчеты, демонстрирующие влияние интересующих параметров на работу схемы. Кроме того, возможно использование пользовательских элементов, рассчитанных в стороннем программном обеспечении, путем загрузки матрицы S-параметров, а также написание собственных математических моделей элементов на языке Python и создание иерархических моделей. Еще одним преимуществом ПО «КвантКАД» является тесное сотрудничество с производителями ФИС и разработка набора проектирования под конкретный технологический процесс (Process Design Kit – PDK), что значительно упрощает разработку ФИС с учетом доступных способов их производства.

Разрабатываемое ПО не ограничивается моделированием ФИС. Оптоволоконные и оптоэлектронные устройства также могут быть промоделированы в разработанном ПО, что упрощает их проектирование. Помимо задач проектирования, ПО «КвантКАД» может быть использовано в образовательных целях, поскольку дает возможность наглядно продемонстрировать принципы работы оптоэлектронных устройств и стоящую за ними физику. Необходимость создания описанного выше ПО обуславливается потребностью в доверенном ПО для исследователей и производителей при отсутствии отечественных аналогов. ПО уже доступно на рынке и продолжает активно дополняться и улучшаться согласно актуальным потребностям исследователей, индустрии и образования.

[1] Luo W., Cao L., Shi Y., et al., *Light: Sci. Appl.*, **12**, №1, 175, (2023).

[2] Dhote C., Singh A., Kumar S., *IEEE Sens. J.*, **22**, №19, 18228-18239, (2022).

[3] Farmakidis N., Dong B., Bhaskaran H., *Nat. Rev. Electr. Eng.*, **1**, №6, 358-373, (2024).

УПРАВЛЯЕМАЯ СВЕТОДИОДНАЯ МАТРИЦА ДЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ ОДНОПИКСЕЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГАЗОВ

Опарин Е.Н., Шумигай В.С., Лаппо-Данилевская А.К.,
Исмагилов А.О., Цыпкин А.Н.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
oparine2@gmail.com

Оптическая визуализация газов является передовым методом обнаружения утечек газа, который активно применяется в нефтегазовую и химическую промышленности. Реализация этой методики с использованием подходов однопиксельной визуализации позволит открыть новые перспективы к повышению чувствительности и доступности технологии в РФ.

Ключевые слова: однопиксельная визуализация, детектирование газов, светодиоды.

Передовым методом автоматизации процесса обнаружения утечек является оптическая визуализация газа [1]. Она позволяет удаленно выявлять потоки газов по их влиянию на прохождение инфракрасного излучения через атмосферу. Внедрение данной методики повышает как эффективность мониторинга, так безопасность условий труда, так как сотрудники предприятий могут выявлять утечки дистанционно. Тем не менее, существует важное ограничение – существующие матричные системы визуализации газа (камеры среднего инфракрасного диапазона) обладают высокой стоимостью и в основном являются импортными, что затрудняет их внедрение на предприятиях нефтегазовой отрасли РФ. Разработка однопиксельной оптической визуализации газа может значительно увеличить доступность технологии для более широкого круга предприятий.

Рассматриваемый подход основан на освещении области наблюдения набором структурированных оптических полей с последующим детектированием прошедшего излучения единственным детектором без пространственного разрешения [2]. Восстановление изображения осуществляется с применением вычислительных алгоритмов за счёт накопления сигнала в процессе смены освещающих объект оптических полей. Одним из вариантов формирования паттернов освещения является использование адресно-управляемого массива светодиодов [3]. Для таких устройств в видимом диапазоне продемонстрирована высокая скорость переключения паттернов и, как следствие, высокая частота кадров ОВ. Данная характеристика важна при визуализации потоков газа ввиду их нестационарности.

В представленной работе рассматриваются подходы к разработке системы поиска утечек газа на основе инфракрасной однопиксельной визуализации для повышения чувствительности и доступности таких систем для промышленного применения в РФ.

Предлагаемая система включает в себя массив светодиодов с центральной длиной волны 940 нм. Поверх массива устанавливается стеклянное окно, с нанесенной люминесцентной пленкой, при оптической накачке излучающая в диапазоне 3,2-3,7 мкм, где лежат линии поглощения сероводородов. Для управления матрицей используется программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) Altera Cyclone II EP2C5T144. Индивидуальное управление каждым светодиодом в матрице из NxN элементов потребовало бы использование N² выходов ПЛИС, что крайне затратно при масштабировании матрицы. Вместо этого светодиоды в матрице связываются общим анодом, что позволяет сократить число необходимых выходов до 2N. На рисунке представлена концептуальная схема предлагаемой системы.

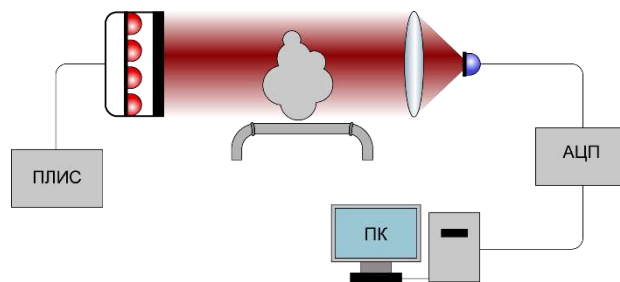


Рисунок. Концептуальная схема системы поиска утечек газа на основе инфракрасной однопиксельной визуализации

Таким образом, адаптации подходов однопиксельной визуализации для систем поиска утечек газа повысит их чувствительности и надежность, а также сделает более доступными для промышленного применения в РФ. Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной программы академического лидерства «Приоритет 2030».

- [1] Ravikumar A.P., Wang J., Brandt A.R., *Environmental Science & Technology*, **51**, №1, 718-724, (2017).
- [2] Edgar M.P., Gibson G.M., Padgett M.J., *Nature Photonics*, **13**, №1, 13-20, (2019).
- [3] Xu Z. H. et al., *Optics Express*, **26**, №3, 2427-2434, (2018).

КВАНТОВАЯ ОПТИКА И КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КВАНТОВОГО КАНАЛА В УСЛОВИЯХ
ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПО МЕТЕОДАНЫМ**

Каргина Д.А., Гончаров Р.К.

Университет ИТМО, Лаборатория квантовых коммуникаций, Санкт-Петербург, Россия

daria.kargina@metalab.ifmo.ru

В работе рассматривается моделирование квантового канала связи в турбулентной атмосфере между двумя удалёнными наземными пунктами, с учётом влияния метеорологических факторов на характеристики сигнала. В частности, исследуется влияние атмосферной турбулентности на коэффициент пропускания оптического канала и конечную скорость генерации стойкого ключа в системах квантового распределения ключей (КРК).

Ключевые слова: атмосферный канал, турбулентность.

Рассеяние, сцинтилляция и изменение направления распространения луча существенно влияют на реальные коммуникационные системы, в частности, на квантовое распределение ключей в атмосферных каналах [1]. Учет случайно меняющихся атмосферных условий (осадки, яркость неба, турбулентность) оказывается критичным для производительности системы.

Потери в канале вызваны взаимодействием света с неоднородной средой, вызывающим переотражение, рассеяние и искажение фронта волны из-за случайных флуктуаций показателя преломления. Анализ метеорологических данных позволяет оценить эти флуктуации и потери, влияющие на скорость генерации стойкого ключа. В частности, осадки, ограничение видимости и турбулентность ограничивают распространение сигнала в атмосфере. В стандартных моделях турбулентность оценивается на основе структурной константы показателя преломления [2], используя приблизительные дневные и ночные значения.

В данной работе, для оценки генерации стойкого ключа в турбулентной атмосфере C_n^2 рассчитывается с помощью базы данных ERA5 [3] – открытой базы метеорологических данных со всего мира. Данный подход дает более точную оценку турбулентности в канале. Применяется метод расчета среднего масштаба амплитуды неоднородностей показателя преломления воздуха [4]. По рассчитанным значениям дисперсии температуры D_T^2 , давления P , средней температуры $\langle T \rangle$, а также с использованием эмпирических данных для поляризуемости света A и масштаба турбулентности L моделируется карта распределения структурной константы C_n^2 в регионе:

$$C_n^2 = \left(A \frac{P}{\langle T \rangle^2} \right)^2 \frac{D_T^2}{1.73 L^{2/3}}. \quad (1)$$

Далее для стандартной телекоммуникационной длины волны рассчитывается коэффициент пропускания и скорость генерации ключа.

Впервые предложен метод оценки структурной константы турбулентности на основе открытых климатических данных (ERA5), позволяющий адаптировать существующие модели гауссовских каналов с потерями к конкретным атмосферным условиям. Получены значения структурной константы выбранного региона. На основе этих данных проведён расчёт коэффициента пропускания канала и скорости генерации стойкого ключа в системе КРК. Проанализировано влияние турбулентности и климатической сезонности на эффективность генерации ключа.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00786).

[1] Pirandola S., *Physical Review Research*, **3**, №1, 013279, (2021).

[2] Татарский В.И., *Путол Классик*, (1967).

[3] ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present [Электронный ресурс]: URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels> (дата обращения: 10.01.2025).

[4] Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю., Кочеткова О.С., *Известия Иркутского государственного университета*, **2**, №1, 139-149, (2012).

СОЗДАНИЕ И МАНИПУЛЯЦИЯ СОСТОЯНИЯМИ КОТА ШРЕДИНГЕРА НА ОСНОВЕ ПОЛУКЛАССИЧЕСКИХ ПРЕДСКАЗАНИЙ

Гончаров Р.К.^{1,2}, Веселкова Н.Г.³, Киселев А.Д.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²СМАРТС-Кванттелеком, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Санкт-Петербург, Россия

Предложен метод генерации состояний кота Шредингера с помощью негауссовского вентиля, обеспечивающий высокую точность воспроизведения (0.99) и вероятность успеха (до 0.4) при малых числах фотонов в ресурсном фоковском состоянии.

Ключевые слова: состояния кота Шредингера, негауссовские операции, полуклассическое приближение.

Представлена схема генерации оптических состояний кота Шредингера — квантовых суперпозиций когерентных состояний света — с использованием двухузлового негауссовского вентиля. Ключевым элементом схемы является вспомогательный осциллятор, подготовленный в состоянии с фиксированным числом фотонов, который взаимодействует с целевым осциллятором через операцию запутывания. Гомодинное измерение импульса вспомогательной системы приводит к коллапсу целевого состояния в суперпозицию.

Полуклассический подход обеспечивает интуитивную визуализацию процесса в фазовом пространстве. Результат измерения импульса вспомогательного осциллятора соответствует двум возможным значениям импульса целевой системы, что геометрически интерпретируется как расщепление начального состояния на две компоненты. Минимальные искажения этих компонент достигаются, когда входное когерентное состояние локализовано вблизи точки, связанной с результатом измерения.

Для входного когерентного состояния схема генерирует высококачественные состояния кота с точностью воспроизведения, превышающей 0,99, когда результат измерения совпадает с координатой центра входного состояния. Вероятность успешной генерации варьируется от 0,2 до 0,4 при умеренном числе фотонов (до 5) и малых отклонениях результата измерения. Качество состояния плавно снижается при увеличении амплитуды входного состояния или смещении результата измерения.

Статистика выходного состояния, характеризуемая функцией Вигнера, подтверждает формирование двухкомпонентной суперпозиции с четкими негауссовскими особенностями. Полуклассические предсказания демонстрируют высокое соответствие с точным квантовым описанием, обеспечивая инструмент для проектирования сложных квантовых схем. Предложенный метод открывает перспективы для создания масштабируемых состояний кота для систем квантовой коммуникации, метрологии и коррекции ошибок [1, 2].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-21-00484).

[1] Azuma K., Economou S.E., Elkouss D., Hilaire P., Jiang L., Lo H.-K., Tzitrin I., *Rev. Mod. Phys.*, **95**, №4, 045006, (2023).

[2] Cao A., Eckner W.J., Lukin Yelin T., Young A.W., Jandura S., Yan L., Kim K., Pupillo G., Ye J., Darkwah Oppong N., Kaufman A.M., *Nature*, **634**, №8033, 315-320, (2024).

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОЙ ФАЗЫ В РЕЗОНАТОРАХ
В ФОРМЕ КОЛЬЦА И ЛЕНТЫ МЁБИУСА**

Лытаев А.А., Совершенов И.Д., Попов И.Ю.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

sas-lyt@yandex.ru

Проводится исследование управления спектральными характеристиками и оптическими свойствами резонаторов в форме кольца и ленты Мёбиуса с использованием численных методов в среде COMSOL Multiphysics.

Ключевые слова: диэлектрические резонаторы, электрооптическое управление, квантовые вентили.

Современные фотонные устройства и компоненты активно используют резонаторные структуры различных геометрий, среди которых важную роль играют кольцевые резонаторы. Одной из перспективных модификаций таких структур является резонатор в форме ленты Мёбиуса, отличающийся нетривиальной топологией [1]. Введение в подобные системы материалов с электрооптическими свойствами, таких как ниобат лития, позволяет эффективно управлять их спектральными и фазовыми характеристиками посредством внешнего электрического поля [2].

Целью данного исследования является сравнительный анализ спектральных характеристик традиционного кольцевого резонатора и резонатора типа Мёбиуса с использованием численного моделирования в среде COMSOL Multiphysics. Особое внимание уделено исследованию влияния электрического поля на накопление геометрической фазы Берри и динамической фазы в рассматриваемых системах. Изучение фазовых эффектов обусловлено их фундаментальной значимостью для приложений в интегральной фотонике, в частности, для создания элементов квантовых вычислений и передачи информации [3].

Методологически исследование основано на двух подходах: проведении анализа собственных мод резонаторов путём численного решения стационарной задачи с нулевыми граничными условиями, а также численном моделировании распространения света через прямой волновод, сближенный с резонатором, для оценки спектральных характеристик и степени ослабления интенсивности выходного сигнала.

Полученные результаты демонстрируют существенные различия спектральных и фазовых характеристик между кольцевым резонатором и резонатором в форме ленты Мёбиуса. Установлено, что топология резонатора Мёбиуса приводит к характерным изменениям спектра мод и более сложной структуре распределения фазы. Кроме того, приложенное внешнее электрическое поле значительно влияет на величину накапливаемой в резонаторе динамической фазы. Полученные в работе результаты для этой зависимости изображены на рисунке.

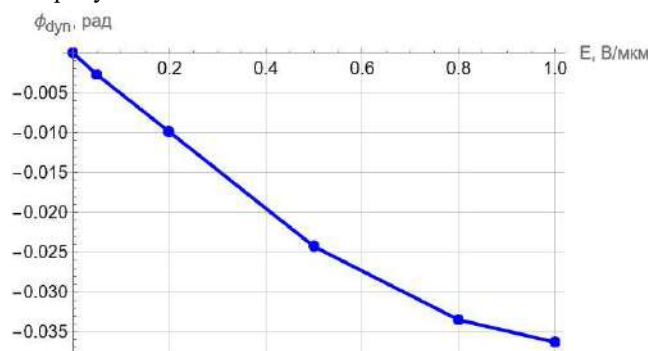


Рисунок. Зависимость динамической фазы в резонаторе Мёбиуса изготовленном из ниобата лития от величины внешнего поля

Таким образом, представленное исследование открывает перспективы для разработки новых фотонных устройств с расширенными функциональными возможностями, управляемыми электрооптическими эффектами и топологическими особенностями структур. Данные свойства могут быть использованы для реализации квантовых логических элементов, таких как квантовые вентили и интерферометры, необходимые в оптических квантовых компьютерах для кодирования и обработки квантовой информации, в частности CZ-вентиль.

[1] Chen Y., Hou J., Zhao G., Chen X., Wan W., *Commun. Phys.*, **6**, №1, 84, (2023).

[2] Xu Q., Chen L., Wood M.G., Sun P., Reano R.M., *Nat. Commun.*, **5**, №1, 5337, (2014).

[3] Wang J., Valligatla S., Yin Y., Schwarz L., Medina-Sánchez M., Baunack S., Lee C.H., Thomale R., Li S., Fomin V.M., Ma L., Schmidt O.G., *Nat. Photon.*, **17**, №1, 120-125, (2022).

МЕРА ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ АТАКЕ С ПЕРЕИЗЛУЧЕНИЕМ ФОТОНОВ ДЛЯ СИСТЕМ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ С ОДНИМ ДЕТЕКТОРОМ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ

Геллерт М.Е., Наседкин Б.А., Чистяков В.В., Гайдаш А.А., Козубов А.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

mihailgellert@yandex.ru

Предложен метод защиты систем квантового распределения ключей с одним детектором одиночных фотонов от атаки с переизлучением, основанный на внесении дополнительной временной задержки в блок получателя.

Ключевые слова: Квантовое распределение ключей, квантовый взлом, переизлучение фотонов лавинным фотодиодом.

Системы квантового распределения ключей (КРК) позволяют Алисе и Бобу сгенерировать симметричную битовую последовательность. При этом безопасность таких систем обеспечивается законами квантовой физики. Однако практические реализации систем КРК имеют уязвимости, связанные с несовершенством оборудования, которыми может воспользоваться злоумышленник (Ева).

Особенно уязвимыми являются детекторы одиночных фотонов (ДОФ). В настоящее время большинство систем КРК используют детекторы, основанные на лавинных фотодиодах (ЛФД). Хотя ЛФД обладают рядом преимуществ — высокой скоростью, эффективностью, компактностью и низкой ценой — они подвержены ряду уязвимостей, в частности эффекту переизлучения фотонов [1].

Переизлучённый фотон может попасть в оптический канал, создавая уязвимость: Ева может использовать такие фотоны для получения информации о квантовом состоянии [2]. Эти фотоны, проходя через модулирующие элементы, могут приобрести информацию о состоянии изначального фотона. Время регистрации позволяет установить, какой детектор их испустил, что позволяет извлечь данные о ключе.

Несмотря на наличие методов противодействия атакам с переизлучением, многие современные системы КРК остаются уязвимыми к данному типу атак. Поэтому в рамках данной работы предлагается новая контрмера, основанная на внесении временной задержки в оптическую схему системы КРК между ДОФ и модулятором. Величина временной задержки подбирается таким образом, чтобы обеспечить различие между состоянием модулятора для переизлучённого фотона и изначального фотона. Такой подход позволяет реализовать несовпадение параметров переизлучённого фотона и вызвавшего его сигнала. Данная контрмера предназначена для применения в системах КРК с одним ДОФ.

Основываясь на полученных экспериментальных результатах, представленных на рисунке, была проведена оценка длины линии задержки для реализации контрмеры.

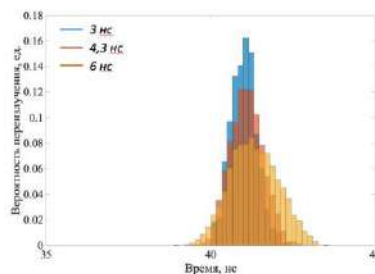


Рисунок. Распределение вероятности переизлучения фотона от ширины окна срабатывания детектора

Из проведённых измерений можно заметить, что фотоны переизлучаются в пределах окна чувствительности ДОФ. На основе этого можно сформулировать требование к контрмере: суммарное время прохождения фотона до ДОФ, его переизлучения и обратного пути до модулятора должно превышать время удержания сигнала на модуляторе.

$$\frac{1}{f} < \frac{2nL}{c} + t_{bf}, \quad (1)$$

где f — частота смены состояний на модуляторе; c — скорость света; n — показатель преломления оптического волокна; L — расстояние от модулятора до ДОФ; t_{bf} — время переизлучения. Величина t_{bf} является положительной и меньше, чем мертвое время детектора, поэтому $t_{bf} \ll t_{ph}$. В таком случае, основываясь на неравенстве (1), длину волокна можно выразить следующим образом:

$$L > \frac{c}{2nf}. \quad (2)$$

Так, для системы, работающей с частотой 100 МГц, длина линии задержки должна составлять не менее 1 м, чтобы атака с переизлучением не могла быть реализована против системы КРК с одним ДОФ.

[1] Chynoweth A.G., McKay K.G., *Physical Review*, **102**, №2, 369, (1956).

[2] Kurtsiefer C., Zarda P., Mayer S., Weinfurter H., *Journal of Modern Optics*, **48**, №13, 2039-2047, (2001).

КВАНТОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ РАДИО-МОДАМИ В МОДЕЛИ ОДНОАТОМНОГО МАЗЕРА С ДВУМЯ РЕЗОНАТОРАМИ

Попов Е.Н., Трифанов А.И.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

alextrifanov@itmo.ru

В работе исследуется эффект квантовой связи между радио-полями в одноатомном лазере с двумя пространственно разделенными резонаторами. Каждый атом в пучке в зависимости от своего состояния может испускать или поглощать фотон в каждом из резонаторов, тем самым запутывая квантовые состояния двух резонаторных мод. В результате запутывания возникает когерентность между состояниями двумодового поля с одинаковым общим числом фотонов в обеих модах. Для исследования возникающей связи получено аналитическое стационарное решение основного оптического уравнения и исследована зависимость энтропии запутанности фон Неймана от добротности резонаторов. С помощью численного моделирования получены наилучшие условия для возникновения квантовой запутанности.

Ключевые слова: квантовая оптика, одноатомный лазер, перепутанное состояние.

Одноатомный лазер - один из самых эффективных инструментов наблюдения квантовых эффектов взаимодействия атома и поля [1]. Ранее с помощью одноатомного лазера была успешно проверена модель Джейнса-Каммингса. Также было опубликовано много экспериментальных и теоретических работ, из которых мы приводим несколько использованных нами примеров [2]. Наиболее значимое исследование одноатомного лазера было проведено группой Г. Вальтера в конце прошлого века. Благодаря этим работам квантовые свойства одноатомного лазера с одним резонатором уже описаны [3]. Несмотря на успех, техническая реализация такой квантовой схемы одноатомного лазера оказалась трудной и дорогостоящей задачей, поэтому дальнейшие исследования продолжились уже после появления альтернативных схем управляемого взаимодействия выделенной моды и атома. К наиболее поздним работам можно отнести наблюдение и предсказание новых эффектов с помощью наномазера на сверхпроводящем LC-контуре [4]. Также ведутся экспериментальные работы по исследованию взаимодействия одиночных атомов с серией связанных резонаторов [5]. Развивается теория одноатомного лазера. Несмотря на продолжающиеся исследования, мы не нашли работ по формированию квантовой связи между несколькими независимыми модами с помощью единой системы накачки в одноатомном лазере. Поэтому в данной работе мы строим начальную теорию этого явления для получения новых физических результатов в последующих исследованиях.

В нашей статье описывается начальная теория одноатомного лазера, который содержит два резонатора, расположенных на пути одного и того же атомного пучка. Атомы пучка возбуждаются в смешанное состояние населённости нижнего и верхнего уровней с помощью сфокусированного света накачки. Затем подготовленные атомы последовательно пролетают через пару резонаторов. Атомный пучок считается достаточно разреженным для того, чтобы внутри пары резонаторов одновременно находился только один атом. Во время пролёта через каждый резонатор атом периодически переходит с одного уровня на другой, излучая фотон в моду или поглощая его. После того как атом покидает второй резонатор, квантовое состояние атома разрушается из-за взаимодействия с окружением. Атомно-полевая волновая функция испытывает коллапс: двухмодовое поле при этом превращается в статистический ансамбль тех состояний, которые соответствовали атому, вылетевшему на нижнем или верхнем уровне. Описанный процесс повторяется во время пролёта каждого атома пучка.

На основе описанной физической модели мы предлагаем теорию формирования квантовой связи между модами резонаторов, разнесённых в пространстве. Эта связь обусловлена сохранением квантового состояния атома во временном промежутке его пролёта между первым и вторым резонаторами. Во время взаимодействия атом записывает информацию о поле первого резонатора в суперпозицию квантовых состояний и передаёт её во второй резонатор. Процесс передачи информации выглядит так: атом поглощает фотон из первого резонатора и излучает во второй или наоборот — в результате появляется когерентность между полевыми состояниями с одинаковым суммарным количеством фотонов в обеих модах. Математически, наша задача состоит в поиске аналитического вида стационарного состояния полевых мод под действием атомной накачки.

[1] Walter H., *Physics-Uspekhi.*, **39**, 1.7, 727-743, (1996).

[2] Filipowicz P., Javanainen J., Meystre P., *Phys. Rev. A*, **34**, 3077-3087, (1986).

[3] Lugiato L.A., Scully M.O., Walter H., *Phys. Rev. A*, **36**, 740-743, (1987).

[4] Yu D., Kwek L.C., Amico L., Dumke R., *Phys. Rev. A*, **95**, №5, 053811/1-10, (2017).

[5] Will E. et. al., *Phys. Rev. Lett.*, **126**, 23, 233602/1-5, (2021).

АТОМНЫЙ МАГНИТОМЕТР С МОДУЛИРОВАННОЙ ПО ПОЛЯРИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ

Радченко М.Д.¹⁻³, Юдин В.И.¹⁻³, Басалаев М.Ю.¹⁻³, Тайченачев А.В.^{1,2}

¹ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²НГУ, г. Новосибирск, Россия

³НГТУ, г. Новосибирск, Россия

sciencefloppa@gmail.com

В исследовании проведена оценка влияния параметров модулированного по поляризации оптического излучения на характеристики атомного магнитометра, использующего в своей основе магнитооптический резонанс на частоте Лармора.

Ключевые слова: атомные магнитометры, магнитооптический резонанс, частота Лармора.

В настоящее время измерение магнитного поля является неотъемлемой частью множества прикладных задач и научных исследований [1]. Атомные магнитометры, основанные на магнитооптическом резонансе (МОР), зарекомендовали себя как компактные, чувствительные и достаточно точные приборы для измерения магнитных полей [2]. Кроме того, к их преимуществам относится возможность работы в магнитном поле Земли без экранирования и отсутствие необходимости в криогенной технике [3].

Цель данного теоретического исследования состоит в оценке влияния параметров модулированного оптического излучения на характеристики МОР. В качестве модели чисто оптического магнитометра рассматривается оптический переход $J_g \rightarrow J_e$ с различными значениями углового момента в основном (J_g) и возбужденном (J_e) состояниях в атомах щелочного металла с буферным газом. В нашем случае МОР возникает под действием монохроматического лазерного излучения, поляризация которого модулирована на частоте ларморовской прецессии $\Omega_L = gB_0$, зависящей от измеряемого магнитного поля $\mathbf{B} = B_0 \mathbf{b}$. В рамках исследования рассматривалась модуляция как параметра эллиптичности, так и направления вектора поляризации.

Характеристики сигнала ошибки, формируемого по спектроскопическому сигналу МОР, отражают метрологические характеристики магнитометра: точность зависит от сдвига нуля сигнала ошибки $\Delta\omega$, а чувствительность – от наклона линейного участка кривой сигнала ошибки $k = \tan \alpha$ (Рисунок а).

В ходе исследования установлены зависимости характеристик сигнала ошибки от коэффициента модуляции и интенсивности оптического излучения. На основе данных зависимостей показано, что модуляция поляризации излучения на переходах $J \rightarrow J$ и $J \rightarrow J-1$ позволяет добиться большей чувствительности чисто оптического магнитометра по сравнению с переходами $J \rightarrow J+1$ независимо от значения углового момента J (Рисунок б). Кроме того, определены оптимальные значения модулируемых параметров поляризации и допустимые погрешности этих параметров для наиболее эффективной работы атомного магнитометра.

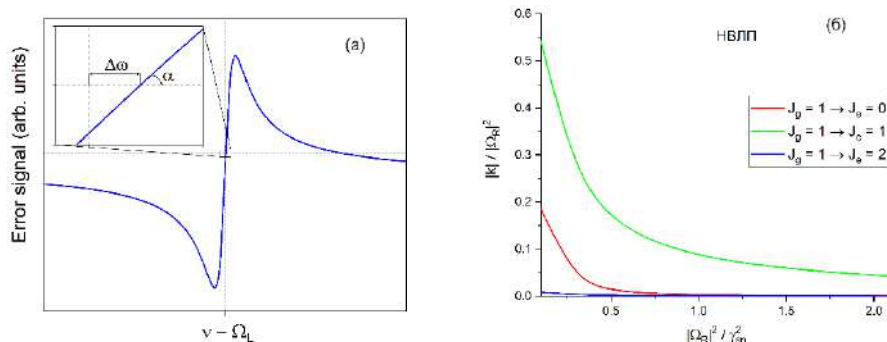


Рисунок. (а) графическое пояснение исследуемых характеристик сигнала ошибки МОР; (б) график зависимости наклона сигнала ошибки от интенсивности оптического излучения при модуляции направления вектора линейной поляризации (справа)

Полученные результаты позволяют оптимизировать и улучшить характеристики атомных магнитометров на основе МОР с модуляцией параметров поляризации.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-42-00093).

[1] Budker D., Romalis M.V., *Nature Physics*, **3**, 227-234, (2007).

[2] Fabricant A., Novikova I., Bison G., *New J. Phys.*, **25**, 025001, (2023).

[3] Петренко М.В., Пазгалев А.С., Вершовский А.К., *Квантовая электроника*, **52**, №2, 119-126, (2022).

СПИНОВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ В ИНТЕРФЕЙСАХ НА ОСНОВЕ ДВУХСЛОЙНОГО ГРАФЕНА, ЛЕГИРОВАННОГО ЕВРОПИЕМ

Мельчакова Ю.А.^{1,2}

¹Томский государственный университет, г. Томск, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

iuliia.melchakova@metalab.ifmo.ru

Теоретически предложены спин-поляризованные 2D гетероструктуры TBG/NPBG с адсорбированным Eu. DFT-расчеты выявили значительную поляризацию на уровне Ферми и плоский характер дисперсии зон на уровне Ферми, вызванный локализованными состояниями муаровых узоров TBG.

Ключевые слова: биграфен, европий, DFT.

Теоретическое исследование продемонстрировало перспективность Eu-функционализированных производных биграфена – скрученного биграфена (TBG) и нанопористого биграфена в упаковке AA (NPBG(AA)) (Рисунок) – в качестве материалов с управляемыми спиновыми свойствами и плоскими электронными зонами. Используя расчеты электронной структуры в рамках теории функционала плотности с периодическими граничными условиями (DFT-PBC), было установлено, что адсорбция ионов европия (Eu) на поверхности указанных структур индуцирует значительные структурные реорганизации. В случае TBG это проявляется в формировании выраженной деформации, образовании дефектов высокой координации (пентагоны, гептагоны, октагоны, нонагоны) и межслойном "сшивании" ковалентными связями C-C, что интерпретируется в рамках Теоремы о топологической стабильности [1], как механизм релаксации напряжений.

Ключевым результатом работы является обнаружение выраженной спиновой поляризации вблизи уровня Ферми для гетероструктур Eu/NPBG(AA) и Eu/TBG. Анализ плотности состояний (DOS) и распределения спиновой плотности показал асимметрию заполнения спиновых подзон и локализацию нескомпенсированных спинов преимущественно на углеродных фрагментах структур, а не на атомах Eu.

Наиболее значимым электронным свойством исследованных гетероструктур является формирование плоских дисперсий валентной зоны и зоны проводимости в непосредственной близости от уровня Ферми. В Eu/TBG плоские зоны ассоциированы с локализованными состояниями, формируемыми под влиянием Moiré-узоров скрученной структуры.

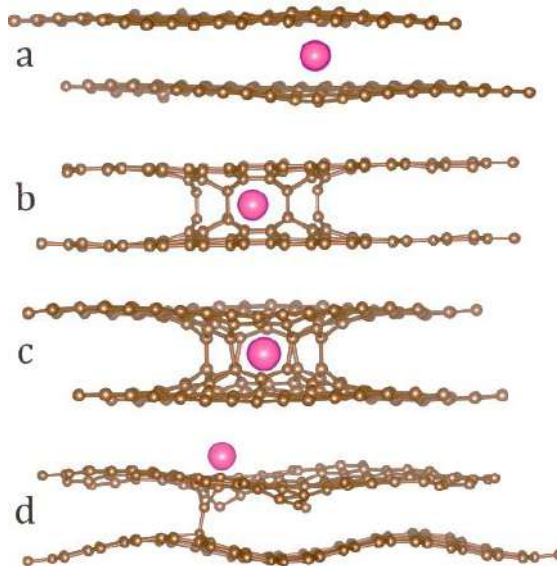


Рисунок. Атомные структуры гетероструктур на основе биграфена: (a) Eu/BG, (b) Eu/NPBG(AA), (c) Eu/NPBG(AB), (d) Eu/TBG (вид сбоку). Атомы Eu показаны фиолетовым; атомы углерода — коричневым

Наличие плоских зон вблизи уровня Ферми является критическим условием для проявления сильных электронных корреляций. Это открывает путь к возможному формированию в таких материалах экзотических квантовых фаз при низких температурах, таких как сверхпроводимость, состояния Моттовского диэлектрика или необычные магнитные упорядочения. Предложенные Eu-легируемые гетероструктуры на основе биграфена представляют значительный интерес для развития передовых спинтронных устройств (спиновая логика, память) и квантовых технологий.

Работа выполнена в рамках научного проекта Приоритет-2030.

[1] Avramov P.V., Kuklin A.V., *New J. Phys.*, **24**, 103015, (2022).

КВАНТОВОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ АЛГОРИТМА ХЕШИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЦЕССОРА НА БАЗЕ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ

Хорсова И.В.^{1,2}, Бетеров И.И.^{1,2}

¹НГУ, г. Новосибирск, Россия

²ИФП СО РАН им. А.В. Ржанова, г. Новосибирск, Россия

i.khorsova@g.nsu.ru

В работе представлен алгоритм квантового хеширования, реализуемый с помощью минимального количества квантовых логических операций, выполняемых процессором на базе нейтральных атомов.

Ключевые слова: квантовое хеширование, квантовые вычисления, нейтральные атомы.

Хеш-функции – одни из самых востребованных криптографических систем в мире. Они применяются для проверки целостности данных, хранения паролей, создания цифровых подписей и идентификации аккаунтов [1]. Также хеширование особенно подходит для реализации алгоритмов доказательства с нулевым разглашением, широко используемых в вышеперечисленных сферах [2]. Ввиду приближающейся квантово-вычислительной революции хеш-функции могут оказаться под угрозой взлома [3]. Квантовые вычисления, в свою очередь, позволяют достичь преимущества перед классическими системами в генерации случайных значений и скорости осуществления операций в определённом спектре задач. В то же время алгоритмы, основанные на квантовом математическом аппарате, довольно сложны в физической реализации и могут быть подвержены большому количеству ошибок во время выполнения квантовых логических гейтов [4, 5]. В данной работе представлен алгоритм хеширования, состоящий из классической части привычного алгоритма sha256 [3] и квантовой, требующей для реализации выполнения всего трёх типов логических вентилей. Также по структуре взаимодействия кубитов алгоритм ориентирован на процессор из массива нейтральных атомов, что делает его тренировочным приложением для такого типа квантовых компьютеров на этапе их разработки.

В процессе создания алгоритма и математического моделирования его работы решаются следующие задачи:

1. Создание необратимой функции с возможностью получения стабильных неизменяемых значений на её выходе при подаче одних и тех же данных на вход.

2. Построение алгоритма таким образом, чтобы были задействованы логические операции, применительные к процессору на массиве нейтральных атомов. А также применение этих вентилей в порядке, который допускает возможная конфигурация атомов в ловушках (рисунок), представляющих собой вычислительные кубиты.

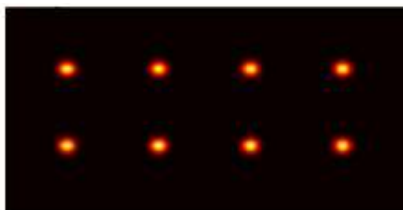


Рисунок. Возможная конфигурация кубитов в оптических ловушках

3. Анализ алгоритма на выполнение условий хеш-функции: односторонность и ϵ -случайность возвращаемых значений при незначительном изменении подаваемых на вход данных.

По итогу работы создан алгоритм квантового хеширования, который может применяться как протокол доказательства с нулевым разглашением. Алгоритм демонстрирует квантовое превосходство, снижая алгоритмическую сложность при сохранении надёжности шифрования. Помимо того, он ориентирован на квантовый процессор на массивах нейтральных атомов и может служить для такого процессора тренировочным приложением, поскольку имеет возможность разбиения на части и вычисления итогового значения хэша посредством сложения этих частей, что упрощает использование алгоритма и приближает его к реальности.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Грант № 23-12-00067).

[1] IBM [Электронный ресурс]: hashing-functions. URL: <https://www.ibm.com/docs/en/netez/za?topic=set-hashing-functions> (дата обращения: 21.06.2025).

[2] Hirner F., Krieger F., Piber C., Roy S.S., *Cryptology ePrint Archive*, 2024/1918, (2024).

[3] IBM [Электронный ресурс]: quantum risk to traditional cryptographic hashing. URL: <https://learning.quantum.ibm.com/course/practical-introduction-to-quantum-safe-cryptography/cryptographic-hash-functions#quantum-risks-to-traditional-cryptographic-hashing> (дата обращения: 21.06.2025).

[4] Google Quantum AI, *Nature*, **595**, 383-387, (2021).

[5] Banerjee S., Meena H., Tripathy S., Panigrahi P.K., *arXiv:2408.03672*, (2024).

**КВАНТОВЫЕ КОГЕРЕНТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В МАТЕРИАЛЕ С СЕТЕВОЙ
ТОПОЛОГИЕЙ В РЕЖИМЕ СВЕРХСИЛЬНОЙ СВЯЗИ**

Захаренко П.В., Алоджанц А.П., Царёв Д.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

p.zaxarencko2015@yandex.ru

В работе исследуются эффекты случайной и сверхизлучающей лазерной генерации в двумерном материале со сложной сетевой структурой в режиме сверхсильной связи.

Ключевые слова: квантовые материалы, сложные сети, фазовые переходы.

Описание взаимодействия квантованного электромагнитного (ЭМ) поля с веществом представляет собой актуальную проблему квантовых технологий [1]. Современные квантовые технологии допускают сильную связь квантовой двухуровневой системы (ДУС) с модой ЭМ поля внутри атомных, полупроводниковых или сверхпроводниковых платформ, для которой параметр связи g превосходит скорости декогеренции и затухания поля, см. [2]. Можно ограничиться рассмотрением так называемого приближения вращающейся волны (ПВВ), которое предполагает пренебрежение антирезонансными (быстро осциллирующими) членами.

Решая задачу в ПВВ для лазероподобных систем, исследуем распространение ЭМ излучения в неупорядоченных материалах с сетевой структурой. При этом может наблюдаться андерсоновская локализация, в этом случае сетевой материал выступает как эффективный резонатор, а система свет-вещество может быть рассмотрена как лазер класса А (случайный) в отсутствие внешнего резонатора, см. [3]. С другой стороны, в пределе плохого резонатора может быть исследовано сверхизлучение, что соответствует лазеру класса D. В [4] показано, что в стационарном состоянии исчезающее число фотонов достаточно для установления макроскопической поляризации среды, вызывающей высвобождение квантового поля и приводящей к явлению сверхизлучательной генерации.

В исследовании решающее значение имеют свойства сети, определяющие как порог генерации, так и переход между случайным и сверхизлучающим режимами генерации. В работе рассматривается класс сетей, описываемых степенным распределением степеней (СРСУ) [5]. Ключевым параметром СРСУ сети является параметр средней степени узла $\langle k \rangle$, который указывает на среднее количество соединений, доступных произвольно выбранному узлу сети, а второй момент распределения степеней $\langle k^2 \rangle$ отвечает за наличие и размер хабов – узлов, чья степень $k_i \gg \langle k \rangle$.

В каждом узле сети размещена ДУС, которая может находиться в основном и возбужденном состоянии. ДУС взаимодействуют с ЭМ полем посредством массива волноводов, представляющих ребра графа. В работах [5] данная система исследовалась в приближении вращающейся волны. При этом использовался гамильтониан типа Дике, учитывающий многомодовый характер взаимодействия вещества и поля, однако быстро осциллирующие слагаемые отбрасывались. В данной работе подход был уточнен за пределами ПВВ, с помощью унитарных преобразований оригинального гамильтониана, см. подробнее [6].

Через подход Горини–Коссаковского–Сударшана–Линдблада были получены уравнения динамики амплитуд фотонного поля в узлах сети, поляризации ДУС и инверсии населенностей системы. Был определен фазовый сдвиг Блоха-Зигерта, а также параметр сетевой кооперативности. Были исследованы случайный и сверхизлучающий режимы лазера на основе сетевого материала, а также ключевые характеристики перехода из одного режима в другой. Исследование уравнений среднего поля типа Максвелла-Блоха показали, что накопленный фазовый сдвиг фотонного поля имеет комплексную структуру. При малом эффективном параметре связи свет-вещество полная фаза характеризуется нелинейным сдвигом Блоха-Зигерта, который можно усилить и настроить с помощью соответствующей сетевой архитектуры, описываемой средней степенью $\langle k \rangle$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания, номер проекта 23-22-00058.

- [1] Miller R. et al., *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **38**, №9, S551, (2005).
- [2] Frisk Kockum A. et al., *Nature Reviews Physics*, **1**, №1, 19-40, (2019).
- [3] Wiersma D.S., *Nature physics*, **4**, №5, 359-367, (2008).
- [4] Meiser D., Meystre P., *Physical Review A*, **74**, №6, 065801, (2006).
- [5] Alodjants A. et al., *Entropy*, **25**, №12, 1601, (2023).
- [6] Zacharenko P.V. et al., *Laser Physics Letters*, **21**, №11, 115203, (2024).

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА СВЕРХПЛОТНОГО КОДИРОВАНИЯ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРНЫЙ КАНАЛ

Тузиков Ф.Н.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ftuzikov@yandex.ru

В работе рассматривается новый подход к задаче сверхплотного кодирования в условиях атмосферной среды, основанный на применении методов нелинейной оптики для различения состояний Белла.

Ключевые слова: сверхплотное кодирование, состояние Белла, атмосфера.

Перспективы развития квантовых коммуникаций тесно связаны с технологиями атмосферной и спутниковой квантовой связи [1]. На данный момент уже существуют реализации квантового распределения ключей через атмосферу, а также сети на основе квантовой телепортации [2]. В литературе также можно найти пример атмосферного варианта сверхплотного кодирования [3]. Однако рассмотренный там подход не позволяет полноценно реализовать алгоритм по той причине, что предложенная измерительная установка опирается на методы линейной оптики, которые не позволяют провести полное белловское измерение [4]. Текущее исследование направлено на попытку решить эту проблему при помощи измерительной установки на основе фильтрующей процедуры [5]. Ключевым результатом настоящей работы является вывод аналитического выражения для вероятностного распределения результатов гомодинного детектирования системы сигнал-зонд. Установлено, что распределение соответствует структуре:

$$\mathcal{P}(\hat{x}_p = x; y) = \sum_k c_k \cdot \mathcal{N}\left(\mu_k(y), \frac{1}{2}\right), \quad (1)$$

где $\hat{x}_p = \hat{x}_p(\varphi = 0)$ – наблюдаемый оператор квадратурной компоненты; x – измеренное собственное значение $\hat{x}_p$; y – классический бит информации, определяющий группу, проходящую через фильтр; c_k – коэффициенты (веса); $\mathcal{N}\left(\mu_k(y), \frac{1}{2}\right)$ – нормальное распределение с параметрами $\mu = \mu_k(y)$ и $\sigma^2 = \frac{1}{2}$.

В исследовании показано, как соотношение (1) позволяет добиться того, что после гомодинирования передаваемое состояние с вероятностью c_k коллапсирует в компоненту, вблизи которой расположился результат измерения x . Это позволяет говорить о вероятностной модели передачи, в которой основную роль играют вероятности p_{cf} корректной работы фильтра и $p_{err} = 1 - p_{cf}$ – ошибочного срабатывания. Итогом работы служит вывод аналитических выражений для условных вероятностей обнаружения битов ab при передаче xu . Продемонстрировано, что для предложенного подхода эти вероятности группируются следующим образом: $p(xu|xu)$, $p(\bar{x}u|xu)$ и p_{err} (см. пример на рисунке), причем их значения не зависят от конкретных передаваемых пар битов.

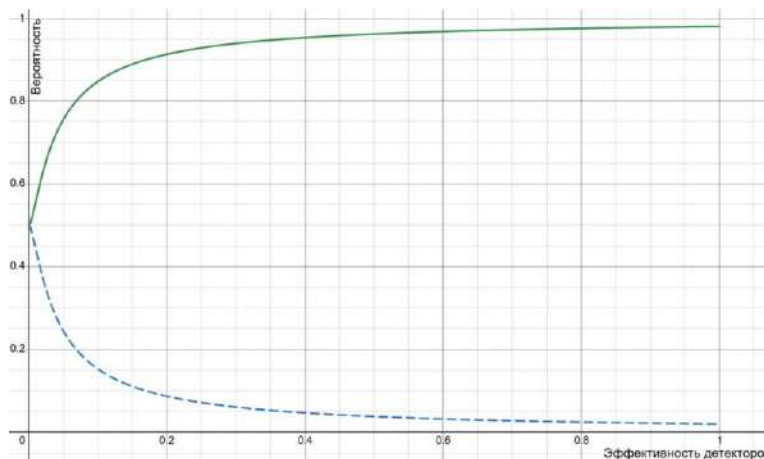


Рисунок. Зависимость $p(xu|xu)$ (зеленая кривая) и $p(\bar{x}u|xu)$ (синяя пунктирная кривая) от эффективности детекторов при уровне шумов $N = 0.01$ для случая $p_{err} = 0$

- [1] О развитии высокотехнологичного направления «Квантовые коммуникации» [Электронный ресурс] - Журнал «Интернет изнутри». URL: <https://ii.org.ru/o-razvitii-vysokotekhnologichnogo-napravleniya-kvantovye-kommunikaczii/> (дата обращения: 20.06.2025).
- [2] Graham T. et al., 2015 *IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, 1-7, (2015).
- [3] Yu P.I. et al., *Physics of Complex Systems*, **3**, №4, 186-201, (2022).
- [4] Grice W.P., *Physical Review A*, **84**, № 4, с. 042331, (2011).
- [5] Kozubov A.V. et al., *Scientific Reports*, **11**, №1, 14236, (2021).

КОНТРОЛЬ СТЕПЕНИ ЗАПУТАННОСТИ БИФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ ЗА СЧЕТ ЭФФЕКТА АНТИГРУППИРОВКИ

Гусельников М.С., Киселев А.Д., Гайдаш А.А.,
Мирошниченко Г.П., Козубов А.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

msguselnikov@itmo.ru

В работе продемонстрировано, что возможность наблюдения эффекта антигруппировки бифотонного состояния определяется степенью симметрии его спектра. Установлена функциональная связь между степенью симметрии и числом Шмидта K . Показано, что эффект антигруппировки чувствителен к изменению степени запутанности при $K < 10$.

Ключевые слова: эффект антигруппировки, квантовая запутанность, квантовый оптический гироскоп.

Теоретически предсказанная [1] и экспериментально продемонстрированная [2] зависимость вероятности двухфотонных совпадений от степени квантовой запутанности состояния при его интерференции на светоделителе представляет собой перспективную основу для создания альтернативных измерениям Белла методов контроля степени запутанности и разработки квантовых оптических гироскопов. Практическое использование этого феномена требует как функционального, так и количественного описания корреляций между степенью запутанности и вероятностью двухфотонных совпадений. Решению этой задачи посвящена данная работа.

В настоящей работе рассматривается бифотонное состояние, сгенерированное в процессе спонтанного параметрического рассеяния (СПР) и распространяющееся в интерферометре Саньяка. При попадании на выходной светоделитель интерферометра состояние имеет вид:

$$|\psi\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega_1 d\omega_2 \psi(\omega_1, \omega_2) a_1^\dagger(\omega_1) a_2^\dagger(\omega_2) |0\rangle_1 \otimes |0\rangle_2, \quad (1)$$

где $\psi(\omega_1, \omega_2)$ – бифотонный спектр, $a_{1,2}^\dagger(\omega_{1,2})$ – оператор рождения первой (второй) пространственной моды; $|0\rangle_{1,2}$ – вакуумное состояние первой (второй) пространственной моды. Результат интерференции такого состояния на светоделителе определяется степенью симметрии D_S бифотонного спектра

$$D_S = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega_1 d\omega_2 [|\psi_S(\omega_1, \omega_2)|^2 - |\psi_{AS}(\omega_1, \omega_2)|^2], \quad (2)$$

где $\psi_{S,AS}(\omega_1, \omega_2)$ – симметричная (антисимметричная) часть бифотонной спектральной функции. Эффект антигруппировки (т.е., когда вероятность двухфотонных совпадений превышает 50%) наблюдается только при $D_S < 0$. В то же время бифотонный спектр СПР-состояния, который можно представить в виде

$$\psi(\omega_1, \omega_2) = N \varphi_1(\omega_1) \varphi_2(\omega_2) \exp\left\{-\frac{(\omega_1 + \omega_2 - 2\Omega)^2}{2\sigma_p^2}\right\}, \quad (3)$$

не может быть антисимметричным. Здесь N – нормировочная константа, $\varphi_{1,2}$ – некоторые функции; Ω – центральная частота источника накачки СПР-пары, σ_p – полуширина источника накачки. Тем не менее эта функция может обладать отрицательной степенью симметрии при одновременном выполнении двух условий: (1) наличие запутанности ($\sigma_p \rightarrow 0$) и (2) наличие скрытой антисимметрии, т.е. $\varphi_1(\omega) \varphi_2(-\omega + 2\Omega) = -\varphi_1(-\omega + 2\Omega) \varphi_2(\omega)$. Последнее условие удовлетворяется, в частности, в случае, когда φ_1 представляет собой гауссиан, центрированный на частоте Ω с полушириной σ_1 , а φ_2 – такой же гауссиан с полушириной σ_2 , но умноженный на $\cos \beta\omega$ при $\beta = \pi(2n + 1)/2\Omega$, где n – целое число. Степень запутанности такого состояния удобно охарактеризовать числом Шмидта K , которое можно вычислить либо с помощью численного расчета собственных значений матрицы плотности в фоковском базисе гаусс-эрмитовых состояний, либо с помощью приближенной формулы, которая получается в первом порядке теории возмущений после применения некоторой эвристической процедуры

$$K = K_0 (1 + \exp\{-\beta^2 \alpha\})^2 / (1 + 2R + R^2 I_0(4\eta^2 z^2)), \quad (4)$$

где K_0 – невозмущенное число Шмидта, I_0 – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка, α, η, z, R – некоторые функции параметров $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_p, \beta, \Omega$. Расчеты, проведенные для типичных параметров бифотонного спектра, показали, что зависимость $K(\beta)$ имеет максимум (минимум) в точках, где $D_S(\beta)$ отрицательна (положительна) и максимальна по модулю. Корреляции между $K(\beta)$ и $D_S(\beta)$ позволяют разрешать относительный набег фазы между фотонами порядка 1 нм. При этом чувствительность вероятности двухфотонных совпадений к изменению степени запутанности ограничивается значениями $K < 10$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда поддержки молодых ученых имени Геннадия Комиссарова.

[1] Wang K., *J. Phys. B*, **39**, R293, (2006).

[2] Cromb M., *Phys. Rev. Research*, **5**, L022005, (2023).

ЭФФЕКТЫ АСИММЕТРИИ В СХЕМАХ ГОМОДИННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Наумчик А.С., Гончаров Р.К., Киселев А.Д.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

naumchik95@gmail.com

В работе рассматриваются эффекты, возникающие в асимметричных схемах гомодинного и двойного гомодинного детектирования. Асимметрия характеризуется разбалансировкой светоделителей и неравной квантовой эффективностью детектирования. Вычислена положительная операторнозначная вероятностная мера для указанных схем.

Ключевые слова: гомодинирование, положительная операторнозначная вероятностная мера.

Квантовые измерения в общем случае описываются положительной операторнозначной вероятностной мерой (ПОВМ) [1]. Особое значение имеют гауссовы измерения, широко применяемые в системах с непрерывными переменными и протоколах квантовых коммуникаций, таких как квантовое распределение ключей, телепортация квантовых состояний и квантовые повторители. Частными случаями гауссовых измерений являются гомодинирование и двойное гомодинирование (гетеродинирование). Поскольку в реальных экспериментальных схемах всегда существуют погрешности и потери, возникает необходимость теоретического описания неидеальных измерений.

Рассматриваемые параметры асимметрии включают в себя влияние разбалансировки светоделителя $\delta\theta = \frac{\pi}{4} - \theta$, где $\cos \theta$ – амплитудное пропускание светоделителя, и неодинаковой квантовой эффективности. Из точной формулы вероятности фотоотчетов [2] в приближении сильного локального осциллятора [3] для асимметричной схемы гомодинирования и двойного гомодинирования было аналитически получено гауссово приближение распределения Пуассона. Показана зависимость моментов гауссова приближения от параметров асимметрии. Для оценки точности приближения вводится статистическое расстояние между точным и приближенным распределениями. Для схемы гомодинирования рассматривается зависимость статистического расстояния от амплитуд сигнала и локального осциллятора (рис. 1) и от параметров асимметрии (рис. 2).

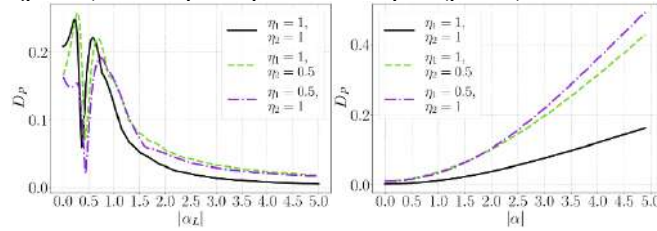


Рис. 1. Зависимости статистического расстояния D_P от амплитуды локального осциллятора $|\alpha_L|$ при фиксированной амплитуде когерентного сигнала $|\alpha| = 0.1$ (слева) и от амплитуды сигнала $|\alpha|$ при фиксированной амплитуде локального осциллятора $|\alpha_L| = 5$ (справа) для различных эффективностей детектирования η_1 и η_2 (в легенде) и балансного светоделителя

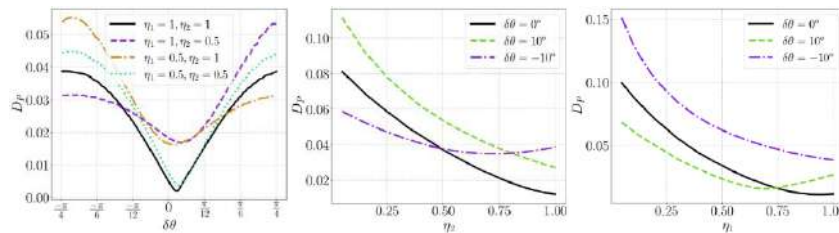


Рис. 2. Зависимости статистического расстояния D_P от параметра дисбаланса светоделителя $\delta\theta$ для различных эффективностей детектирования (слева) и от эффективности детектирования для различных параметров дисбаланса светоделителя (посередине, справа) при $|\alpha| = 0.1$ и $|\alpha_L| = 5$

На основе гауссова приближения была вычислена ПОВМ, которая является хорошо определенной для всех значений параметров асимметрии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-11-00398).

[1] Serafini A., CRC press, (2024).

[2] Kelley P.L., Kleiner W.H., Phys. Rev., **136**, №2A, A316, (1964).

[3] Vogel W., Grabow J., Phys. Rev. A, **47**, №5, 4227, (1993).

КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ И ИХ РОЛЬ В РАЗВИТИИ СОВРЕМЕННОЙ СЕНСОРИКИ

Синельников А.О.^{1,2}, Кузнецов П.С.², Кузнецова А.А.¹

¹Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

²ГосНИИП, Москва, Россия

aniakuzneczova@yandex.ru

Развитие технологий создания квантовых точек и возможности их применения в электронике дало толчок к появлению новых видов сенсоров и усовершенствованию существующих. Благодаря этому стало возможно создание микроминиатюрных гироскопов.

Ключевые слова: квантовые точки, микроминиатюрные сенсоры, фотоника.

За последнее десятилетие развитие технологий создания квантовых точек привело к значительным изменениям в области электроники. Квантовые точки представляют собой полупроводниковые наноструктуры размером от нескольких нанометров до десятков нанометров.

На современном этапе развития технологий одним из наиболее перспективных направлений является нанонаука, которая фокусируется на изучении наночастиц и наноструктур. Технологии наноструктурирования играют ключевую роль в различных областях, включая опто- и наноэлектронику, хранение информации, а также при управлении структурными и оптическими свойствами материалов [1]. Квантовые точки представляют из себя изолированные наномасштабные объекты (нанокристаллы) полупроводниковых материалов, чьи размеры находятся в диапазоне от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров, обладающие уникальными оптическими и электрическими свойствами [2]. Эти свойства обусловлены эффектом размерного квантования, который проявляется при уменьшении размеров материала до уровня, сопоставимого с длиной волны электронов, и они существенно отличаются от свойств объемных материалов той же структуры и состава.

Механизм действия большинства полупроводниковых устройств и приборов основан на регулировании потока электронов. Нынешние технологии позволяют создавать транзисторы размером в несколько мкм, которые управляют движением "потока", содержащего от сотен тысяч до миллиона электронов. Благодаря своей способности эффективно поглощать и излучать свет в различных спектральных диапазонах, квантовые точки нашли широкое применение в сенсорике и фотонике. Их использование позволяет создавать датчики и устройства, способные детектировать даже самые слабые сигналы.

Одним из наиболее перспективных направлений является разработка микроминиатюрных сенсоров на основе квантовых точек. Такие сенсоры обладают высокой чувствительностью и быстродействием, что делает их идеальными для применения в медицине, экологии и промышленности. Например, квантовые точки используются в биосенсорах для диагностики заболеваний, в датчиках газа для мониторинга окружающей среды и в фотодетекторах для телекоммуникаций [3].

Еще одним важным направлением развития является создание микроминиатюрных кольцевых и волоконных гироскопов. Эти устройства основаны на эффекте Саньяка, который заключается в разнице фаз между двумя лучами света, распространяющимися в противоположных направлениях вокруг кольца [4]. Использование квантовых точек в таких устройствах позволяет значительно повысить точность измерений и уменьшить размеры приборов.

Кроме того, активное внедрение микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС) открывает новые возможности для создания компактных и надежных датчиков. МОЭМС объединяет элементы микрооптической, электронной и механической систем на одном чипе, что обеспечивает высокую интеграцию функций и снижает энергопотребление устройств [2, 5].

Таким образом, развитие технологий создания квантовых точек и их применение в электронике стимулировало появление новых видов сенсоров и усовершенствование существующих. Это позволило создать микроминиатюрные кольцевые и волоконные гироскопы, а также датчики с использованием микрооптоэлектромеханических систем. Данные достижения открывают широкие перспективы для дальнейшего прогресса в области сенсорики и фотоники, способствуя развитию инновационной техники.

[1] Завестовская И.Н., *Квантовая электроника*, **40**, №11, 942-954, (2010).

[2] Кузнецов П.С., *Russian Technological Journal*, **13**(3), 103-121, (2025).

[3] Сигов А.С., *Наноэлектроника: Учебник / А.С. Сигов, А.А. Щука. – 1-е изд. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 297 с.*

[4] Петров Б.М., *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*, №5, 13-21, (2009).

[5] Shtek S.G., Zheglov M.A., Belyakov V.V., Andreasyan O.G., Vasetskiy S.O., Kuznetsov P.S., *In: 2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, (2023).

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Дрызгов М.А.¹, Хрипач Н.М.², Скрыбин Н.Н.¹, Дьяконов И.В.^{1,3},
Корнеев А.А.^{1,2}, Страупе С.С.^{1,3}, Кулик С.П.^{1,4}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Москва, Россия

³Российский квантовый центр, Сколково, Россия

⁴ЮУрГУ, лаборатория квантовой обработки информации и квантовых вычислений, г. Челябинск, Россия

dryazgovm@gmail.com

В работе предлагается схема универсального интегрального интерферометра 4x4, основанного на кольцевых резонаторах. Перестраиваемый кольцевой резонатор является аналогом одного перестраиваемого интерферометра Маха-Цендера. Такая замена позволит уменьшить фактический объём фотонного чипа.

Ключевые слова: интегральная фотоника, кольцевой резонатор, универсальный интерферометр.

Интегральные универсальные интерферометры являются основным компонентом квантовых вычислений с использованием фотонов [1]. С каждым годом возрастает как сложность выполняемых операций, так и количество используемых оптических мод [2]. Одним из направлений исследований в области универсальности и миниатюризации интегральных интерферометров является использование интегральных кольцевых резонаторов [3]. В данной работе описывается универсальный оптический чип размера 4x4, где в качестве интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ) выступает кольцевой резонатор.

Интегральный кольцевой резонатор с двумя волноводами показан на рисунке (а). В результате моделирования был получен спектр резонатора вблизи одной из своих резонансных длин волн λ_{res} , как показано на рисунке (б). Здесь 1_{in} и 1_{out} обозначают входной и выходной канал излучения, соответственно. При наличии нагревателя становится возможным управление значением λ_{res} , что для фиксированной длины волны эквивалентно управлением коэффициентом отражения/пропускания ИМЦ (на рисунке (б) стрелками показаны эквивалентные матрицы). Данный подход уменьшает требование к добротности изготовленного кольцевого резонатора и уменьшает фактический объём интерферометра, что уменьшает потери излучения на распространение.

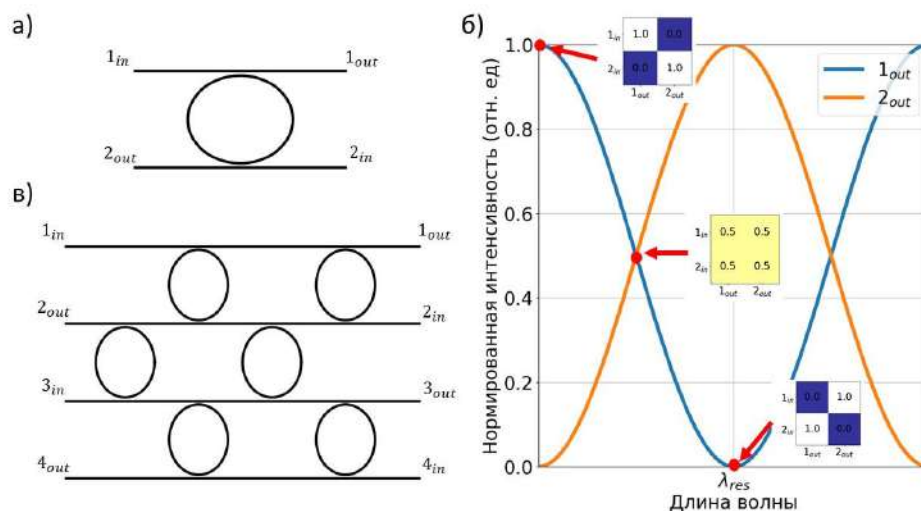


Рисунок. (а) Схематичное изображение кольцевого резонатора с двумя волноводами с отмеченными входными и выходными каналами; (б) Зависимость нормированной интенсивности на выходах интегрального кольцевого резонатора с двумя волноводами, точками обозначены эквивалентные матрицы ИМЦ 2x2; (в) Предлагаемая структура универсального интерферометра 4x4

На рисунке (в) показана предлагаемая структура универсального интерферометра 4x4 на основе кольцевых резонаторов. Общее количество эквивалентных ИМЦ не уменьшается, но за счёт компактности кольцевых резонаторов, возможно добиться меньшего объёма фотонного чипа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 22-12-00353-П).

[1] Albiero R., Di Giano N., Pentangelo C. et al., *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXVIII*, **12889**, 82 (2024).

[2] Taballione C., Anguita M.C., de Goede M. et al., *Quantum*, **7**, 1071, (2023).

[3] Dai T., Ma A., Mao J. et al., *Nature Materials*, **23**, 7, 928-936, (2024).

**МОМЕНТЫ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ
И СУБПУАССОНОВСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРНОМ КАНАЛЕ**
Степанов И.Г.¹, Гончаров Р.К.^{1,2}, Киселев А.Д.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²СМАРТС-Кванттелеком, Санкт-Петербург, Россия

i.stepanov@itmo.ru

Данная работа посвящена оценке моментов коэффициента пропускания в атмосферном канале с целью определения условий сохранения субпуассоновского характера излучения. Расчеты выполнены для гауссовых пучков, распространяющихся в слаботурбулентной атмосфере.

Ключевые слова: атмосферные оптические линии связи, субпуассоновское излучение.

Анализ атмосферных оптических линий связи (АОЛС) имеет важное значение для проектирования надежных систем передачи информации. Эффекты, оказываемые на оптический сигнал при прохождении атмосферного канала, влияют на эффективность системы связи, а также на криптографическую стойкость квантового распределения ключей.

В работе рассматривается прохождение одномодового субпуассоновского света через атмосферный канал с учетом как флуктуаций коэффициента пропускания, так и влияния температуры. Условие сохранения неклассических свойств такого излучения, помимо характеристик квантового состояния фотонов, определяется статистическими моментами коэффициента пропускания [1]. В свою очередь, моменты коэффициента пропускания зависят от физических характеристик канала: длины, структурной постоянной коэффициента преломления, метеорологической дальности видимости. Оценка моментов коэффициента пропускания для различных условий производится в рамках фазового приближения [2]. Рассматривается модель гауссова пучка для случая слабой турбулентности, подробно описанная в книге [3]. В качестве входных состояний выбраны оптические каты Шрёдингера и сжатые состояния света.

В результате исследования получены численные результаты, характеризующие влияние физических характеристик канала и температуры на параметр Мандела квантового света, приготовленного в состоянии с субпуассоновской статистикой фотонов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (Проект № 24-29-00786).

[1] Stepanov I.G., Goncharov R.K., and Kiselev A.D., *arXiv preprint arXiv:2502.09552*, (2025).

[2] Banakh V.A., and Mironov V.L., *Optics Letters*, **4**, 259-261, (1979).

[3] Andrews L.C., and Phillips R.L., *Laser Beam Propagation Through Random Media: Second Edition*, (2005).

**РАСЧЕТ ОПТИКИ ДЛЯ РАБОТЫ КВАНТОВОГО КАНАЛА СИСТЕМЫ
АТМОСФЕРНОГО КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ
В ДНЕВНОЕ ВРЕМЯ**

Вахрушева В.М.^{1,2}, Климов А.Н.¹

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²ООО «СФБ Лаб», Москва, Россия

vmvakhrusheva@gmail.com

Данная работа посвящена разработке оптических устройств систем атмосферного квантового распределения ключей, работающих на приземных горизонтальных трассах в условиях городской среды в дневное время.

Ключевые слова: атмосферное квантовое распределение ключей.

Особенность работы систем атмосферного квантового распределению ключей (АКРК) в дневное время заключается в присутствии фоновой засветки, источником которой является рассеянное атмосферой и отраженное различными поверхностями солнечное излучение. Следовательно, при разработке системы АКРК необходимо учитывать не только потери сигнала в оптическом канале, но и отношение величины полезного сигнала к уровню излучения засветки, приходящего на однофотонный детектор, то есть отношение сигнал/шум (SNR). Критерием качества работы систем КРК служит величина ошибок в просеянном ключе (QBER), рабочее значение которой составляет несколько процентов, что для протокола BB84 соответствует SNR, равному 30-50.

В силу однофотонного характера полезного квантового сигнала SNR не может быть увеличен за счет повышения его интенсивности, поэтому основными задачами при проектировании оптических систем АКРК являются, с одной стороны, уменьшение потерь полезного сигнала, а с другой – ограничение излучения засветки с помощью спектральной, пространственной и временной фильтрации. Разрабатываемая система представляет собой два оптических блока, подключенных к волоконным частям передающей и приемной систем КРК. Основными источниками потерь, помимо вносимых атмосферой, являются апертурные потери, потери на оптических компонентах и при заведении излучения в приемное волокно. Таким образом, пространственные параметры оптической системы, такие как диаметр входной апертуры и угловое поле, должны выбираться исходя из условия максимизации SNR.

В результате проектирования был создан лабораторный макет системы АКРК. Целью при разработке оптической системы передатчика являлось достижение оптимальных характеристик выходного гауссова пучка. При этом учитывалось влияние на расходимость пучка дифракции на оптических компонентах, величина которой зависит от отношения радиусов апертуры и пучка [1]. При распространении пучка в атмосфере он испытывает дополнительное уширение из-за турбулентности [2]. Следовательно, при расчете апертурных потерь в приемной системе была проведена оценка размера пучка в плоскости приемной апертуры. Угловое поле приемной системы должно быть достаточным для приема полезного сигнала без дополнительных потерь, однако, в то же время, оно должно ограничивать прием фоновой засветки [3]. Оценка итогового SNR проводилась в зависимости от метеорологической дальности видимости (МДВ/MOR), учитывающей влияние погодных условий, и от дальности атмосферного канала при различной величине углового поля приемной системы. При этом была учтена работа системы трекинга, позволяющей удерживать изображение пучка в заданном положении.

В работе также приводится сравнение расчетных и экспериментальных параметров оптических систем лабораторного макета системы АКРК.

[1] Horvath Z.L., Bor Z., *Opt. Commun.*, **222**, 51-68, (2003).

[2] Andrews L.C., Beason M., *SPIE Press*, **422**, (2023).

[3] Farrell T.C., *Proc. SPIE*, **10641**, 106410L-106410O, (2018).

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БАЛАНСНОГО ДЕТЕКТОРА

Шишков А.В., Наседкин Б.А., Филипов И.М., Чистяков В.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

andrey.shishkov.00@bk.ru

Представлены методы измерений основных параметров балансного детектора, апробированные на схеме собственной разработки: коэффициент подавления синфазного сигнала (CMRR), отношение вакуумного шума к электронному (QCNr) и эквивалентная мощность шума (NEP).

Ключевые слова: квантовая криптография, балансный детектор.

Квантовое распределение ключа (КРК) является перспективным методом обеспечения безопасной передачи информации, основанным на фундаментальных законах физики. Существуют две основные схемы реализации КРК: на дискретных переменных [1] и на непрерывных переменных [2]. Одним из отличий между ними является метод определения квантовых состояний. В системах на дискретных используются однофотонные детекторы, характеризующиеся высокой стоимостью и требующие охлаждения. В системах на непрерывных переменных применяются балансные детекторы, использующие когерентное излучение локального осциллятора (ЛО) для усиления принимаемого сигнала. Производительность систем КРК НП напрямую зависит от характеристик балансного детектора. В частности, важны такие параметры, как линейность отклика, коэффициент подавления синфазного сигнала (CMRR), полоса пропускания, отношение вакуумного шума к электронному (QCNr) и эквивалентная мощность шума (NEP) [3-5]. Для каждой из этих характеристик приведена схема и методы расчета.

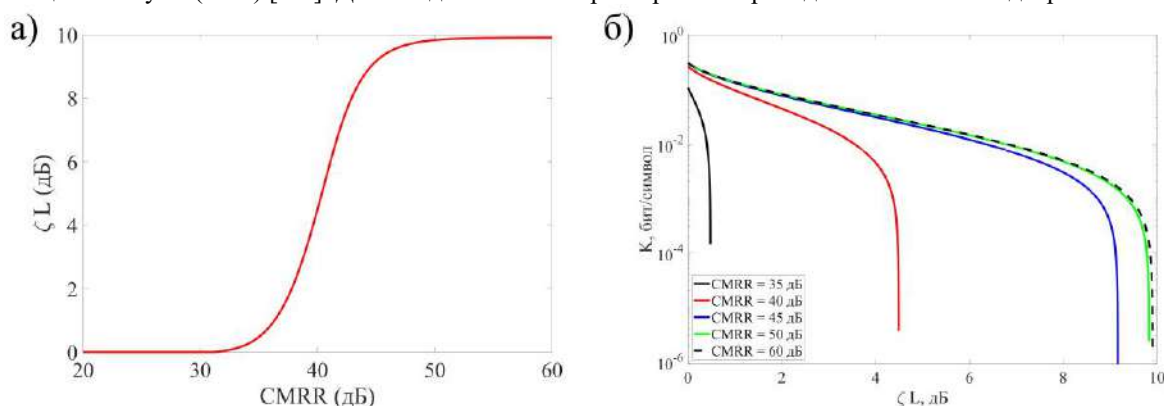


Рисунок. а) Зависимость максимальных потерь в канале от CMRR б) зависимость количества бит на символ от потерь для различных значений CMRR

В работе представлены результаты измерений параметров балансного детектора собственной разработки: мощность насыщения - 2,2мВт; коэффициент подавления синфазного сигнала - 46,5дБ; отношение вакуумного шума к электронному - 10дБ при входной оптической мощности 19мВт; полоса пропускания - 50МГц, эквивалентная мощность шума - 16,6 пВт/Гц^{1/2} (рисунок). С использованием этих параметров проведено моделирование работы детектора в системе КРК НП, на основе модели, представленной в [6]. Были получены зависимости скорости и дальности распределения ключа от CMRR и NEP балансного детектора. В результате установлено, что при использовании детектора собственной разработки возможно распределение ключа на дальность 50 км.

- [1] Xu F., Ma X., Zhang Q., et al., *Rev. Mod. Phys.*, **92**, 025002, (2020).
- [2] Zhang Y., Bian Y., Li Z., et al, *Appl. Phys. Rev.*, **11**, 011318, (2024).
- [3] Masalov A.V.; Kuzhamuratov A.; Lvovsky A.I., *Rev. Sci. Instrum*, **88**, №11, 113109, (2017).
- [4] Lu Q.; Shen Q.; Cao Y., et. al., *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **66**, №7, 1048-1055, (2019).
- [5] Zhang X., Zhang Y., Li Z., et al., *IEEE Photonics Journal*, **10**, №5, 6803810, (2018).
- [6] Laudenbach F., Pacher C., Fred Fung Chi-H. et al., *Adv. Quant. Tech*, **1**, №1, 1800011, (2018).

АНАЛИЗ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ОПТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ

Анпилов В.С.^{1,3}, Шайдуллин Р.И.^{1,2}, Тезадов Я.А.³, Голубев М.А.³

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Долгопрудный, Россия

²ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия

³ООО «ВПГ Лазеруан», г. Фрязино, Россия
anpilov_vova@mail.ru

Настоящая работа посвящена изучению влияния нелинейных эффектов на шумовых характеристики оптического сигнала при распространении по оптическому волокну.

Ключевые слова: нелинейный шум, аналитическая модель.

Сложно представить современный мир без доступа в Интернет, мобильной связи и цифрового телевидения. Мы живем в информационном веке, где количество информации увеличивается вдвое каждые три года, поэтому для увеличения объема передаваемого трафика по волоконно-оптическим линиями связи (ВОЛС) было предложено два метода. Во-первых, появилась технология DWDM сетей, позволяющая объединять множество каналов с разными длинами волн в одном передающем волокне, что привело к усилению взаимодействия различных спектральных составляющих компонент друг с другом [1]. Во-вторых, применение эрбиевых волоконных усилителей позволило значительно увеличить уровень мощности сигнала и построить мировую сеть передачи информации. Однако представленные ранее методы имели свою область применения ввиду влияния нелинейных эффектов на передаваемый сигнал путем формирования оптического «нелинейного» шума (НШ).

Так как в научной литературе присутствовали лишь довольно объемные аналитические решения нелинейного распространения сигнала по волокну, то ученые из университета Торонто решили создать теорию [2], описывающую влияние нелинейных эффектов, основанных на эффекте Керра, на шумовые характеристики сигнала. Авторам удалось связать мощность НШ с параметрами волокна, расстоянием передачи сигнала и оптической мощностью, вводимой в линию. Однако недостаточно подробно была описана область применения вышеизложенной аналитической модели и точность предсказания экспериментальных результатов.

Настоящая работа посвящена проведению анализа аналитической модели НШ на основе экспериментальных результатов тестирования ВОЛС протяженностью 3000 км и передачей оптического сигнала со скоростью 100 Гбит/с. Вычисление мощности НШ проводилось для C59 канала, который выделен синей областью (рисунок а). На рисунке б представлены линейные зависимости мощности НШ от протяженности ВОЛС, которые демонстрируют расхождение экспериментальных и теоретических значений в пределах 15%. Данное расхождение приводит к значительной погрешности в определении параметра SNR:

$$SNR = \frac{1}{\frac{1}{OSNR_{тр}} + \frac{P_{лш}}{P_{вх}} + \frac{P_{нш}}{P_{вх}}}, \quad (1)$$

здесь $OSNR_{тр}$ – параметр качества сигнала на выходе транспондера, $P_{вх}$ – вводимая в пролет мощность, $P_{лш}$ и $P_{нш}$ – мощности линейного и нелинейного шумов, соответственно.

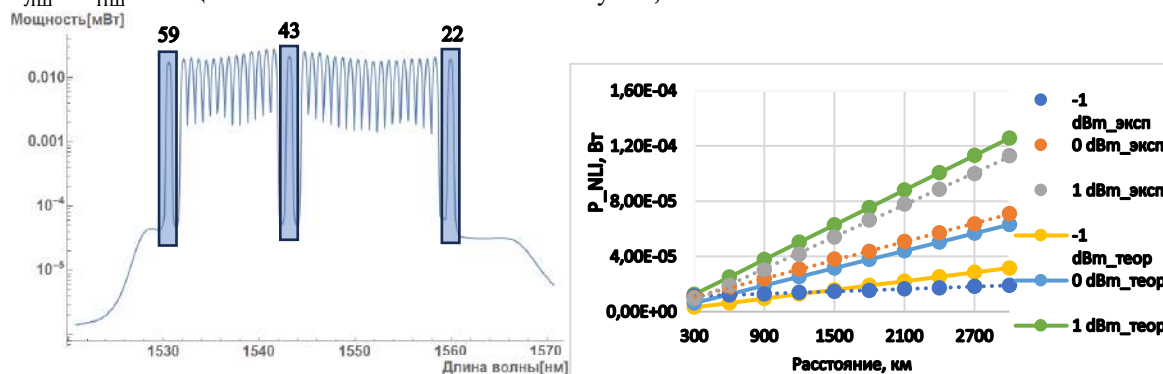


Рисунок. а) Спектральная зависимость мощности N-канальной системы, вводимой в ВОЛС.
б) Экспериментальная и теоретическая зависимости мощности НШ от расстояния

[1] Winzer P.J., *Optics express*, **26**, №18, 24190-24239, (2018).

[2] Poggiolini P., *IEEE Photonics technology letters*, **23**, №11, 742-744, (2011).

**ДИНАМИКА ЛОКАЛИЗОВАННОГО АТОМНОГО АНСАМБЛЯ
В ПОЛЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО СЖАТОГО СВЕТА**

Трубилко А.И.¹, Башаров А.М.²

¹Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия
trubilko.andrey@gmail.com

Получено кинетическое уравнение, описывающее динамику атомного локализованного ансамбля в поле широкополосного сжатого света с учетом эффектов второго порядка по константе взаимодействия атомов с полем (штарковского взаимодействия).

Ключевые слова: сжатый свет, кинетическое уравнение, атомный ансамбль.

В работе получено кинетическое уравнение, описывающее динамику атомного локализованного ансамбля в поле широкополосного сжатого света с учетом эффектов второго порядка по константе взаимодействия атомов с полем (штарковского взаимодействия). При традиционном выводе кинетического уравнения для открытой системы эффекты подобного рода обычно игнорируются [1, 2]. Заметим, однако, что эффекты подобного рода имеют тот же порядок по константе взаимодействия системы с термостатом, что приводимое уравнение. Поэтому изначальные основания для пренебрежения Штарк-эффектами при выводе названного уравнения отсутствуют. В этой работе мы представляем кинетическое уравнение для локализованного атомного ансамбля, управляемое наряду с порождающим и уничтожающим процессами, также и квантовым считывающим процессом. Для этого оператор штарковского взаимодействия системы с широкополосным квантованным электромагнитным полем с ненулевой плотностью фотонов представлен через квантовый считающий процесс на этапе формирования указанного электромагнитного поля. Приведенное уравнение отличается от известных, но согласуется с ними в частных и предельных случаях. Штарковское взаимодействие проявляется в изменении формы импульса сверхизлучения атомного ансамбля в состоянии Дике, изменении значений релаксационных констант отдельного атома, дополнительных сдвигах энергетических уровней атома.

[1] Gardiner C.W., *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 1917-1920, (1986).

[2] Agarwal G.S., Puri R.R., *Phys. Rev. A*, **41**, 3782-3791, (1990).

ВЛИЯНИЕ КЛАССИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ НА КВАНТОВЫЙ, ПРИ ОДНОВРЕМЕННОЙ ПЕРЕДАЧЕ В МНОГОСЕРДЦЕВИННОМ ВОЛОКНЕ

Тимошенко А.С., Колесников О.В.

МТУСИ, Москва, Россия

a.s.timoshenko@mtuci.ru

Представлены результаты исследования перекрёстных помех при совместной передаче квантовых и классических сигналов в МСВ. Поучены зависимости QBER и длины ключа от мощности классического канала.

Ключевые слова: квантовая связь, многосердцевинное волокно, перекрёстные помехи.

Современные телекоммуникационные системы всё чаще сталкиваются с необходимостью интеграции квантовых технологий в существующую инфраструктуру. Одним из наиболее перспективных решений считается использование многосердцевинных волокон (МСВ), позволяющих параллельно передавать классические и квантовые сигналы по разным сердцевинам [1]. Однако близкое расположение каналов в структуре оптического волокна приводит к перекрёстным помехам, особенно критичным в контексте квантовой криптографии, где даже незначительные шумы могут значительно снизить надёжность системы. Цель настоящей работы — экспериментально оценить уровень перекрёстных помех между квантовыми и классическими каналами, а также предложить подходы к их минимизации. Исследование основано на двух независимых экспериментах, проведённых на лабораторной установке, моделирующей одновременную работу классического и квантового каналов в МСВ.

Во время эксперимента, аналогично [1], в одну из сердцевин МСВ подавался непрерывный оптический сигнал фиксированной мощности, а с других сердцевин помощью детектора одиночных фотонов осуществлялась регистрация фотонов. Даже при низкой средней мощности сигнала 0,1 мВт — в соседних сердцевинах фиксировались срабатывания детекторов. Это говорит о том, что в соседние сердцевинки проникают фотоны, вызывая перекрёстные помехи. Когда мощность сигнала в классическом канале увеличивалась до 1,5 мВт, наблюдалось устойчивое ухудшение качества квантовой связи, которая осуществлялась в другой сердцевине: процент ошибок по битам (QBER) увеличивался с начальных 1–3,4% до 7,6%. При этом длина просеянного квантового ключа уменьшалась — с 2300–6800 бит до 1500–2700 бит. На рисунке показаны зависимости QBER в квантовом канале связи, реализованном в центральной сердцевине МСВ от мощности лазерного излучения (с длиной волны 1550 нм) вводимой в соседние сердцевинки. Следует заметить, аналогичная зависимость наблюдалась при вводе классического излучения с длиной волны 1310 нм.

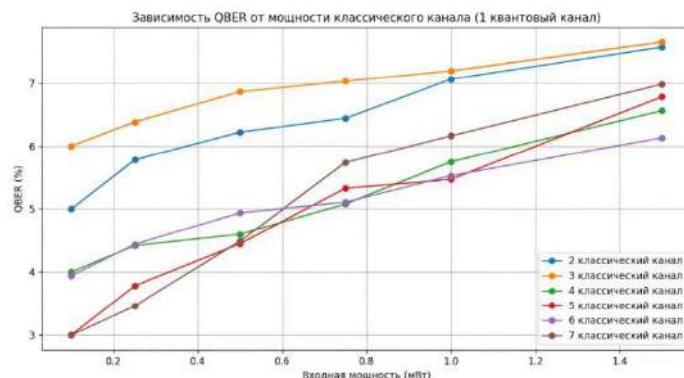


Рисунок. График зависимости QBER от мощности классического канала, при подаче его на 1 сердцевину

Эксперименты показали, что при одновременной передаче квантовых и классических сигналов в многосердцевинном оптическом волокне возникает устойчивое перекрёстное влияние между сердцевинами, при увеличении мощности классического сигнала увеличивается QBER при сокращении длины просеянного ключа. Эти эффекты наблюдаются при разных длинах волн (1310 и 1550 нм), что указывает на системный характер проблемы. Одной из возможных причин наблюдаемого перекрёстного влияния может являться несовершенство сопряжения многосердцевинного волокна с одномодовыми волокнами, что требует дополнительной проверки. Результаты исследований указывают на необходимость улучшения изоляции между сердцевинами и разработки методов компенсации перекрёстных помех для обеспечения надёжной и качественной передачи данных.

[1] Егорова О., Ерохин К., Журавлев С., Зайцев А., Казанцев С., Колесников О., Миронов Ю., Семенов С., Шульга М., *Первая миля*, 8(108), 44-51, (2022).

**НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ БЛОХОВСКИХ ВОЛН
В ОДНОМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ**

**Семусhev К.В.¹, Мункуева Ж.Э.², Достовалов А.В.²,
Бабин С.А.², Маслова Е.Э.¹, Рыбин М.В.¹**

¹Университет ИТМО, Физико-технический мегафакультет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

kliment.semushev@metalab.ifmo.ru

В работе исследуется влияние принципа неопределенности на формирование волновых состояний в периодических диэлектрических структурах. На примере фотонных кристаллов и брэгговских решеток показано, как ограничение размеров и связанная с ним неопределенность волнового вектора определяют устойчивость блоховских волн и формирование запрещенных зон. Предложены два подхода к моделированию супер-периодических сред, позволяющие связать конечный размер областей периодичности с их зонной структурой. Методом матриц переноса рассчитаны спектры отражения, подтверждающие аналитическую модель. Особое внимание уделено системам с низким контрастом диэлектрической проницаемости, где доминирующую роль играет неопределенность импульса, приводящая к узким запрещенным зонам и их пересечению. Результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными, подчеркивая значимость контроля пространственной локализации в фотонных устройствах для квантовых и сенсорных технологий.

Ключевые слова: блоховские волны, принцип неопределенности, локализация состояний.

В оптике выделяют множество явлений, отражающих квантовую природу света. Среди них — топологические фотонные состояния [1], поверхностные плазмон-поляритоны [2] и андерсоновская локализация [3]. Кроме того, любое волновое состояние характеризуется определенной длиной возбуждения или локализации, что особенно важно для возбуждения в малых структурах. Однако пространственное ограничение приводит к неопределенности импульса в соответствии с принципом неопределенности, что может привести к дестабилизации волнового состояния. Взаимодействие между пространственным ограничением и неопределенностью импульса накладывает ограничения на производительность устройств малого размера. Понимание и контроль этого баланса крайне важны для оптимизации систем, используемых в квантовой обработке информации [4], оптическом зондировании [5] и других приложениях [6].

Чтобы продемонстрировать влияние принципа неопределенности на формирование волновых состояний, мы исследуем образование блоховских волн. Мы предлагаем два подхода к определению супер-периодической диэлектрической решетки, соответствующие структурам, широко используемым в таких фотонных устройствах как фотонные кристаллы и брэгговские волоконные решетки. Наше исследование связывает конечный размер областей периодичности с длиной формирования блоховских волн путем анализа формирования запрещенных зон, что подтверждается как численным моделированием, так и экспериментальными данными.

Разработанная теоретическая модель позволяет детально проанализировать зонную диаграмму. Мы приводим выражения для ширины запрещенных зон и оцениваем разброс значений импульса, что определяет критерий пересечения зон. Кроме того, в численном эксперименте мы рассчитываем спектры отражения методом матриц переноса, точно определяющий спектральное положение запрещенных зон. Он дает результаты, которые полностью согласуются с теоретическими предсказаниями.

Особый интерес представляет роль контраста диэлектрической проницаемости в пересечении запрещенных зон. Например, в брэгговских волоконных решетках периодические возмущения обычно имеют низкий контраст, что приводит к узким запрещенным зонам. В этих условиях основным фактором пересечения зон становится высокая неопределенность импульса. Наши численные расчеты согласуются с теорией, а экспериментальные наблюдения дополнительно подтверждают исследуемые явления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-12-00213).

[1] He C., Li Y., Wang X., *Int. J. Mod. Phys. B*, **28**, №2, 1441001, (2014).

[2] Alpeggiani F., Paravicini-Bagliani G.L., Andreani L.C., *Plasmonics*, **9**, 1457-1463, (2014).

[3] Segev M., Silberberg Y., Christodoulides D.N., *Nat. Photonics*, **7**, №3, 197-204, (2013).

[4] Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H., *Nat. Photonics*, **1**, 165-171, (2007).

[5] Anker J.N., Hall W.P., Lyandres O., Shah N.C., Zhao J., Van Duyne R.P., *Nat. Materials*, **7**, 442-453, (2008).

[6] Giovannetti V., Lloyd S., Maccone L., *Science*, **306**, №5700, 1330-1336, (2004).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХКУБИТОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ ДЛЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ

Козенко К.В.^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

²Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия
k.kozenko@g.nsu.ru

Проведено численное моделирование точного двухкубитового вентиля CZ на основе эффекта дипольной блокады в нейтральных атомах с возможностью индивидуальной адресации. Рассчитанная точность вентиля CZ, реализованного с использованием трёхфотонного возбуждения атома с учётом спонтанной релаксации, составила 92,4%.

Ключевые слова: CZ вентиль, дипольная блокада, трёхфотонные осцилляции Раби.

В последнее время в мире достигнуты значительные успехи в создании квантовых регистров на основе ультрахолодных нейтральных атомов. Реализация точных двухкубитовых вентилях CZ и CNOT – важнейшая и наиболее трудная задача для реализации квантовых вычислений. Были разработаны и продемонстрированы схемы точных двухкубитовых вентилях с нейтральными атомами, использующие их кратковременное лазерное возбуждение в ридберговские состояния и эффект дипольной блокады, когда одновременное возбуждение двух близко расположенных атомов в ридберговское состояние оказывается невозможным [1, 2]. При этом два атома взаимодействуют с лазерными пучками, освещающими весь массив атомов, что затрудняет индивидуальное выполнение двухкубитовых вентилях, необходимое для универсальных квантовых вычислений.

Для индивидуальной адресации при лазерном возбуждении в ридберговские состояния может быть использовано трехфотонное лазерное возбуждение, для которого эффективная трехфотонная частота Раби оказывается нечувствительной к флуктуациям пространственного положения атомов в оптической дипольной ловушке в сфокусированных лазерных пучках, в отличие от однофотонного или двухфотонного лазерного возбуждения [3].

В связи с этим особый интерес представляет реализация двухкубитовых вентилях с нейтральными атомами с использованием трехфотонного лазерного возбуждения. В работе было проведено численное моделирование двухкубитового фазового вентиля CZ, использующего фазовую или амплитудную модуляцию частоты Раби для различных схем лазерного возбуждения [1, 2]. Разработана программа для оптимизации профилей интенсивностей, которые необходимы для выполнения двухкубитовых операций с амплитудной модуляцией частоты Раби. Рассчитана точность CZ вентиля с помощью генерации Белловского состояния, которая составила 92.4%.

Исследование выполнено за счёт гранта РФФИ 23-42-00031.

[1] Levine H. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **123**, 170503, (2019).

[2] Fu Z. et al., *Phys. Rev. A*, **105**, 042430, (2022).

[3] Bezuglov N.N. et al., *arXiv preprint arXiv:2411.06607*, (2024).

ЛАЗЕРНАЯ ДИОДНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ

Герасимова М.П.¹, Садовников С.А.¹, Яковлев С.В.¹, Крючков А.В.^{1,2}

¹Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

²Томский государственный университет, г. Томск, Россия

gmp@iao.ru

Представлены результаты моделирования дистанционного газоанализа атмосферы в спектральном диапазоне вблизи длины волны 1572 нм. Проведена калибровка длины волны генерации лазерного диода, представлен вариант технического исполнения системы и некоторые экспериментальные результаты.

Ключевые слова: перестраиваемая диодная лазерная абсорбционная спектроскопия, углекислый газ, дистанционное зондирование.

Необходимость мониторинга загрязнения атмосферы обуславливает разработку технических средств дистанционного зондирования для различных условий – в городских агломерациях, вблизи частных промышленных предприятий, автомагистралей [1] и др. Одним из наиболее активно влияющих на парниковый эффект является углекислый газ (CO_2). Для решения задачи зондирования CO_2 в широких диапазонах концентраций от фоновых (~440 ppm на текущий момент) до предельно допустимых (ПДК) разработана лазерная диодная система, перестраиваемая в полосе поглощения CO_2 на длинах волн вблизи 1572 нм [1].

В рамках моделирования спектров поглощения атмосферы показана возможность дистанционного зондирования CO_2 в диапазоне концентраций от фоновых значений до ПДК в спектральном диапазоне 1567–1573 нм. Моделирование проводилось для условий модели атмосферы лета средних широт, в ходе которого показано, что с учётом влияния мешающего поглощения водяного пара предпочтительной является линия поглощения CO_2 на длине волны ~1572,6 нм. Расчёты проводились с использованием базы спектроскопических данных HITRAN [2] с учётом линий поглощения O_3 , N_2O , CO , CH_4 , NH_3 , HCN , C_2H_2 , H_2S , однако они не вносят достаточного вклада в суммарные спектры поглощения (поглощение <0.001%) [1].

Для корректной калибровки длины волны генерации лазерного диода был собран экспериментальный стенд (рисунок), с помощью которого регистрировался спектр пропускания газовой смеси при прохождении его через кювету ($L = 1200$ мм), накаченную CO_2 при давлении 1 атм [1].

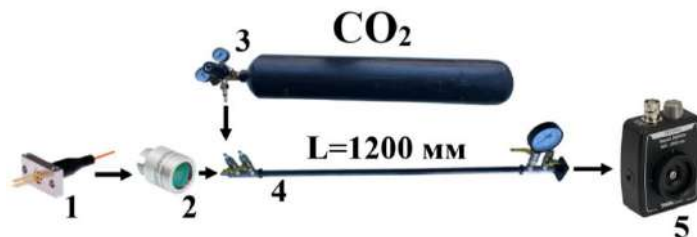


Рисунок. Схема экспериментального стенда для настройки длины волны генерации лазерного диода с использованием газовой кюветы (1 – лазерный диод; 2 – зеркальный коллиматор Thorlabs; 3 – баллон с CO_2 ; 4 – газовая кювета; 5 – фотодетектор Thorlabs)

С применением тестового стенда показано, что измеренное поглощение лазерного излучения в газовой кювете с CO_2 соотносится со значениями расчета спектра поглощения и составило порядка 10% для обоих случаев в заданных условиях. Таким образом, была произведена точная настройка длины волны генерации лазерного диода и показана возможность проведения тестовых экспериментов в составе лазерной системы для дистанционного зондирования CO_2 [1].

Далее были проведены тестовые эксперименты по проверке работоспособности передающего и приемного каналов разрабатываемой системы. Для настройки режимов работы и проведения тестовых измерений использовался зеркальный отражатель (ретрорефлектор). В качестве экспериментальной трассы для проведения измерений выступал коридор ИОА СО РАН. В ходе тестовых экспериментов зарегистрированы сигналы, позволившие оценить поглощение CO_2 на исследуемой трассе зондирования, которое составило ~3,3%. С применением разработанного программного обеспечения восстановлено значение концентрации CO_2 , которое составило 678,1 ppm [1].

Таким образом, в результате проведенных исследований продемонстрирована работоспособность разработанной системы и возможность проведения последующих натурных измерений для контроля содержания CO_2 в атмосфере [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-557 от 25.04.2024).

[1] Герасимова М.П. и др., *Известия ВУЗов. Физика*, **68**, №8(813), 95-103, (2025).

[2] Gordon I., et. al., *Journal Quant. Spectrosc. Rad. Transfer*, **277**, 107949, (2022).

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ В СИСТЕМАХ
КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ

Соломатин О.А., Наседкин Б.А., Морозова П.А., Чистяков В.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

olegun.solom.2016@gmail.com

В данной работе были исследованы подходы к измерению спектров пропускания и вносимых оптических потерь интерференционных волоконно-оптических фильтров, в рамках которых в качестве источника излучения используются перестраиваемый лазер и источник суперконтинуума.

Ключевые слова: интерференционные фильтры, пропускание, оптические потери.

В рамках данной работы показано, что при измерении спектров пропускания интерференционных фильтров и оптических потерь, вносимых этими фильтрами, на результат влияет и выбор источника излучения. Для сравнения в качестве источника использовались перестраиваемый лазер с рабочим диапазоном длин волн 1500-1590 нм и источник суперконтинуума. Было продемонстрировано, что использование источника суперконтинуума, работающего в диапазоне длин волн 1250-1650 нм и позволяющего измерять пропускание в широком спектре, приводит к занижению вносимых оптических потерь на 30 дБ по сравнению с лазерным источником. Данный недочёт может привести к неточной оценке вносимых оптической системой потерь и, как следствие, неправильной оценке уровня изоляции при моделировании атаки "Троянский конь" [1-4] на систему квантового распределения ключей на непрерывных переменных [5, 6] с использованием зондирующего излучения. В качестве детекторов при измерениях использовались спектроанализатор, измеритель оптической мощности и сверхпроводниковый детектор одиночных фотонов. Более того, при использовании нескольких интерференционных фильтров вносимые ими оптические потери не суммируются. Сравнение полученных результатов приведено на рисунке.

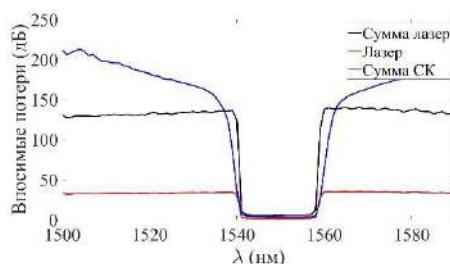


Рисунок. Спектры пропускания нескольких интерференционных фильтров при использовании перестраиваемого лазера и источника суперконтинуума в качестве источника излучения

- [1] Makarov V., Abrikosov A., Chaiwongkhot P. et al., *arXiv preprint arXiv:2310.20107*, (2023).
- [2] Sushchev I.S., Bulavkin D.S., Bugai K.E., et al., *Phys. Rev. Appl.*, **22**, 034032, (2024).
- [3] Borisova A., *Opt. Spectrosc.*, **128**, (2020).
- [4] Nasedkin B., Kiselev F., Filipov I., *Phys. Rev. Appl.*, **20**, 014038, (2023).
- [5] Laudenbach F., Pacher C., Fung C.-H. F., et al., *Adv. Quantum Technol.*, **1**, 1800011, (2018).
- [6] Wang T., Huang P., Li L. et al., *New J. Phys.*, **26**, 023002, (2024).

ЦИФРОВАЯ ПОДПИСЬ НА КВАНТОВО-ЗАЩИЩЕННЫХ КЛЮЧАХ

Грабовой М.Н., Торопова Д.И., Кузьмин С.В., Егоров В.И.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

m.grab@inbox.ru

Предложена схема реализации цифровой подписи методом рассылки квантово-защищенных ключей.

Ключевые слова: квантовая цифровая подпись, квантово-защищенные ключи.

В последнее десятилетие КЦП находятся в стадии активных исследований раннего внедрения. Она представляет собой симбиоз традиционных механизмов цифровой подписи и методов квантовой криптографии, а именно квантового распределения ключей [1, 2].

В связи с относительно недолгим сроком службы токенов цифровой подписи, риском появления квантового компьютера, способного взломать все наиболее распространенные методы шифрования, а также с проблемой распространения всех ныне существующих КЦП на большие расстояния, существует проблема, решение которой необходимо найти незамедлительно [3, 4].

В данной работе представлен передовой метод, основанный на новейших квантовых технологиях для передачи цифровой подписи по квантово-защищенному каналу, способному дополняться промежуточными опорными узлами для увеличения дальности действия схемы. Это гарантирует защиту от всех видов атак, включая квантовые, а также масштабируемость для построения схем.

На представленном рисунке изображена схема, состоящая из КРК, СКЗИ, МУК, разделенных на опорные узлы.

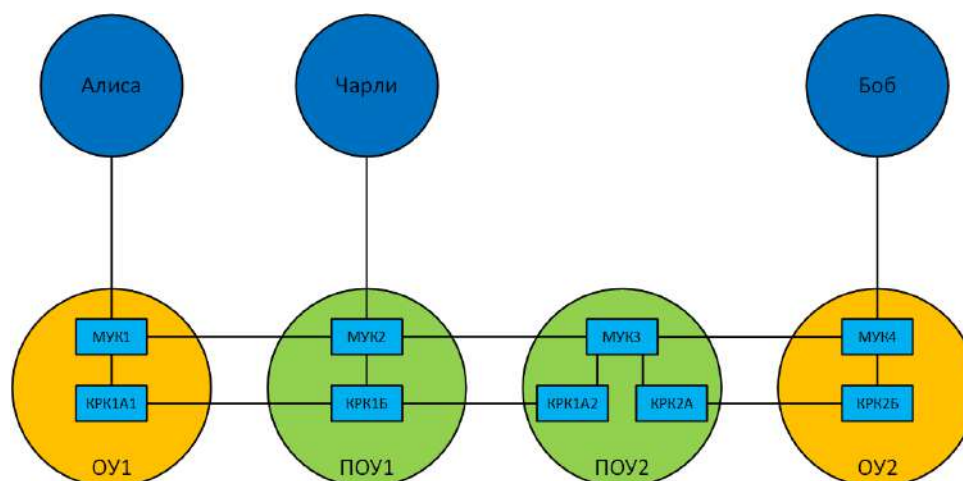


Рисунок. Схема цифровой подписи на квантово-защищенных ключах

На данный момент схема по рассылке КЗК для ЦП представлена теоретически в виде схемы и описания к ней, а также практически в виде программы, демонстрирующей полную работу схемы.

Теоретически и практически была продемонстрирована и описана схема КЦП на КЗК, которая решает множество проблем, которые возникают в сети, построенной только на КК [5].

[1] Gostassistant.ru [Электронный ресурс]: ПНСТ 830-2023. Квантовые коммуникации. Термины и определения. URL: <https://gostassistant.ru/doc/e1fcd84f-f26c-4d4a-b496-4d915da12288> (дата обращения: 20.03.2025).

[2] Gostassistant.ru [Электронный ресурс]: ПНСТ 829-2023. Квантовые коммуникации. Общие положения. URL: <https://gostassistant.ru/doc/373118a0-bc9a-4878-807c-c241ab432361> (дата обращения: 30.03.2025).

[3] Gostassistant.ru [Электронный ресурс]: ПНСТ 832-2023. Квантовый интернет вещей. Термины и определения. URL: <https://gostassistant.ru/doc/522ea051-19a7-459b-9e07-8a8b2ec621ae> (дата обращения: 05.04.2025).

[4] Gostassistant.ru [Электронный ресурс]: ПНСТ 831-2023. Квантовый интернет вещей. Общие положения. URL: <https://gostassistant.ru/doc/e19bfb65-6254-47ed-9e21-a2f0c4b4e7a9> (дата обращения: 10.04.2025).

[5] Yin H.-L., Fu Y., Li C.-L., Weng C.-X., Li B.-H., Gu J., Lu Y.-S., Huang S., & Chen Z.-B., *National Science Review*, 10(4), nwac228, (2023).

ДЕКОДИРОВАНИЕ КОДОВ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Багаев Д.С.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический Факультет, Москва, Россия
bagaev.ds20@physics.msu.ru

Поверхностные коды демонстрируют высокую пороговую устойчивость к шуму. Проведённые в работе эксперименты с низкоуровневым декодером показали отсутствие масштабируемости с ростом кодового расстояния из-за неоднозначности синдромов. Для преодоления этой проблемы предложен декодер на основе графовых нейронных сетей, учитывающий топологию решётки.

Ключевые слова: квантовая коррекция ошибок, машинное обучение.

Поверхностные коды [1] в настоящее время являются одними из наиболее перспективных кандидатов для реализации устойчивых к шуму квантовых вычислений благодаря своим выдающимся свойствам подавления ошибок [2]. Недавние работы показали, что стабилизаторные коды, в том числе поверхностные коды, могут быть реализованы с использованием всего одного вспомогательного кубита и кольцевой топологии соединений, что значительно снижает затраты на ресурсы [3]. Несмотря на то, что такие подходы позволяют обойти аппаратные ограничения, ошибки всё равно накапливаются и требуют декодирования на основе измеренных синдромов. Декодеры на основе алгоритмов машинного обучения демонстрируют потенциал для улучшения масштабируемости и адаптации к сложным моделям шума: в частности, уже существующие архитектуры на базе свёрточных сетей [4] и трансформеров [5] превосходят классические алгоритмические методы.

В данной работе исследуется как низкоуровневая (предсказание отдельных физических ошибок), так и высокоуровневая постановка (предсказание логической ошибки) задачи декодирования. В низкоуровневой постановке был обучен декодер на поверхностных кодах с кодовыми расстояниями 3, 5 и 7 с моделью шума в виде деполяризующего канала. Нейросеть-декодер предсказывает три матрицы размером $d \times d$ с оценками вероятностей соответствующих ошибок Паули (X, Y и Z). Результаты (рисунок) показывают, что при фиксированной вероятности физической ошибки точность классификации монотонно убывает с ростом кодового расстояния d . Это объясняется двумя факторами: (i) один и тот же синдром может соответствовать множеству различных конфигураций ошибок, и (ii) используется строгая, но необходимая метрика, согласно которой предсказание считается корректным лишь при полном совпадении предсказанной матрицы ошибок с эталонной. Данная особенность свидетельствует о плохой масштабируемости декодера в низкоуровневой постановке.

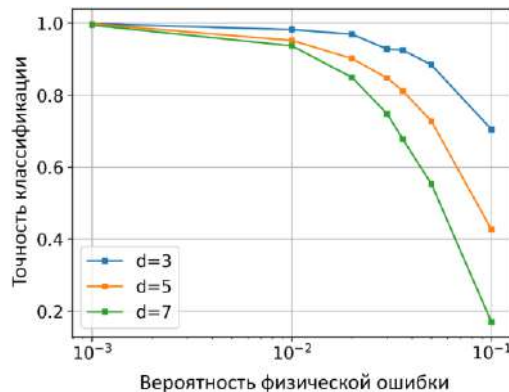


Рисунок. Точность классификации низкоуровневого декодера от вероятности физической ошибки

Чтобы преодолеть эти ограничения, предлагается переход к высокоуровневой постановке с графовой нейронной сетью, повторяющей топологию решётки поверхностного кода. Встраивая геометрию кода в архитектуру сети, решение нацелено на масштабирование до поверхностных кодов больших размеров и опирается на недавние достижения в области [5].

В совокупности полученные результаты демонстрируют, что низкоуровневое декодирование по своей сути не масштабируется, тогда как высокоуровневый подход на основе графовых сетей представляет собой перспективный путь к практической реализации устойчивых к шуму квантовых вычислений.

- [1] Fowler A.G., *Physical Review A*, **86**, №3, 032324, (2012).
- [2] Acharya R., et al., *Nature*, **614**, №7942, 676-679, (2024).
- [3] Antipov A.V., Kiktenko E.O., Fedorov A.K., *Physical Review A*, **107**, №6, 062602, (2023).
- [4] Gicev S., Hollenberg L.C.L., Usman M., *Quantum*, **7**, №58, 842, (2023).
- [5] Bausch J., et al., *Nature*, **620**, №6019, 78-83, (2024).

ЛАЗЕРНАЯ И СИЛОВАЯ ОПТИКА

МЕХАНИЗМЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НАНО И МИКРОЧАСТИЦ $\text{YF}_3: \text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$

Шошева Е.И., Пудовкин М.С.

Казанский Федеральный Университет, Институт физики, Казань, Россия

Kate15-05@mail.ru

В работе была исследована серия образцов $\text{YF}_3: \text{Nd}^{3+}$ и $\text{YF}_3: \text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ с различными соотношениями концентраций люминесцентных ионов. Было выдвинуто предположение о влиянии теплового расширения на температурную чувствительность образцов. Были выбраны две концентрации ионов Nd^{3+} (0.5 и 5.0 мол.%) в матрице YF_3 , для которых зависимости времен затухания от температуры ведут себя отличным образом. Были получены соизмеримые с мировыми аналогами температурные чувствительности в широком диапазоне температур.

Ключевые слова: люминесцентная термометрия, $\text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YF}_3$, зависимость параметров кристаллической решетки от температуры.

Наночастицы $\text{YF}_3: \text{Nd}^{3+}$ и $\text{YF}_3: \text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ были синтезированы методом гидротермального синтеза. Фазовый состав был определен методом порошкового рентгенофазового анализа (РФА), средний размер был получен благодаря просвечивающей электронной микроскопии и равен 55 ± 2 нм, люминесцентные характеристики были исследованы методом лазерной абсорбционной спектроскопии. Согласно данным РФА изменения в межплоскостных расстояниях в диапазоне 100-300 К достигают 0,0003-0,0005 нм, такие изменения вполне могут повлиять на спектрально-кинетическую характеристику. Образцы исследовались на длинах волн возбуждения 355 и 790 нм, соответствующих полосам поглощения ионов Nd^{3+} . В начале данной работы была синтезирована серия частиц $\text{YF}_3: \text{Nd}^{3+}$ (0.1; 0.5; 1.0; 2.0 и 5.0 мол.%): для поиска оптимальной концентрации. Поведение времен затухания люминесценции на длине волны 865 нм на двух длинах волн возбуждения схожи, и зависимость при возбуждении на длине волны 355 нм представлена на рисунке. Видим, что времена затухания имеют различную зависимость в диапазоне температур 80-320 К. Была предложена гипотеза [1], что увеличение времени жизни люминесценции Nd^{3+} с увеличением температуры связано со сжатием кристаллической решетки образца при низких температурах (и как следствие, уменьшение расстояния между ионами активаторов). Тогда при низких температурах ионы Nd^{3+} сближаются, и между ними становится более вероятен процесс кросс-релаксации. Для больших концентраций ионов Nd^{3+} изменение расстояния уже не вносит такого вклада, поскольку ионы уже и так достаточно близко расположены. Стоит отметить, что данные результаты повторяются и для микрочастиц $\text{YF}_3: \text{Nd}^{3+}$, следовательно, данных процесс не зависит от размера частиц и метода их получения. По кинетической характеристики данных образцов были определены две оптимальных концентрации (0.5 и 5.0 мол.%) для дальнейшего изучения. Спектральная характеристика образцов при оптическом возбуждении 355 нм показала широкополосное свечение дефектов (400-600 нм), которое становится интенсивнее при низких температурах. Однако, передачи энергии между дефектом и ионами Nd^{3+} обнаружено не было.

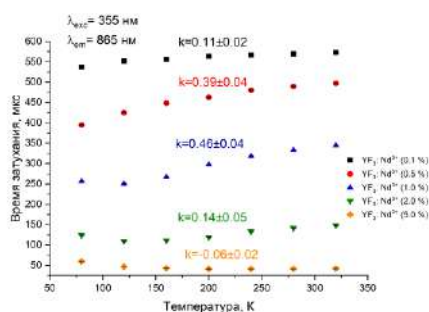


Рисунок. Зависимость времени затухания люминесценции Nd^{3+} от температуры образцов с разной концентрацией Nd^{3+} (0.1, 0.5, 1.0, 2.0 и 5.0 мол.%)

В ходе работы были исследованы образцы $\text{YF}_3: \text{Nd}^{3+}$ (0.5 и 5.0 мол.%), Yb^{3+} (0.5 мол.%). Спектральная характеристика в диапазоне температур 80-320 К привела к получению соизмеримых с мировыми аналогами температурных чувствительностей. Максимум абсолютной и относительной температурной чувствительности был получен $2.7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ и $0.44\% \cdot \text{K}^{-1}$ для образца $\text{YF}_3: \text{Nd}^{3+}$ (0.5 мол.%), Yb^{3+} (0.5 мол.%) и $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ и $0.73\% \cdot \text{K}^{-1}$ для образца $\text{YF}_3: \text{Nd}^{3+}$ (5.0 мол.%), Yb^{3+} (0.5 мол.%).

Исследование выполнено при финансовой поддержке, выделенной Казанскому федеральному университету на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности (FZSM-2022-0021).

[1] Pudovkin M., Oleynikova E., Kiimov A. et al., *Materials*, **16**(1), 39, (2022).

**СПЕКТРАЛЬНО- КИНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ
КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУР $\text{CeO}_2/\text{CeF}_3: \text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$
ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕНСОРИКИ**

**Докудовская А.К.¹, Рахматуллин Р.М.¹, Кораблева С.Л.¹,
Морозов О.А.^{1,2}, Родионов А.А.¹, Пудовкин М.С.¹**

¹Казанский федеральный университет, Институт физики, Казань, Россия,

²Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН, Казань, Россия

fyz0561999@gmail.com

В данной работе исследовалась возможность использования наночастиц $\text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CeF}_3/\text{CeO}_2$ в люминесцентной термометрии. Чтобы объяснить механизм температурной чувствительности люминесценции, мы провели физическую характеристику образцов с помощью ПЭМ, ПРФА, лазерной спектроскопии и ЭПР.

Ключевые слова: люминесцентная термометрия, композиты, $\text{CeO}_2/\text{CeF}_3$.

Температурное картирование методом люминесцентной термометрии является очень мощным инструментом для получения информации о температуре исследуемого объекта и ее распределении с субмикронным пространственным разрешением. Эта методика востребована в гипертермии, производстве микросхем, стоматологии, теромогенетике и т.д. [1]. Благодаря низкой энергии фононов, высокой химической и механической стабильности, отсутствию фотообесцвечивания и низкой цитотоксичности оксиды и фториды церия, а также композиты на их основе являются крайне перспективными материалами для многих научных, медицинских и промышленных целей [2].

Были синтезированы однофазные (гексагональная структура) наночастицы Nd^{3+} (мол. 0.1%), Yb^{3+} (мол. 0.5%): CeF_3 методом со-осаждения. Эти наночастицы отжигали на воздухе при 600 °C в течение 15, 30, 60 и 120 мин для получения двухфазных наночастиц $\text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CeF}_3/\text{CeO}_2$. После 120 мин отжига были получены однофазные $\text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CeO}_2$ (кубическая фаза). Частицы $\text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CeF}_3/\text{CeO}_2$ (15, 30 и 60 мин) продемонстрировали комбинации фаз CeF_3 и CeO_2 . Физический размер образцов постепенно увеличивался от 19 нм ($\text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CeF}_3$) до ~ 409 нм ($\text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CeF}_3/\text{CeO}_2$ (120 мин)). Предполагается, что двухфазные образцы состоят из спечённых наночастиц CeF_3 и CeO_2 со средним размером ОКР ~65 нм. В качестве температурно-зависимого параметра было взято отношение интенсивностей полос люминесценции (LIR) ($\text{LIR} = I_{\text{Nd}}/I_{\text{Yb}}$) (Рисунок). Убывающий характер функции LIR для CeF_3 связан с тем, что Nd^{3+} передает энергию Yb^{3+} посредством резонансного переноса при участии фононов, который более эффективен при более высоких температурах. Возрастающий характер функции LIR для однофазных CeO_2 связан с тем, что трехвалентные легирующие ионы образуют кластеры, в которых концентрационное тушение, в частности, Yb^{3+} происходит более эффективно по отношению к передаче энергии от Nd^{3+} к Yb^{3+} . LIR для двухфазных образцов более сложны и могут рассматриваться как комбинация LIR однофазных образцов.

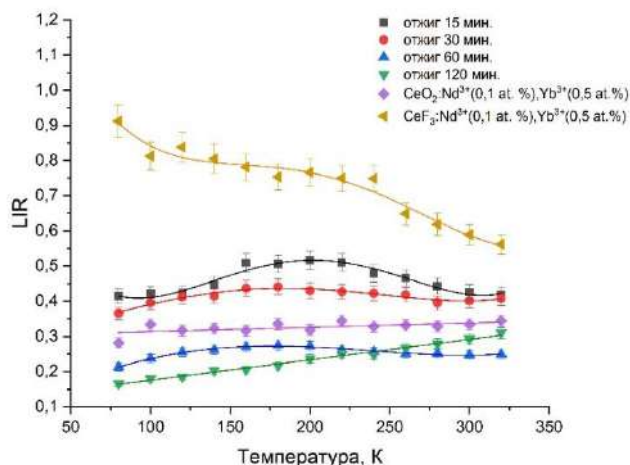


Рисунок. Зависимость функции LIR от температуры однофазных ($\text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CeF}_3$ и $\text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CeO}_2$) и двухфазных $\text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CeF}_3/\text{CeO}_2$ образцов

Исследование выполнено за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности (FZSM-2022-0021).

[1] Brites C.D.S, et al., *Advanced Materials*, **35**, №36, 2302749, (2023).

[2] Casals E., et al., *Small*, **16**, №20, 1907322, (2020).

ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ НА ОСНОВЕ ТЕЛЛУРИТОВОГО ВОЛОКНА, ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ ЭРБИЯ

Макарова Н.А., Ватник И.Д.

Новосибирский Государственный Университет, г. Новосибирск, Россия
n.makarova@g.nsu.ru

Получена лазерная генерация в активном цилиндрическом микрорезонаторе в областях C-band и L-band. Продемонстрирована возможность перестройки длины волны излучения путем изменения положения накачки относительно цилиндра.

Ключевые слова: цилиндрический микрорезонатор, лазерная генерация.

В настоящее время большое внимание приковано к цилиндрическим микрорезонаторам благодаря их преимуществам - высокая добротность, чувствительность к изменениям температуры и показателя преломления, а также тот факт, что внесением вариации эффективного радиуса можно прецизионным способом управлять структурой мод. Одним из применений таких устройств является создание компактного узкополосного лазерного источника на основе активного цилиндрического микрорезонатора, легированного ионами редкоземельных элементов.

В недавней работе [1] было показано, что в микросфере на основе теллуристого стекла, легированного по всему объему ионами эрбия, может быть получена одномодовая, и многомодовая лазерная генерация при накачке перестраиваемом узкополосным лазером в области 1520 нм. Перспективным является создание лазера на основе цилиндрического микрорезонатора, сделанного из того же самого активного теллуристого волокна. Так, благодаря цилиндрической геометрии существует возможность перестраивать длину волны излучения такого лазера за счет изменения места контакта накачки с микрорезонатором.

Мы создали компактный лазерный источник на основе нитки из теллуристого стекла, легированного ионами эрбия. Нитка предварительно локально нагревалась излучением CO₂ лазера для создания малых вариаций радиуса, локализующих излучение мод. Для получения лазерной генерации в качестве накачки использовался коммерчески доступный широкополосный лазерный диод на 976 нм, излучение которого заводилось в микрорезонатор через тянутое биконическое волокно. При изменении точки ввода накачки вдоль оси нитки получалась как одномодовая (рисунок (а)), так и многомодовая лазерная генерация (рисунок (б)).

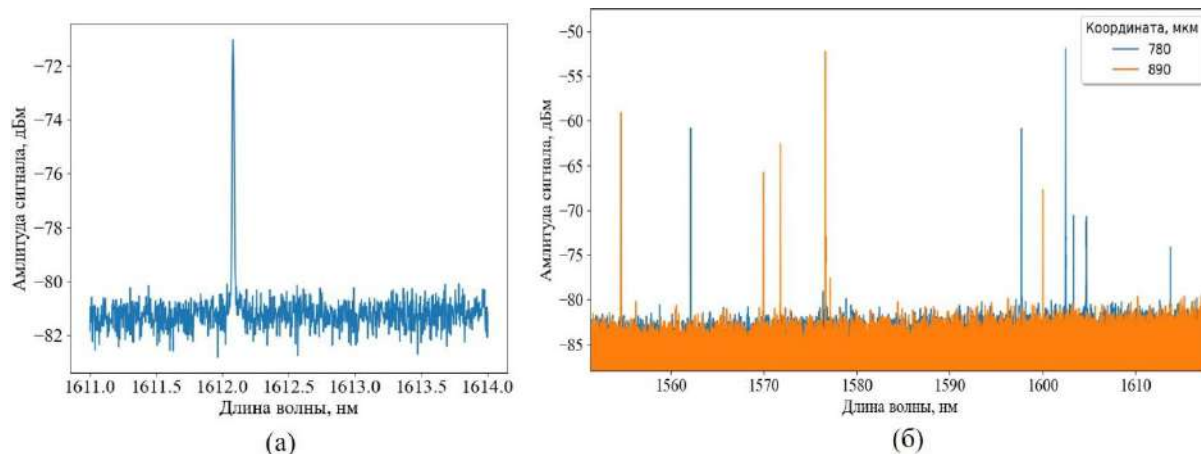


Рисунок. Спектр лазерной генерации: а) одномодовая, б) многомодовая

Проведенное исследование показало, что при накачке широкополосным лазером на 976 нм можно получить лазерную генерацию как в C-band, так и L-band областях. Пороговая мощность накачки на 976 нм составила 76 мВт. Было выяснено, что путем изменения точки накачки относительно оси микрорезонатора можно менять длину волны лазерного излучения (рисунок (б)). Ширина линии генерации составляет менее 5 МГц.

Благодарим В.В. Дорофеева, А.В. Андрианова и Е.А. Анашкину за предоставленные образцы теллуристых нитей и консультации. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-12-20020 (<https://rscf.ru/project/25-12-20020/>) и Правительства Новосибирской области.

[1] Anashkina E.A., Andrianov A.V., *Journal of Lightwave Technology*, **39**, №11, 3568-3574, (2021).

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ФОТОИОНИЗАЦИИ ГАЗОВЫХ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СРЕД ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ЛИНЕЙНОЙ И ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Вертелецкая М.П.¹, Богацкая А.В.^{1,2}, Попов А.М.^{1,2}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

MashaVerteletskaya@yandex.ru

Теория Келдыша, часто применяемая для описания процесса фотоионизации атомов газа, имеет ряд неясностей в случае твёрдых тел. В работе проанализирована теория Келдыша применительно к взаимодействию лазерного излучения линейной и эллиптической поляризации с широкозонными диэлектриками.

Ключевые слова: многофотонная ионизация, теория Келдыша, эллиптическая поляризация.

В задачах воздействия мощного сфокусированного лазерного излучения на прозрачные твёрдые диэлектрики, представляющих актуальность для лазерного микроструктурирования [1, 2], основным процессом, определяющим рождение носителей заряда в зоне проводимости, является многофотонная ионизация. Она описывается теорией фотоионизации Келдыша, предложенной в работе [3] и усовершенствованной в статьях [4, 5]. Теория фотоионизации твёрдых тел несёт в себе ряд неясностей, которые затрагиваются в работах [6, 7]. В качестве одной из основных проблем является устройство зонной структуры твёрдого тела, оказывающее довольно сильное влияние на динамику процесса и подразумевающее ряд ограничений.

Однако в ряде работ для описания фотоионизации широкозонных диэлектриков используется «атомная» формула теории Келдыша [8], в которой вместо потенциала ионизации выступает ширина запрещённой зоны, а вместо массы электрона – эффективная масса носителей заряда [9]. Сравнительный анализ вероятностей ионизации одиночного атома и атома твёрдого тела, проведенный авторами, продемонстрировал схожую динамику. Различия заключены лишь в нормировочном множителе, который в обоих случаях может быть определен через сечение фотопоглощения в многофотонном пределе.

Изначально теория Келдыша описывает физику процессов, происходящих под воздействием линейно поляризованного монохроматического излучения на вещество. Однако с развитием лазерных технологий появляется необходимость исследования ряда задач взаимодействия сред с ультракороткими импульсами различной поляризации (линейной, эллиптической, круговой). В случае эллиптической поляризации выражение для вероятности ионизации приведено в работе [10]:

$$W = \sqrt{\frac{3\epsilon}{2\pi(1-\xi^2)}} \kappa^2 \epsilon \cdot \exp \left\{ -\frac{2}{3\epsilon} \left[1 - \frac{1}{10} \left(1 - \frac{\xi^2}{3} \right) \gamma^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

где $\gamma = \omega \sqrt{2mI_i} / eE_0$ – параметр Келдыша, ω – частота излучения, E_0 – амплитуда электрического поля, I_i – потенциал ионизации атома, m, e – масса и заряд носителей (электронов), соответственно, $\epsilon = E_0 / \kappa^3$ – приведённое поле, $\kappa = \sqrt{2I_i}$, ξ – параметр эллиптичности излучения.

К настоящему моменту интерес представляет лазерная запись различных оптических элементов в плавленом кварце импульсами различной поляризации [11]. Однако данные, полученные в ряде экспериментов по наблюдению поляризационной зависимости лазерного воздействия на диэлектрические материалы, оказываются противоречивыми. Таким образом, теоретическое исследование вероятности ионизации диэлектриков для различных поляризаций излучения, приведённое в данной работе, представляет актуальность для понимания фундаментальных аспектов технологий поляризационно-управляемой лазерной записи и их развития.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-72-10076-П).

- [1] Shimotsuma Y., Hirao K., Qiu J.R., Kazansky P.G., *Mod. Phys. Lett. B*, **19**, №24, 225, (2005).
- [2] Taylor R., Hnatovsky C., Simova E., *Laser Photonics Rev.*, **2**, 26, №1-2, (2008).
- [3] Keldysh L.V., *Sov. Phys. JETP.*, **20**, №5, 1307, (1965).
- [4] Perelomov A.M., Popov V.S., Terent'ev M.V., *Sov. Phys. JETP.*, **23**, №5, 924, (1966).
- [5] Perelomov A.M., Popov V.S., Terent'ev M.V., *Sov. Phys. JETP.*, **24**, №1, 207, (1967).
- [6] Gruzdev V.E., *J. Opt. Technol.*, **73**, 385, (2006).
- [7] Gruzdev V.E., *Proc. of SPIE*, **5647**, 480, (2005).
- [8] Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M., *Appl. Phys. A*, **131**, 79, (2025).
- [9] Bogatskaya A., Gulina Yu., Smirnov N., Gritsenko I., Kudryashov S., Popov A., *Photonics*, **10**, 515, (2023).
- [10] Mur V.D., Popruzhenko S.V., Popov V.S., *JETP*, **92**, №5, 777, (2001).
- [11] Lei Y., Shayeganrad G., Wang H., Sakakura M., Yu Y., Wang L., Kliukin D., Skuja L., Svirko Yu., Kazansky P., *Light Sci Appl*, **12**, 74, (2023).

СВЕТОРАССЕЯНИЯ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ГЕМОГЛОБИНА

Майков Э.В., Федорова К.В., Гибизова В.В.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний, Москва, Россия

emil199807@mail.ru

Оптическими методами, основанными на явлении рассеяние света, в работе изучается влияние параметров среды на растворенный гемоглобин. Представленное исследование направлено на изучение свойств рассеивающих частиц в водных растворах гемоглобина.

Ключевые слова: светорассеяние, лазерная спектроскопия, гемоглобин.

Задача данной работы – методом светорассеяния изучить зависимость свойств рассеивающих частиц в водных растворах гемоглобина человека при изменении параметров среды. Основным физическим явлением, используемым для исследования, является рассеяние света на оптических неоднородностях присутствующих в исследуемом образце.

Для измерений в работе используется анализатор частиц «Photocor Complex» [1]. Свет от источников рассеивается на неоднородностях в исследуемом образце и считывается на под углом на фотоэлектрическом умножителе (ФЭУ) (рисунок). В качестве источника света в работе используются лазеры с длиной волны 450 и 647 нм, мощностями 25 мВт каждый.

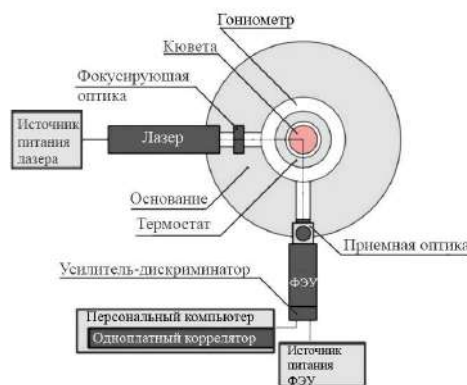


Рисунок. Схема прибора Photocor Complex

Раствор с объектом исследования приготавливался посредством растворения порошкового гемоглобина человека фирмы Sigma-Aldrich [2]. В ходе эксперимента растворы гемоглобина приготавливались посредством использования ультразвуковых ванны и термостатической бани.

Методом статического рассеяния света (СРС) исследуется изменение таких макромолекулярных параметров как масса, коэффициент межмолекулярного взаимодействия. Методом динамического рассеяния света – гидродинамический радиус и коэффициент трансляционной диффузии. Методом многоуглового СРС получены зависимости интенсивности рассеянного света от угла рассеяния, позволяющие оценить размер рассеивающих частиц.

Изучено влияние способа подготовки образцов на получаемые параметры рассеивающих частиц [3]. Гидродинамические радиусы и размеры рассеивающих частиц в растворах, подготовленные с помощью ультразвуковой ванны, были больше, чем у тех, что были подготовлены при использовании термостатической бани.

Исследовано влияние температурой обработки при приготовлении исследуемых растворов при характерных температурах структурного возмущения, термическое разворачивания и агрегации белка гемоглобина – от 20 до 70 °C [4-6].

В работе было исследовано влияние длины волны падающего излучения на получаемые параметры [7]. При использовании источника в 450 нм в концентрационных зависимостях интенсивности рассеянного света, присутствует максимум, после которого интенсивность начинает уменьшаться.

[1] Технологическая платформа [Электронный ресурс]: Многоугловой анализатор размеров частиц Photocor Complex – Photocor. URL: <https://www.photocor.ru/products/photocor-complex> (дата обращения: 21.06.2025).

[2] Технологическая платформа [Электронный ресурс]: Hemoglobin human – Merck KGaA. URL: <https://www.sigmaaldrich.com/RU/en/product/sigma/h7379> (дата обращения: 21.06.2025).

[3] Su J., Cavaco-Paulo A., *Ultrasonics sonochemistry*, **76**, 105653, (2021).

[4] Yan Y.B., Wang Q., He H.W., Zhou H.M., *Biophysical journal*, **86**, №3, 1682-1690, (2004).

[5] Chakrabarti A., Bhattacharya D., Deb S., Chakraborty M., *PloS one*, **8**, №11, e81820, (2013).

[6] Bhomia R., Trivedi V., Coleman N.J., Mitchell J.C., *Journal of pharmaceutical analysis*, **6**, №4, 242-248, (2016).

[7] Meng F., Alayash A.I., *Analytical biochemistry*, **521**, 11-19, (2017).

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ VCSELS ПРИ НАЛИЧИИ ДВУХ ТОЧЕК ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Лобацевич П.М., Буров Л.И.

Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

pavel.lobatsevich@mail.ru

На основе разработанного ранее метода [1] проведено численное моделирование выходных характеристик длинноволнового полупроводникового поверхностно излучающего лазера с двумя точками поляризационного переключения при наличии флуктуаций плотности инжекционного тока.

Ключевые слова: полупроводниковые лазеры, переключение поляризации, статистика.

Для полупроводниковых поверхностно излучающих лазеров (VCSELS) хорошо известен эффект переключения поляризации – эффект резкого изменения поляризации выходного излучения на ортогональную при малом увеличении инжекционного тока. В одномодовом режиме генерации, характерном для длинноволновых VCSELS, может наблюдаться не более двух точек поляризационного переключения [2]. Случай с одной точкой рассмотрен в работе [3], где показано, что основным влиянием на статистические характеристики выходного излучения оказывают флуктуации плотности инжекционного тока и плотности неравновесных носителей, причем оба источника флуктуаций можно свести к флуктуациям «эффективной» плотности инжекционного тока.

В данной работе исследован случай двух точек поляризационного переключения. Для описания формирования поляризованного излучения в VCSELS было использовано представление частично поляризованного излучения в виде некогерентной суперпозиции линейно поляризованных компонент с ориентацией под углом ψ к выделенной оси [1]. Тогда для коэффициента усиления отдельной компоненты можно использовать выражение в виде [4]:

$$G(\psi) = g_0(N - N_{tr}) \left[1 + k_0 \left(1 - \frac{j}{j_{ps1}} \right) \left(1 - \frac{j}{j_{ps2}} \right) \cos 2\psi \right],$$

где $g_0(N - N_{tr})$ – стандартное выражение для коэффициента усиления полупроводниковых лазеров, k_0 – коэффициент, определяющий анизотропию эффективного коэффициента усиления, j_{ps1} и j_{ps2} – величины тока инжекции, которые соответствуют точкам переключения поляризации, ψ – угол ориентации каждой поляризационной компоненты [1]. Для флуктуаций тока предполагалось нормальное распределение относительного среднего значения, дисперсия которого менялась в широких пределах чтобы включить и флуктуации плотности неравновесных носителей заряда.

На основе результатов моделирования показано, что для случая большого разнесения точек поляризационного переключения не наблюдается существенных различий с результатами [3] вблизи каждой из точек. В случае близкого их расположения характер гистограмм распределения интенсивности и поляризации выходного излучения существенно зависели не только от положения среднего значения тока и дисперсии функции распределения, но и от средней длительности флуктуаций. В последнем случае основную роль играет время формирования интенсивности и поляризации. Время формирования поляризации зависит от относительной анизотропии эффективного коэффициента усиления и в области значения точки переключения резко возрастает. Поэтому «быстрые» флуктуации с относительно малым значением дисперсии практически не проявляются в отличие от случая медленных флуктуаций и для больших значений дисперсии, что и соответствует флуктуациям концентрации плотности неравновесных носителей заряда. Построенные гистограммы продемонстрировали влияние на выходные характеристики таких параметров как величина дисперсии функции распределения флуктуаций, времени продолжительности флуктуаций, а также влияние расстояния между точками переключения и величины рабочего тока.

Таким образом, полученные результаты подтверждают ранее сделанные выводы о том, что ряд параметров системы не являются постоянными, а зависят от характера динамики поведения системы [5].

[1] Буров Л.И., Горбачевич А.С., Лобацевич П.М., *Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика*, **3**, 63-70, (2016).

[2] San Miguel M., Feng Q., Moloney J.V., *Physical Review A*, **52**(2), 1728-1739, (1995).

[3] Буров Л.И., Горбачевич А.С., Лобацевич П.М., *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*, **3**, 12-21, (2019).

[4] Буров Л.И., Лобацевич П.М., Гавриков Д.О., *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*, **1**, 38-48, (2025).

[5] Jadan M., Addasi J.S., Flaifel M.H., Burov L.I., Gorbatsevich A.S., Lobatsevich P.M., *Results in Physics*, **14**, 102379, (2019).

НАНОФОТОНИКА

ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ ДИФFUЗИЯ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ ПЕРОВСКИТОВ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Бородина Л.Н.¹, Татаринев Д.А.^{1,2,3}, Маргарян И.В.^{1,4},
Аннас К.И.¹, Борисов В.Н.¹, Вениаминов А.В.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Итальянский технологический институт, Генуя, Италия

³Университет Генуи, Генуя, Италия

⁴Харбинский инженерный университет, Китай

lnborodina@itmo.ru

Эффективные гидродинамические размеры нанопластин и нанокристаллов перовскита CsPbI₃ были получены в результате исследования закономерностей их фотоиндуцированной динамики с использованием методов, основанных на люминесцентной лазерной сканирующей микроскопии и голографической релаксометрии.

Ключевые слова: нанокристаллы перовскита, лазерная сканирующая микроскопия, голография.

Активное развитие фотонных устройств невозможно без создания новых материалов. Например, наноструктуры перовскита, обладающие уникальными оптическими свойствами, могут быть использованы в качестве нейтральной компоненты в фотополимеризующей композиции для создания современных оптических элементов и устройств нанофотоники. Однако важные для решения такого рода задач диффузионные свойства коллоидных наноструктур перовскита недостаточно изучены.

Нанокристаллы (НК) и нанопластины (НП) перовскита CsPbI₃ были получены методом горячей инъекции и диспергированы в гексане. Форма и размер НК и НП, их оптические свойства были исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и абсорбционной и люминесцентной спектроскопии. НК CsPbI₃ представляют собой наночастицы с формой, близкой к кубической, их средний размер грани составляет 12±3 нм. Латеральные размеры НП CsPbI₃ по данным ПЭМ (29±4 нм) × (20±5 нм). Максимум полосы фотолюминесценции НК находится на длине волны 680 нм, НП – на длине волны 600 нм. Толщина НП CsPbI₃ составляет 3 монослоя (2,5–3 нм) [1].

В результате анализа профилей интенсивности люминесценции наночастиц, полученных в результате фотообесцвечивания и релаксации пространственной неоднородности люминесценции (метод stripe-Fluorescence Recovery After Photobleaching, sFRAP [2]) на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе Zeiss LSM710, определены эффективные гидродинамические размеры НП и НК (рисунок).

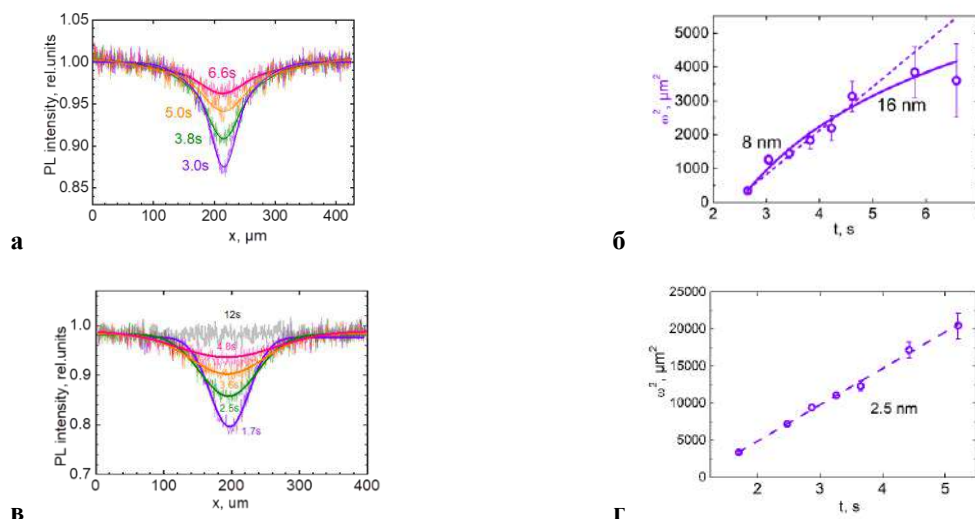


Рисунок. Пространственные профили интенсивности люминесценции НК (а) и НП (в) и зависимости квадрата ширины профиля от времени (б и г) с полученными гидродинамическими размерами наночастиц

По наклону линейной зависимости квадрата ширины профиля интенсивности люминесценции НП от времени (рисунок г) определён их эффективный гидродинамический размер, близкий к толщине НП, но заметно меньший их латеральных размеров. Для НК соответствующая зависимость нелинейна (рисунок б); различия в её наклоне позволяют говорить о таких же вариациях гидродинамических размеров НК, как и полученные по данным ПЭМ.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект №25-23-00708.

[1] Litvin A.P. et al., *Small*, **21**, 2408422, (2025).

[2] Бородина Л.Н., Борисов В.Н., Вениаминов А.В., *Опт. и спектр.*, **132**, №9, 964-974, (2024).

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И НАНОПЛАСТИН CdSe

Ридер М.А., Болтенко А.В., Домарев С.Н., Захаров В.В., Орлова А.О.

Университет ИТМО, международный научно-образовательный центр физики наноструктур,
Санкт-Петербург, Россия
riderm24@mail.ru

Разработан протокол создания гибридных наноструктур на основе углеродных нанотрубок и полупроводниковых нанопластин CdSe. Исследованы их оптические, морфологические и электрические свойства. Измерены отклики наноструктур в присутствии газообразных летучих органических соединений.

Ключевые слова: гибридные наноструктуры, полупроводниковые нанопластины, углеродные нанотрубки.

В настоящей работе рассматривается создание и исследование гибридных наноструктур (ГС) на основе углеродных нанотрубок (УНТ) и полупроводниковых нанопластин CdSe (НП) и их применение для детектирования летучих органических соединений (ЛОС), которые являются маркерами онкологических заболеваний, таких как рак легкого и молочной железы [1, 2]. На первом этапе были синтезированы НП CdSe, обладающие люминесценцией с максимумом на 515 нм, и проведена их поверхностная модификация олеиновой кислотой с целью получения коллоидно-стабильного раствора. Был разработан метод создания структур на проводящей подложке, заключающийся в поэтапном нанесении сухих слоев УНТ и НП. Полученные структуры имели однородное распределение на подложке. Были исследованы их оптические свойства при помощи оптической спектроскопии и конфокальной микроскопии. Анализ спектров люминесценции показал, что при создании ГС оптические свойства НП остаются практически неизменными. Особое внимание уделено исследованию взаимодействия ГС с индивидуальными ЛОС (изопропанол, ацетон, метилацетат, ацетонитрил, н-бутанол). Измерения включали регистрацию фотолюминесценции и проводимости в условиях тёмного режима и при облучении лазером (405 нм), с оценкой повторяемости отклика и возможностей восстановления сенсорных свойств. Схематическое изображение экспериментальных работ представлено на рисунке.

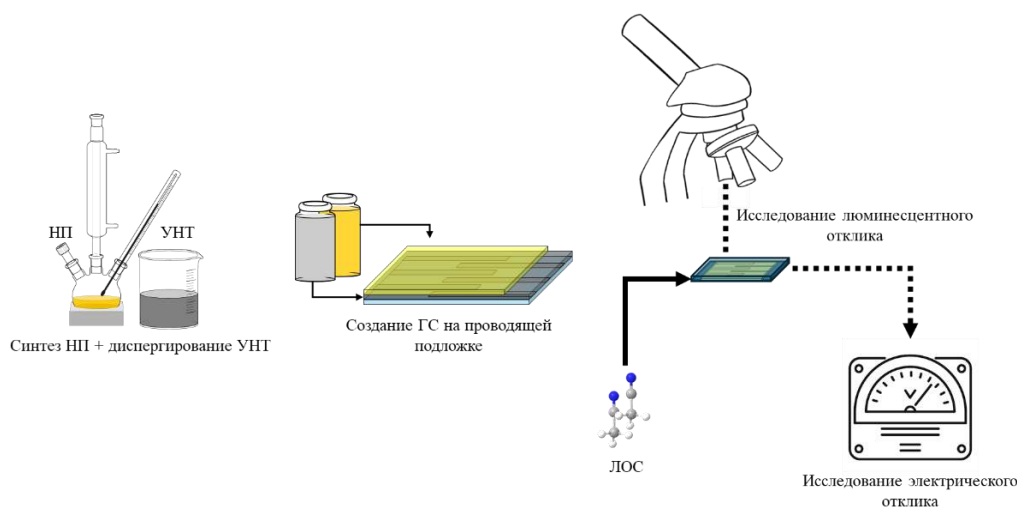


Рисунок. Схематическое изображение экспериментальных работ по созданию и исследованию ГС и их взаимодействию с ЛОС

Анализ показал, что люминесцентный отклик гибридных структур зависит от природы ЛОС: может происходить как тушение люминесценции, так и увеличение люминесцентного сигнала. При этом на некоторые аналиты система практически не реагирует, что тоже является важным аспектом и может помочь увеличить селективность создаваемого сенсора.

Таким образом, полученные результаты открывают возможности для создания селективного и чувствительного сенсора к летучим органическим соединениям на основе гибридных наноструктур УНТ/НП.

[1] Jalal A.H. et al., *Acs Sensors*, **3**, 7, 1246-1263, (2018).

[2] Xu Y. et al., *J. Biomed. Nanotechnol.*, **9**, 7, 1164-1172, (2013).

ТЕРАГЕРЦЕВАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В СПИНТРОННЫХ ЭМИТТЕРАХ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ Pt/Co/Si С «МАГНИТОМЕРТВЫМ» СЛОЕМ Co

**Авдеев П.Ю.¹, Лебедева Е.Д.¹, Алферьев А.Л.¹, Кузнецов К.Г.¹,
Караштин Е.А.², Сапожников М.В.², Буряков А.М.¹**

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

²Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

pasha.avdeev.2000@mail.ru

В данной работе исследовано влияние толщины слоя Co на генерацию ТГц излучения в структуре Pt/Co/Si. Выявлена критическая толщина "магнитомертвого" слоя и подтверждён спин-реориентационный переход.

Ключевые слова: спинтронные эмиттеры, спин-реориентационный переход, терагерцевое излучение.

Терагерцевое (ТГц) излучение активно применяется в задачах медицинского скрининга, безопасности, культурной экспертизы и телекоммуникаций [1–3]. Существенный прогресс в этих направлениях обеспечили спинтронные эмиттеры [4], способные генерировать мощное ТГц поле (~100 кВ/см) с управляемой поляризацией при помощи слабого магнитного поля (~100 Э) [5]. Основа их работы — возбуждение спин-поляризованного тока в ферромагнитном (ФМ) слое и его преобразование в зарядовый ток в немагнитном (НМ) слое за счёт обратного спинового эффекта Холла (ISHE), что приводит к излучению в ТГц диапазоне.

Ранние исследования показали, что эффективность генерации ТГц сигнала сильно зависит от материала и толщины ФМ и НМ слоёв [4]. Одной из наиболее эффективных признана структура Co/Pt с толщиной около 3 нм для каждого слоя. Однако в работе [6] показано, что при толщине Fe менее 2 нм амплитуда ТГц сигнала резко падает, что связывается с появлением "магнитомертвого" слоя — области, в которой намагниченность не участвует в генерации спиновых токов. Причина этого явления до конца не выяснена.

Мы предполагаем, что ключевым механизмом является спин-реориентационный переход (SRT) — изменение направления вектора намагниченности с внеплоскостного (out-of-plane) на плоскостное (in-plane) при достижении критической толщины пленки. Это подтверждается рядом работ: для Fe/Cu(100) — ~5 монослоев (~1.2 нм) [7], для Co/Pt и подобных структур — ~0.85–1.65 нм [8–10]. При этом область толщин <1 нм остаётся слабо исследованной с точки зрения её влияния на ТГц генерацию.

В связи с этим в настоящей работе мы исследуем ТГц генерацию в структуре Pt(2 нм)/Co(x нм)/Si(5 нм) при толщине Co от 0.5 до 1.0 нм. Это позволяет экспериментально определить влияние спин-реориентационного перехода на характеристики ТГц сигнала, установить границу появления "магнитомертвого" слоя и дать физическое объяснение наблюдаемому снижению эффективности излучения в тонких плёнках. Исследование проводилось методом терагерцевой эмиссионной спектроскопии (TES) в геометрии пропускания. Описание экспериментальной установки подробно представлено в работе [11].

В ходе эксперимента было установлено, что критическая толщина слоя Co для ТГц генерации гораздо меньше 0,5 нм, поскольку каждый из исследуемых образцов был способен генерировать ТГц сигнал. Основным механизмом генерации в данных структурах является обратный спиновый эффект Холла. С помощью терагерцевой магнитомерии (TMS) исследовано поведение плоскостной компоненты (in-plane) намагниченности в пленке Co, что после было подтверждено петлями гистерезиса, полученными методом экваториального эффекта Керра. Дополнительно продемонстрирована возможность управления плоскостью поляризации ТГц сигнала в диапазоне 360° при воздействии внешнего магнитного поля величиной до 200 Э при помощи внешнего магнитного поля величиной до 200 Э.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание университету №FSFZ-2025-0002).

- [1] Chen X. et al., *Chem. Phys. Rev.*, **3**, 1, (2022).
- [2] Krügener K. et al., *Appl. Sci.*, **10**, 15, 5166, (2020).
- [3] Song H.-J. et al., *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **12**, 2, 105-117, (2022).
- [4] Seifert T. et al., *Nat. Photonics*, **10**, 7, 483-488, (2016).
- [5] Khusyainov D. et al., *Sci. Rep.*, **11**, 1, 697, (2021).
- [6] Torosyan G. et al., *Sci. Rep.*, **8**, 1, 1311, (2018).
- [7] Allenspach R. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **69**, 23, 3385-3388, (1992).
- [8] Lee J.-W. et al., *Phys. Rev. B*, **66**, 17, 172409, (2002).
- [9] Sun L. et al., *AIP Adv.*, **6**, 5, (2016).
- [10] Shepley P.M. et al., *Sci. Rep.*, **5**, 1, 7921, (2015).
- [11] Buryakov A.M. et al., *Appl. Phys. Lett.*, **123**, 8, 082404, (2023).

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag_2S НА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ НАНОКОМПОЗИТОВ $\text{TiO}_2/\text{Ag}_2\text{S}$

Корнеева А.А., Кондратенко Т.С., Асланов С.В.,
Овчинников О.В., Коновалова А.

Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

hydrakore@yandex.ru

В работе исследовано повышение фотокаталитической активности наночастиц диоксида титана путём их гибридизации с квантовыми точками Ag_2S размерами 2 и 3 нм. Благодаря этому улучшилась эффективность генерации активных форм кислорода.

Ключевые слова: фотокатализ, активные формы кислорода, квантовые точки $\text{Ag}_2\text{S}/2\text{-МРА}$.

В последние годы активно исследуется фотокаталитическая активность и способы ее повышения для материалов на основе наночастиц (НЧ) TiO_2 . В частности, рассматриваются свойства наноконкомпозитов НЧ TiO_2 , сопряженных с квантовыми точками [1], которые обеспечивают улучшение фотокаталитических свойств за счет расширения области спектральной чувствительности и эффективного разделения заряда [2].

В работе рассмотрен вопрос влияния среднего размера КТ Ag_2S , пассивированных молекулами 2-меркаптопропионовой кислотой (2-МРА), на эффективность продуцирования активных форм кислорода (супероксид-анион и перекись водорода) наноконкомпозитами $\text{TiO}_2/\text{Ag}_2\text{S}$ при облучении диодом с длиной волны 590 нм. КТ $\text{Ag}_2\text{S}/2\text{-МРА}$ средними размерами 2 и 3 нм были получены по методике золь-гель синтеза, подробно описанной в [3]. Для измерения концентрации супероксида применяли абсорбционно-спектральный метод, основанный на восстановлении активного центра фермента феррицитохрома С. Для измерения концентрации перекиси водорода применяется люминесцентный сенсорный комплекс на основе красителя AmplexUltraRed и пероксидазы, принцип действия которого основан на механизме окисления субстрата (Amplex) при взаимодействии пероксидазы с перекисью водорода.

Показано, что наносистема, состоящая из наночастиц диоксида титана и КТ Ag_2S , демонстрирует лучшую генерацию АФК при размере КТ 2 нм, чем при размере 3 нм: супероксид-анион продуцируется в 6 раз эффективнее (Рисунок а), перекись водорода – в 8 раз (Рисунок б).

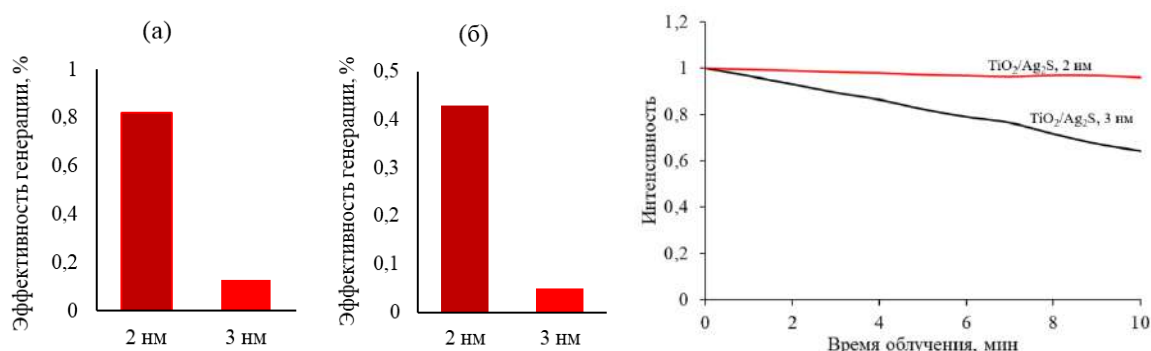


Рисунок. Скорость генерации супероксид-аниона (а) и перекиси водорода (б) с КТ разных размеров; фотостабильность (в) КТ разных размеров

Одной из основных причин более высокой эффективности продуцирования АФК КТ средним размером 2 нм является их фотостабильность под действием облучения. КТ средним размером 3 нм менее эффективны вследствие их фотодеградации (Рисунок в).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2025-455.

[1] Tahir M.B., Tahir I., Rafique M., Sagir M., *Nanotechnology and Photocatalysis for Environmental Applications*, 5, № 1, 65-76 (2020).

[2] Etacheri V., Valentin C. D., Schneider J., Bahnemann D., Pillai S. C., *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 25, 1-29, (2015).

[3] Ismagilov Z.R., Tsikoza L.T., Shikina N.V., Zarytova V.F., Zinoviev V.V., Zagrebelnyi S.N., *Russian Chemical Reviews*, 78, №9, 942-955, (2009).

**КВАЗИНОРМАЛЬНЫЕ МОДЫ
КАК ОСНОВА ДЛЯ ТЕОРИИ РЕЗОНАНСОВ ФАНО
В РАССЕЯНИИ СВЕТА НАНОЧАСТИЦАМИ**

Бочкарев М.Э., Солодовченко Н.С.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
mikhail.bochkarev@metalab.ifmo.ru

С помощью теории квазинормальных мод получены аналитические определения параметра асимметрии Фано и интенсивности резонансных откликов в спектрах рассеяния света на резонаторах произвольной геометрии, в том числе для резонаторов на подложке.

Ключевые слова: квазинормальные моды, резонанс Фано, рассеяние света.

Теория квазинормальных мод является одним из самых продвинутых и активно развивающихся теоретических инструментов в современной фотонике [1]. Данная теория по своей сути адаптирует формализм квантовой механики для решения уравнений Максвелла. Сами квазинормальные моды являются решениями уравнений Максвелла без источников $\tilde{\Psi}_n = [\tilde{\mathbf{H}}_n \quad \tilde{\mathbf{E}}_n]^T$. Данные решения можно находить численно, после чего вся последующая теория становится полностью аналитической. Так, рассеянное электромагнитное поле можно представить в виде суперпозиции собственных состояний системы – квазинормальных мод: $\mathbf{E}_s = \sum_n \alpha_n \tilde{\mathbf{E}}_n$, где α_n – коэффициент возбуждения, который определяется интегралом перекрытия, в соответствии с [1]. Далее, зная рассеянное поле $\mathbf{E}_s$, можно определять любые характеристики, например спектры сечения экстинкции (1).

$$\sigma_{ext} = \omega / (2P_0) \cdot \left(\int_{V_{res}} \Delta \epsilon \mathbf{E}_b^* (\mathbf{E}_s + \mathbf{E}_b) dV \right), \quad (1)$$

где ω – циклическая частота; P_0 – усредненный по времени вектор Пойнтинга для падающего поля; $\Delta \epsilon = \epsilon_0(\epsilon_{res} - \epsilon_b)$ – диэлектрический контраст, который определяется проницаемостями вакуума, резонатора и среды в которой находится резонатор, соответственно; $\mathbf{E}_b$ – фоновое поле в формулировке рассеянного поля, которое соответствует падающей волне в случае отсутствия подложки, или сумме падающей и отраженной волн при наличии подложки. Интегрирование ведется по объему резонатора V_{res} .

Спектры экстинкции (1) характеризуют резонансные свойства частиц и могут быть измерены в эксперименте. При этом здесь наблюдаются асимметричные резонансные линии – знаменитые резонансы Фано, которые активно изучаются в фотонных системах [2]. Для полного описания отдельно взятого резонансного отклика требуется определение четырех характеристик: ω_n – резонансной частоты, Q_n – добротности, q_n – параметра асимметрии Фано, σ_n – интенсивности резонанса. До недавнего времени, аналитических определений двух последних параметров (q_n , σ_n) для любой обратимой системы не существовало.

Нами были выведены аналитические выражения для (q_n , σ_n) без каких-либо приближений (2-4) [3]. Данные уравнения позволяют напрямую рассчитывать интенсивности и параметры асимметрии отдельных резонансов и избавиться от необходимости расчета спектров и применения слепой феноменологической подгонки спектров по формуле Фано.

$$\sigma_n = \omega^2 / (2\gamma_n P_0) \cdot |\xi_n|, \quad (2)$$

$$q_n = -\cot(\arg\{\xi_n\} / 2), \quad (3)$$

$$\xi_n = \left(\int_{V_{res}} \Delta \epsilon \mathbf{E}_b^* \tilde{\mathbf{E}}_n dV \right) \cdot \left(\int_{V_{res}} \Delta \epsilon \mathbf{E}_b \tilde{\mathbf{E}}_n dV \right), \quad (4)$$

где γ_n – соответствует мнимой части резонансной частоты фотонной моды $\tilde{\omega}_n = \omega_n - i\gamma_n$.

Теоретические результаты (2-4) полностью подтверждены экспериментально в микроволновом диапазоне длин волн. Более того, с помощью формулы (3) предсказано и обнаружено нетривиальное поведение резонансных откликов. При особых условиях освещения резонатора полем $\mathbf{E}_b$, может возникать случайное зануление интегралов перекрытия в (4). В данном состоянии система крайне чувствительна к возмущениям. Так, например, малые изменения $\mathbf{E}_b$ (например, изменение угла падения) могут приводить к резким изменениям параметра Фано от $q_n = \pm\infty$ до $q_n = 0$, что соответствует перевороту резонансной линии Лоренца до резонансного симметричного провала в спектре. Данный эффект может быть использован для определения ориентации частиц относительно направления падающего поля $\mathbf{E}_b$ с высокой точностью.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-12-00114).

[1] Lalanne P., Yan W., Vynck K., Sauvan C., Hugonin J.-P., *Laser & Phot. Rev.*, **12**, 1700113, (2018).

[2] Limonov M., Rybin M., Poddubny A., Kivshar Y., *Nature Photonics*, **11**, 543, (2017).

[3] Bochkarev M., Solodovchenko N., Samusev K., Limonov M., Wu T., Lalanne P., *arxiv:2412.11099*, (2024).

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ МОД С ПОМОЩЬЮ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДА СУРЬМЫ

Кабак Е.В.^{1,2}, Колосов Г.А.¹, Шорохов А.С.¹, Федянин А.А.¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

филиал в городе Сарове, г. Саров, Россия

KabakEV@my.msu.ru

Методами численной оптимизации разработаны метаповерхности на основе селенида сурьмы для преобразования оптических волноводных мод, обеспечивающих высокий модовый контраст при изменении фазового состояния материала, что перспективно для энергоэффективных реконфигурируемых интегральных устройств.

Ключевые слова: преобразование мод, материал с фазовым переходом, интегральная метаповерхность.

Материалы с фазовым переходом (МФП) способны поддерживать следующие состояния без затрат энергии на их поддержание: аморфное, кристаллическое и любое промежуточное между ними [1]. Благодаря этим особенностям, открывается возможность создания реконфигурируемых волноводных преобразователей мод, способных эффективно конвертировать одну оптическую моду в другую в одном фазовом состоянии и не вносить значительных изменений в другом. Одним из примеров является преобразователь на основе интегральной метаповерхности из массива наноантенн, изготовленных из сплава германия, сурьмы и теллура (GeSbTe, или GST), где полная конвертация моды происходит в кристаллическом состоянии материала, а в аморфном состоянии конвертация практически отсутствует. Однако, GST в кристаллическом состоянии характеризуется высоким коэффициентом поглощения, что ограничивает использование выходного сигнала в последующих каскадах обработки [2].

Альтернативным подходом к созданию модового преобразователя является использование структуры из широкозонного материала с фазовым переходом [3]. Эта структура может быть реализована либо в виде массива программируемых наноантенн, либо в виде оптимизированного пиксельного рисунка. Применение широкозонного МФП для рабочей длины волны 1.55 мкм позволит существенно снизить поглощение и эффективно использовать выходной оптический сигнал в последующих компонентах системы.

В настоящей работе предлагается концепция устройства на основе широкозонного материала с фазовым переходом – селенида сурьмы. Проведена оптимизация геометрической формы наноантенн метаповерхности с использованием алгоритма SHGO (Simplicial Homology Global Optimization) и пиксельной структуры с помощью генетического алгоритма. Целью оптимизации является максимизация модового контраста при переключении фазового состояния материала. Представлены выходные распределения излучения в зависимости от фазового состояния материала, полученные с помощью численного моделирования методом конечных разностей во временной области. Расчёты показывают, что селенид сурьмы обеспечивает высокий выходной сигнал (до 71%) и пропускание моды первого порядка (37%) в кристаллическом состоянии по сравнению с GST (22% для пропускания моды первого порядка [2]). Полученные результаты могут быть использованы в различных приложениях, включая аналоговые оптические вычисления, а также реконфигурируемые маршрутизаторы для оптических интерконнектов.

[1] Brücknerhoff-Plückelmann F., Feldmann J., Wright D.C., Bhaskaran H., Pernice W.H.P., *J. Appl. Phys.*, **129**, 1-9, (2019).

[2] Wu C., Yu H., Lee S., Peng R., Takeuchi I., and Li, M., *Nat. Commun.*, **12**, 1-8, (2021).

[3] Wei M., Lin X., Xu K., Wu Y., Wang C., Wang Z., Lei K., Bao K., Li J., Li L., Li E. and Lin H., *Nanophotonics*, **13**, 2183-2192, (2024).

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ENZ МЕТАМАТЕРИАЛАХ С НЕЛОКАЛЬНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ОТКЛИКОМ

Доценко А.А.¹, Новиков В.Б.¹, Давиденко Н.К.², Сотничук С.В.²,
Напольский К.С.^{2,3}, Мурзина Т.В.¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет наук о материалах, Москва, Россия

³МГУ им. М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия

dotsenko.a@shg.ru

Продemonстрировано усиление магнитооптической модуляции интенсивности света, проходящего через ENZ метаматериал, состоящий из массива плазмонных наностержней и покрытый слоем ферромагнетика, при его экваториальном намагничивании. Обнаружена ключевая роль нелокальности оптического отклика структуры в рассматриваемом эффекте.

Ключевые слова: ENZ метаматериалы, магнитооптика.

Оптические свойства металл-диэлектрических структур представляют значительный интерес для фундаментальных и прикладных целей фотоники. Так, массивы металлических наностержней в диэлектрической матрице проявляют свойства одноосного кристалла, главные компоненты тензора эффективной диэлектрической проницаемости (ϵ) которого могут иметь противоположные знаки. Эта особенность приводит к гиперболической изочастотной поверхности света в таких структурах, известных как гиперболические метаматериалы (ГММ). Также эти среды имеют спектральную особенность, в которой действительная часть необыкновенной компоненты тензора ϵ обращается в ноль, т.н. epsilon-near-zero (ENZ) режим, привлекательный для усиления нелинейно-оптических эффектов и приложений сенсорики. Из-за малости ϵ эффективный оптический отклик таких структур становится нелокальным. В результате при падении р-поляризованного излучения в метаматериале из плазмонных наностержней помимо главной ТМ-поляризованной волны распространяется т.н. дополнительная световая волна [1]. В ENZ структурах это приводит к новым особенностям пропускания света, связанным с межмодовой интерференцией, что может быть использовано для усиления оптических эффектов [2].

Особый интерес здесь представляет увеличение обычно слабых магнитооптических (МО) эффектов. Ранее в ГММ, совмещённых с магнитными материалами, было обнаружено усиление МО эффектов [3], однако влияние на них нелокальности оптического отклика структур остается неисследованным. Изучению именно этих особенностей в МО отклике анизотропных металл-диэлектрических ENZ метаматериалов посвящена данная работа.

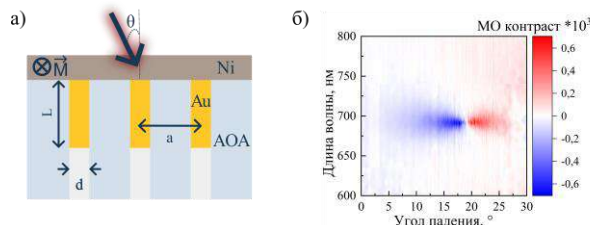


Рисунок. (а) Схема падения света на ENZ метаматериал, (б) измеренная спектрально-угловая карта ρ

Экспериментальная ENZ структура – массив золотых наностержней в матрице анодного оксида алюминия (АОА), покрытый сверху 10 нм слоем никеля (Рисунок (а)). Длина наностержней составляла $L = 1220 \pm 65$ нм, диаметр $d = 30 \div 35$ нм, расстояние между их центрами $a = 95 \div 100$ нм. Для изучения МО свойств структуры были измерены спектрально-угловые зависимости коэффициента пропускания (T) р-поляризованного света при приложении насыщающего экваториального магнитного поля (H) и получен МО контраст пропускания $\rho = (T(H) - T(-H)) / (T(H) + T(-H))$. В спектральной области ENZ-режима метаматериала ($\lambda \approx 695$ нм) обнаружены: (i) усиление ρ до пяти раз по сравнению с однородной плёнкой никеля, нанесенной на АОА, (ii) смена знака ρ при вариации угла падения света (Рисунок (б)).

Расчеты МО контраста пропускания рассматриваемой структуры, выполненные (i) решением граничной задачи для падения света и многомодового распространения излучения в массиве золотых наностержней, а также (ii) методом конечных разностей во временной области, подтверждают (i) наблюдаемый эффект усиления ρ и (ii) ключевую роль нелокальности отклика ENZ метаматериала и межмодовой интерференции главной и дополнительной волн в обнаруженном усилении МО эффекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 19-72-20103). Работа А.А.Д. поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

[1] Pollard R.J. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **102**, №12, 127405, (2023).

[2] Novikov V.B. et al., *Phys. Rev. B*, **106**, №16, 165415, (2022).

[3] Malysheva I.V. et al., *Nanotechnology*, **32**, №30, 305710, (2021).

ПЛАНАРНАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ НА БАЗЕ БЛОХОВСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Парахина П.В., Попкова А.А., Федянин А.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

appoli2003@gmail.com

Усложнение задач машинного обучения требует интенсивного развития нейронных сетей. В данной работе представлено исследование возможности реализации планарной дифракционной нейронной сети на основе блоховских поверхностных волн.

Ключевые слова: оптические дифракционные нейронные сети, блоховские поверхностные волны.

В настоящее время развитие фотонных нейроморфных структур становится популярным и перспективным направлением. Оптические технологии обладают рядом преимуществ перед электронными, таких как высокое быстродействие, низкое энергопотребление и большое количество степеней свободы, в качестве которых можно использовать длину волны, фазу и поляризацию излучения, что позволяет выполнять параллельные вычисления в задачах машинного обучения. Одной из реализаций нейроморфных оптических структур является дифракционная нейронная сеть (ДНС), представляющая собой один или несколько слоев амплитудных и/или фазовых масок, которые состоят из множества пикселей [1]. Пиксельные элементы являются аналогом нейронов в компьютерной сети. Параметры пикселя, такие как показатель преломления и геометрические размеры, задают разность фаз, вносимую в поле излучения, которая выполняет функцию аналогичную синаптическим весам в классических электронных нейронных сетях. Несмотря на многие преимущества, дифракционные нейронные сети с последовательным набором масок достаточно громоздки и требуют точного позиционирования элементов друг относительно друга. В данной работе предлагается концепция планарной архитектуры ДНС на базе блоховских поверхностных волн (БПВ) [2]. Преимуществом таких поверхностных состояний является большая длина свободного распространения [3], достигающая нескольких сантиметров, что может быть объяснено отсутствием омических потерь. Благодаря тому, что поле БПВ локализовано на поверхности фотонного кристалла (ФК) (Рисунок (а)), данные состояния взаимодействуют с поверхностью и хорошо рассеиваются на её неоднородностях, что может быть использовано для реализации оптической нейронной сети. Основой предлагаемой архитектуры является ФК, поддерживающий возбуждение БПВ, на поверхности которого располагаются оптически прозрачные пиксели в форме параллелепипедов. В работе представлено исследование изменения распределения поля БПВ при взаимодействии с одиночным пикселем при варьировании его параметров: высоты, ширины, длины и показателя преломления. Результаты моделирования демонстрируют, что БПВ испытывает дифракцию на одиночном пикселе (Рисунок (б)), при этом изменение ширины пикселя позволяет менять угловую расходимость, отвечающую за связность слоев сети, а изменение высоты/длины определяет вносимый набег фазы, что подтверждает возможность использования БПВ в качестве основы для планарной дифракционной нейронной сети.

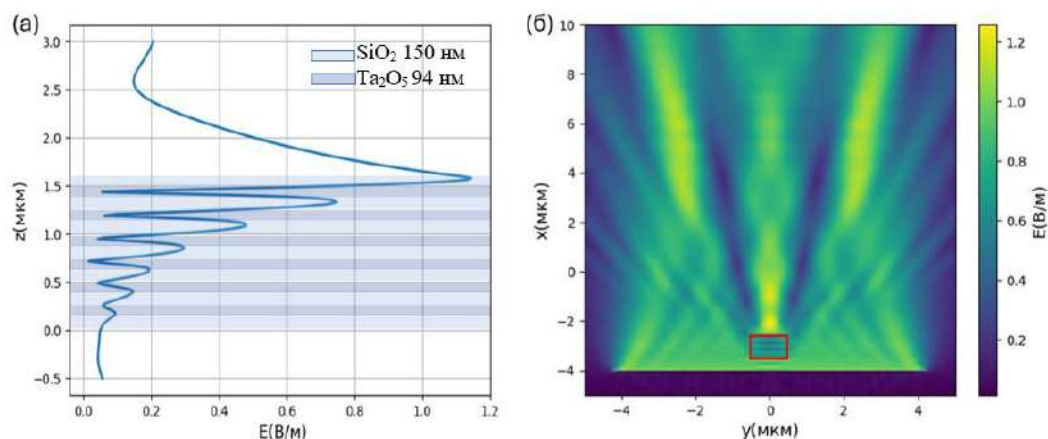


Рисунок. (а) Поперечное распределение напряженности поля БПВ, (б) распределение напряженности поля БПВ на поверхности ФК после взаимодействия с одиночным пикселем с шириной и длиной 1 мкм, высотой 100 нм и показателем преломления 1.5

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-72-00036).

[1] Lin X., et.al., *Science*, **361**, №6406, 1004-1008, (2018).

[2] Yeh P., Yariv A., Cho A., *Appl. Phys. Lett.*, **32**, №2, 104-105, (1978).

[3] Lahijani B.V., et.al., *Advanced Optical Materials*, **10**, №10, 2102854, (2022).

**СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО
ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ДВУМЕРНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ PbSe/PbS**

Клименко Д.И., Черевков С.А., Мирущенко М.Д., Скурлов И.Д.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ohiko27@gmail.com

Исследованы оптические и фотоэлектрические характеристики светодиодных устройств, оптимизированных методом регулирования синтетических процессов двумерных наноструктур, используемых в качестве эмиссионного слоя.

Ключевые слова: светодиод, нанопластины, перовскит.

Полупроводниковые двумерные нанокристаллы благодаря своей морфологии и оптическим свойствам — узким, в сравнении с квантовыми точками, полосам поглощения и фотолюминесценции — являются одним из самых перспективных материалов для создания фотонных устройств, например, светодиодов.

Полупроводниковые двумерные квантовые гетероструктуры типа ядро/оболочка и ядро/крылья PbSe/PbS получены методом катионного обмена в инертной атмосфере из исходных гетероструктур CdSe/CdS [1-3]. Пассивация поверхности двумерных нанокристаллов PbSe/PbS неорганическим перовскитом CsPbCl₃ осуществлялась путем замены олеиновой кислоты и последующего фазового перехода, происшедшего в процессе смешивания неполярного растворителя, содержащего нанопластины (НП) PbSe/PbS, с полярным растворителем, содержащим прекурсоры чернил перовскита [4].

Светоизлучающие диоды с понижающей конверсией (DC-LED) были изготовлены с использованием стандартной структуры, предназначенной для преобразования энергии синего излучения. Для изготовления светоизлучающих диодов использовалась стандартная структура, хорошо зарекомендовавшая себя при производстве как OLED [5], так и светодиодов на основе углеродных точек [6]. В качестве прозрачного анода использовался слой оксида индия-олова (ITO) на стеклянных подложках. На очищенную поверхность ITO был нанесен слой для инжекции дырок (PEDOT:PSS). Все последующие слои осаждались в перчаточном боксе, заполненном азотом. Слой для переноса дырок (PolyTPD) был нанесен методом spin-coating, эмиссионный слой наносили из толуольного раствора. Остальные слои осаждались в вакуумной камере при давлении $1 - 2 \times 10^{-6}$ мбар. В качестве электронно-транспортного/дырочного блокирующего слоя использовался TPBi; был добавлен тонкий слой LiF (~1 нм), чтобы изменить рабочую функцию электронов. В качестве катода был нанесен слой алюминия толщиной 60 – 70 нм.

Сравнение спектров фотолюминесценции НП PbSe/PbS с исходными поверхностными лигандами (ОА) и пассивированных CsPbI₃ показало, что значительное увеличение интенсивности ФЛ и, как следствие, квантового выхода ФЛ, характерно для образцов НП с йодной перовскитной оболочкой. При этом положение полосы ФЛ остается практически неизменным.

Спектры электролюминесценции изготовленных устройств совпадают со спектрами ФЛ и в зависимости от синтеза исходных пассивированных двумерных гетероструктур могут находиться в пределах 1350 – 1600 нм для устройств на основе НП со структурой ядро/крылья и 1500 – 1800 нм для устройств на основе НП со структурой ядро/оболочка.

Энергетическая яркость светодиодов с понижающей конверсией в ИК-области спектра, при токе 1,37 мА, составила 5,5 и 2 кд/м² для устройства на основе НП со структурой ядро/оболочка и для устройства на основе НП со структурой ядро/крылья, соответственно.

Напряжение включения светодиодов со структурой ITO/PEDOT:PSS/Poly-TPD/NP/TPBi/LiF/Al и активным слоем из НП PbSe/PbS со структурой ядро/крылья, пассивированных перовскитом CsPbI₃ составило 3,1±0,2 В, яркость лучшего из полученных устройств — 5 кд/м² при токе 0,16 А.

- [1] Skurlov I.D., Sokolova A.V., Galle T., Cherevков S.A., Ushakova E.V., Baranov A.V., ... & Litvin A.P., *Nanomaterials*, **10**, №12, 2570, (2020).
- [2] Kelestemur Y., Guzelturk B., Erdem O., Olutas M., Gungor K., & Demir H.V., *Advanced Functional Materials*, **26**, №21, 3570-3579, (2016).
- [3] Prudnikau A., Chuvilin A., Artemyev M., *Journal of the American Chemical Society*, **135**, №39, 14476-14479, (2013).
- [4] Zhang X., Zhang J., Phuyal D., Du J., Tian L., Öberg V.A., ... & Johansson E.M., *Advanced Energy Materials*, **8**, №6, 1702049, (2018).
- [5] Kozlov M.I., Kuznetsov K.M., Goloveshkin A.S., Burlakin A., Sandzhieva M., Makarov S.V., ... & Utochnikova V.V., *Materials*, **16**, №3, 959, (2023).
- [6] Cherevков S.A., Stepanidenko E.A., Miruschenko M.D., Zverkov A.M., Mitroshin A.M., Margaryan I.V., ... & Rogach A.L., *Journal of Materials Chemistry*, **12**, №11, 3943-3952, (2024).

РАЗРАБОТКА ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА МЕТОДОМ ДВУХФОТОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛИТОГРАФИИ В ОБЪЕМЕ ПОРИСТОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Печкурова Д.И., Балуян Т.Г., Свяховский С.Е., Федянин А.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

pechkurova.di21@physics.msu.ru

В пористом диоксиде кремния методом двухфотонной лазерной литографии изготовлена параболическая линза. Проведена аттестация с определением оптических характеристик: форма перетяжки пучка после прохождения линзы и фокусное расстояние.

Ключевые слова: двухфотонная лазерная литография, пористый диоксид кремния.

Возникающие в интегральной фотонике новые задачи требуют создания компактных, высокоточных оптических элементов, работающих в видимом диапазоне излучения [1]. Для данного спектрального диапазона особенно перспективно использование полимерных материалов, обладающих прозрачностью. Одним из наиболее эффективных методов формирования трёхмерных полимерных структур является метод двухфотонной лазерной литографии - ДЛЛ [2]. Однако при классическом подходе печати в свободном объеме фотополимера возникает проблема устойчивости объекта и деформации [3], что можно устранить, используя твердотельную матрицу, жестко удерживающую структуры. В качестве такой матрицы удобно использовать пористый диоксид кремния, поскольку он прозрачен в выбранном диапазоне и имеет показатель преломления $\sim 1,14$. В данной работе целью было разработать механизм печати методом ДЛЛ в объеме пористого диоксида кремния, изготовить оптический элемент – параболическую линзу, провести оптический эксперимент для измерения характеристик. Печать проводилась методом ДЛЛ в пористом диоксиде кремния, для которого был экспериментально с помощью явления полного внутреннего отражения определен закон дисперсии, подтвердивший малые значения показателя преломления, и получена средняя пористость среды 69%. В качестве фоторезиста был использован OrmoComp, который является жидким и не требует предварительной обработки. Эти свойства позволяют разместить его в порах матрицы. Для этого применялась вакуумная камера и была измерена скорость проникновения фоторезиста $0,04 \pm 0,01$ мкм/с. Был разработан метод проявки, состоящий в нагревании изопропилового спирта с образцом до 100°C в течение двух часов, обеспечивающий восстановление прозрачности твердотельной матрицы до 97% от изначальной. После этого на установке собственной сборки с фемтосекундным лазером с длительностью импульса 100 фс и центральной длиной волны 780 нм, производилась печать модели параболической линзы с размерами $90 \times 90 \times 15$ мкм. Оптимизация параметров печати показала, что наилучшими характеристиками являются нарезка 3D модели линиями или кольцами шириной и высотой 0.2 микрона при печати на мощности 5 мВт и скорости 1500 мкм/с. Затем была проведена аттестация линзы с помощью линейной установки и подвижного объектива с камерой, на матрице которой происходила визуализация профиля пучка. В качестве источников излучения использовались диод с длиной волны 660 нм. Линза обеспечивает фокусировку света и демонстрирует интерференционные эффекты, зависящие от её внутренней структуры (рисунок). Получены значения фокусного расстояния линзы для диода: $244,4 \pm 2$ мкм и $244,4 \pm 2$ мкм по ортогональным осям. Ширина перетяжки составляет $20,2 \pm 2$ мкм и $17,2 \pm 2$ мкм. Длина перетяжки, определяемая по уровню 10% от минимального значения ширины, составляет $20,7 \pm 2$ мкм и $8,5 \pm 2$ мкм. В ходе работы методом двухфотонной лазерной литографии был успешно изготовлен оптический элемент видимого диапазона – параболическая микролинза, напечатанная непосредственно в объеме пористого диоксида кремния, предварительно насыщенного фоторезистом OrmoComp.

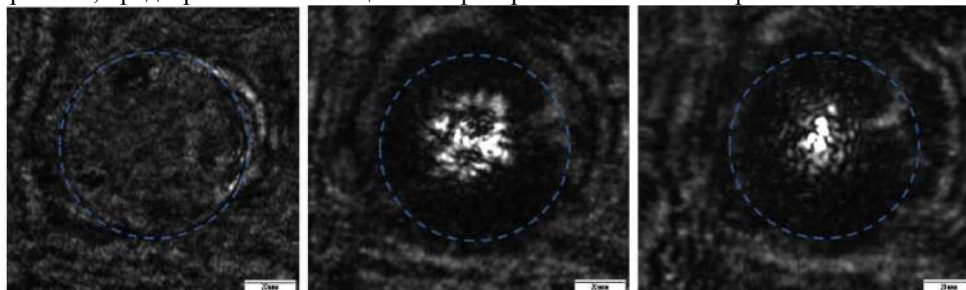


Рисунок. Снимки параболической линзы с камеры при разных расстояниях объектива относительно поверхности

- [1] Willner A.E. et al., *Journal of lightwave technology*, **37**, №1, 21-35, (2018).
- [2] Zhou X., Hou Y., Lin J., *Aip Advances*, **5**, №3, (2015).
- [3] Ovsianikov A. et al., *Optics Express*, **17**, №4, 2143-2148, (2009).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ МОД В ДВУМЕРНОМ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКЕ CrSBr ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Калантаевский И.Э.¹, Горелкина Т.Д.¹, Чернов А.И.^{2,3}, Кравцов В.А.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²МФТИ, Москва, Россия

³РКЦ, Москва, Россия

i.kalantaevskii@metalab.ifmo.ru

Исследованы волноводные экситон-поляритоны в 2D-антиферромагнетике CrSBr с силой осциллятора 2.03 (эВ)^2 . Методом спектроскопии в Фурье-плоскости с использованием линзы твердой иммерсии выявлена сильная связь экситонов с волноводными модами. Результаты открывают новые возможности для создания компактных поляритонных устройств с дополнительными степенями свободы.

Ключевые слова: поляритоника, двумерные материалы, CrSBr.

Сильное взаимодействие свет-вещество может быть достигнуто за счёт связи экситонных резонансов в CrSBr с резонансными оптическими модами в автономных резонаторах, таких как зеркала на основе распределённых брэгговских отражателей [2] или субволновые дифракционные решётки [3]. Несмотря на совместимость с планарными технологиями, такие системы часто требуют сложных процессов изготовления, что ограничивает их перестраиваемость и создаёт трудности для применения в реальных устройствах. В данной работе исследовались волноводные поляритоны в CrSBr, который представляет особый интерес для поляритоники, так как этот материал сочетает в себе большую энергию связи экситонов ($\sim 0.5 \text{ эВ}$) и высокую силу осциллятора (2.03 (эВ)^2) [1]. Поляритонные моды наблюдались с использованием спектроскопии в задней фокальной плоскости микрообъектива с использованием линзы твердой иммерсии. Этот метод позволяет эффективно возбуждать и детектировать поляритонные моды ниже под световым конусом [4].

Мультислой CrSBr был механически отшелушен из объемного кристалла, а затем методом сухого переноса помещен на подложку SiO₂. Толщина волновода, необходимая для формирования единственной оптической волноводной моды, контролировалась с помощью атомной силовой микроскопии. Упрощенная схема эксперимента показана на рисунке а. На рисунке б слева представлен пример экспериментально измеренных спектров отражения, которые показывают антипересечение при $\sim 1.34 \text{ эВ}$, возникающее в результате сильной связи между экситонным резонансом и волноводной модой в CrSBr. Для подтверждения экспериментальных результатов, было проведено моделирование коэффициента отражения с разрешением по углу с использованием метода матриц переноса [5]. Результаты моделирования показаны на рисунке б справа и показывают качественное согласование с численным моделированием.

Полученные в работе результаты обеспечивают основу для будущих исследований волноводных поляритонов в устройствах, полностью изготовленных из ван-дер-ваальсовых 2D-материалов.

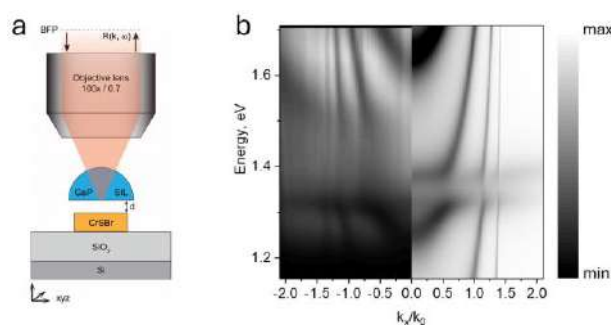


Рисунок. а) Упрощенная схема эксперимента, б) Экспериментально измеренная дисперсия слева, результат моделирования дисперсии справа

[1] Wang T. et al., *Nature Communications*, **14**, №1, 5966, (2023).

[2] Li Q. et al., *Physical Review Letters*, **133**, №26, 266901, (2024).

[3] Li C. et al., *Advanced Functional Materials*, **34**, №51, 2411589, (2024).

[4] Kondratyev V. I. et al., *Nano Letters*, **23**, №17, 7876-7882, (2023).

[5] Mackay T.G., Lakhtakia A., *Synthesis lectures on electromagnetics*, **1**(1), 1-126, (2020).

**ГЕНЕРАЦИЯ ТРЕТЬЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ,
ОБУСЛОВЛЕННАЯ НЕЛИНЕЙНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ
В АСИММЕТРИЧНЫХ КРЕМНИЕВЫХ НАНОДИСКАХ**

Назаренко А.А.^{1,2}, Мусорин А.И.^{1,2}, Попкова А.А.^{2,1}, Шорохов А.С.², Федянин А.А.²

¹Университет МГУ-ППИ в Шэньчжэне, Шэньчжэнь, Китай

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

nazarenko.aa.phys@mail.ru

Асимметричная генерация света в нелинейных метаповерхностях в настоящее время привлекает всё большее внимание, поскольку позволяет миниатюризировать нелинейно-оптические устройства. В данной работе экспериментально продемонстрирована асимметричная генерация третьей гармоники в полупроводниковой метаповерхности.

Ключевые слова: метаповерхности, генерация третьей гармоники, бианизотропия.

Субволновые диэлектрические метаповерхности обладают высоким потенциалом для разработки компактных фотонных устройств, находя применение как в фундаментальных исследованиях, так и на массовом потребительском рынке. Метаповерхности могут быть использованы для управления различными свойствами света, такими как направление, поляризация, фаза или частота, а также для усиления взаимодействия света с веществом за счёт их резонансного взаимодействия [1]. Кроме того, они широко используются в оптическом диапазоне из-за простоты их изготовления на наномасштабах с использованием методов литографии и нанопечати. Диэлектрические метаповерхности имеют преимущества перед плазмонными аналогами благодаря низким омическим потерям и способности поддерживать Ми-резонансы [2]. Изменение размера, формы и других параметров наночастиц позволяет независимо управлять спектральными положениями электрических и магнитных резонансов [3, 4] и изменять диаграмму рассеяния. Так, асимметричная геометрия нанорезонаторов может привести к асимметричной генерации и пропусканию света при изменении взаимного положения источников и приемников [5-9]. Подобные эффекты в настоящее время привлекают все больше внимания, в частности, асимметричный нелинейный отклик в метаповерхностях [5, 6, 8, 9], который обеспечивает возможность миниатюризировать нелинейно-оптические устройства.

В настоящей работе мы экспериментально и численно демонстрируем асимметричную генерацию третьей гармоники в массиве нанорезонаторов с бианизотропным откликом, вызванным нарушением зеркальной симметрии. Изучаемая метаповерхность состоит из периодически расположенных кремниевых нанодисков, помещённых в слой диоксида кремния. В каждом нанодиске имеется цилиндрическое отверстие, протравленное до половины высоты, что создаёт асимметрию в геометрии образца. Данный образец демонстрирует многократное усиление сигнала третьей гармоники, сопровождающееся сильным повышением направленности излучения. При этом его линейный отклик не зависит от положения источника, что следует из принципа взаимности. Полученные результаты открывают возможности для управления нелинейно-оптическим откликом на наноуровне путем подстройки анизотропного поведения нелинейных асимметричных рассеивателей. Они могут быть полезны в различных приложениях, таких как нелинейные диоды, оптическое шифрование, нелинейные QR-коды, а также системы визуализации.

[1] Zhang J., Liu W., Zhu Z., Yuan X., Qin S., *Opt. Express*, **22**(25), 30889-30898, (2014).

[2] Staude I., Schilling, J., *Nat. Photonics*, **11**(5), 274-284, (2017).

[3] Kuznetsov A.I., Miroshnichenko A.E., Fu Y.H., Zhang J., Luk'Yanchuk B., *Sci. Rep.*, **2**(1), 492, (2012).

[4] Staude I., Miroshnichenko A.E., Decker M., Fofang N.T., Liu S., Gonzales E., Dominguez J., Luk T.S., Neshev D.N., Brener I., Kivshar Y., *ACS Nano*, **7**(9), 7824-7832, (2013).

[5] Kruk S.S., Wang L., Sain B., Dong Z., Yang J., Zentgraf T., Kivshar Y., *Nat. Photonics*, **16**(8), 561-565, (2022).

[6] Rocco D., Locatelli A., Carletti L., Vincenti M.A., De Angelis C., *Opt. Express*, **32**(7), 11673-11680, (2024).

[7] Tripathi A., Ugwu C.F., Asadchy V.S., Faniayeu I., Kravchenko I., Fan S., Kivshar Y., Valentine J., Kruk S.S., *Nat. Commun.*, **15**(1), 5077, (2024).

[8] Boroviks S., Kiselev A., Achouri K., Martin O.J., *Nano Lett.*, **23**(8), 3362-3368, (2023).

[9] Mobini E., Alae R., Boyd R. W., Dolgaleva K., *ACS Photonics*, **8**(11), 3234-3240, (2021).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ОДИНОЧНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ЩЕЛЕВЫХ МОДАМИ
ГЕТЕРОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО НАНОДИМЕРА**

Газизов А.Р., Избасарова Э.А.

Институт физики, КФУ, Казань, Россия

eq.u.us.meteores@gmail.com

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования эффекта Парселла для одиночного квантового излучателя, расположенного в зазоре плазмонного нанорезонатора для разных материалов, размеров наночастиц и величины зазора. Установлено, что гетероплазмонный нанорезонатор Au-Ag демонстрирует наибольший коэффициент Парселла в видимой области спектра по сравнению с другими рассмотренными конфигурациями.

Ключевые слова: плазмонные щелевые моды, эффект Парселла, металло-усиленная флуоресценция.

Управление взаимодействием света с веществом на наномасштабном уровне является одной из ключевых задач современной нанофотоники. Плазмонные нанорезонаторы, представляющие собой металлические наноструктуры, способны концентрировать электромагнитное поле в объемах, значительно меньших дифракционного предела. Это свойство находит применение в широком спектре задач, включая оптическую наноспектроскопию [1, 2], создание высокоэффективных оптоэлектронных устройств [3] и исследование нелинейно-оптических эффектов [4, 5]. Металло-усиленная флуоресценция выделяется как перспективное направление фундаментальных и прикладных исследований [6-8]. Основным физическим явлением, лежащим в основе работы таких резонаторов, являясь локализованный плазмонный резонанс (ЛПР) — когерентные коллективные колебания свободных электронов в металлической наночастице под действием внешнего электромагнитного поля [9]. В системах из двух или более близкорасположенных наночастиц (димерах) происходит гибридизация их индивидуальных плазмонных мод. Это приводит к расщеплению резонанса на низкоэнергетическую "связывающую" (bonding) и высокоэнергетическую "разрыхляющую" (antibonding) моды. Связывающая дипольная мода (BDM), также известная как щелевая мода, характеризуется экстремальной концентрацией поля в зазоре между частицами, что создает "горячую точку". Помещение квантового излучателя (например, молекулы или квантовой точки) в такую "горячую точку" приводит к значительному увеличению скорости его спонтанного излучения. Это явление, известное как эффект Парселла, описывается коэффициентом, который показывает, во сколько раз возрастает скорость излучения по сравнению со свободным пространством. Согласно золотому правилу Ферми, скорость перехода излучателя из возбужденного состояния в основное пропорциональна квадрату матричного элемента взаимодействия и локальной плотности оптических состояний $g(\mathbf{r}, \omega)$ [9]. Эффект Парселла как раз и обусловлен аномально высокой локальной плотностью оптических состояний (ЛПОС).

В данной работе проведено численное моделирование этого эффекта для однородных (Au-Au, Ag-Ag, Cu-Cu) и гетерогенных (Au-Cu, Au-Ag) димерных нанорезонаторов. Анализировался коэффициент Парселла в центре зазора между двумя сферическими наночастицами в зависимости от их радиуса (R), расстояния между ними (d) и длины волны излучения.

Нарушение симметрии в гетеродимерах приводит к появлению новых особенностей в спектрах усиления. Комбинация золота и серебра оказалась наиболее эффективной. Данная гетероструктура позволяет объединить преимущества обоих материалов: высокая добротность плазмонного резонанса серебра в сине-зеленой области спектра и широкая плазмонная полоса золота. В результате гетеродимер Au-Ag обеспечивает широкополосное и наибольшее по величине эффект Парселла во всем видимом диапазоне по сравнению с рассмотренными однородными системами.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (Проект FZSM-2025-0004).

- [1] Li G.-C., Zhang Q., Maier S.A., Lei D., *Nanophotonics*, **7**, 1865-1887, (2018).
- [2] Izbasarova E.A., Gazizov A.R., Kharintsev S.S., *J. Opt. Tech.*, **91**, №5, 316-322, (2024).
- [3] Akselrod G.M., Argyropoulos C., Hoang T.B., Vamivakas A.N., Mikkelsen M.H., *Nano Lett.*, **15**, 3578-3584, (2015).
- [4] Kharintsev S.S., Kharitonov A.V., Gazizov A.R., Kazarian S.G., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 3862-3872, (2020).
- [5] Gazizov A.R., Salakhov M.Kh., Kharintsev S.S., *JETP Lett.*, **119**, 668-673, (2023).
- [6] Geddes C.D., Lakowicz J.R., *J. Fluoresc.*, **12**, 121-129, (2002).
- [7] Izbasarova E.A., Gazizov A.R., *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **88**, №12, 1949-1955, (2024).
- [8] Izbasarova E.A., Gazizov A.R., *J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys.*, **18**, №3, 347-357, (2025).
- [9] Novotny L., Hecht B., *Principles of nano-optics*, Cambridge university press, (2012).

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СФЕРИЧЕСКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ InP/ZnSe

Русских К.И., Головатенко А.А., Родина А.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

kirill.russkih99@gmail.com

В рамках восьмизонной модели Кейна исследован энергетический спектр носителей заряда в нанокристаллах InP/ZnSe. Проведено сравнение с экспериментальными данными по однофотонному/двухфотонному возбуждению фотолюминесценции (1-PLE/2-PLE) и дифференциальному поглощению в методе накачка-зондирования.

Ключевые слова: нанокристаллы, модель Кейна, Гамильтониан Латтинжера.

Нанокристаллы (НК) или коллоидные квантовые точки на основе InP активно исследуются в настоящий момент. Меньшая токсичность и большая экологичность в сравнении с Cd - содержащими соединениями, а также возможность создания гетероструктур типа ядро/оболочка на их основе (InP/ZnSe [1, 2] и InP/ZnSe/ZnS [3]) с высоким квантовым выходом делает их перспективным материалом для создания оптоэлектронных приборов [4].

Гетероструктуры на основе InP исследуют как с помощью метода спектроскопии однофотонного и двухфотонного возбуждения фотолюминесценции (1-PLE и 2-PLE) [2, 3], так и измерением спектра дифференциального поглощения с временным разрешением в методе накачка-зондирования [1, 2]. Несмотря на интенсивные экспериментальные исследования, выводы об энергетической структуре носителей заряда в НК InP/ZnSe остаются на настоящий момент противоречивыми. Теоретические расчеты и анализ данных затруднены тем, что величины разрыва зон на границе InP и ZnSe для электронов (U_B^e) и дырок (U_B^h) в этих структурах однозначно не определены. Недавние квантово-химические исследования [5, 6] указывают на возможность влияния конфигурации диполей In-Se и P-Zn на гетероинтерфейсе InP/ZnSe на перераспределение энергетических разрывов зон. Таким образом, вопрос о величине потенциальных барьеров для носителей заряда, энергетической структуре уровней размерного квантования электронов и дырок и идентификации наблюдавшихся экспериментально оптических переходов в исследованных структурах является актуальным.

В данной работе теоретически изучены энергетические спектры носителей заряда в НК InP/ZnSe и InP/ZnSe/ZnS в рамках восьмизонной **kp**-модели в зависимости от высоты потенциальных барьеров. Рассмотрены нижние состояния электрона $1S_e$ (орбитальный момент $l = 0$), $1P_e$ ($l = 1$) и дырки $nS_{3/2}$ ($l = 0, 2$; $n = 1, 2$), $1P_{3/2}$ ($l = 1, 3$) с полным моментом $j = 3/2$, учитывающим спин-орбитальное взаимодействие в валентной зоне. Применение восьмизонной модели Кейна для электрона приводит к зависимости его эффективной массы $m_e(E_l)$ от энергии E_l внутри. Учет такой непараболичности закона дисперсии электрона делает возможным локализацию $1P_e$ уровня внутри ядра InP с энергией ниже дна зоны проводимости ZnSe, что оказывается невозможным в рамках однозонной модели эффективной массы даже при максимально возможном потенциальном барьере U_B^e .

Сравнение энергетического расстояния $1P_e - 1S_e$ в зависимости от U_B^e с экспериментальным значением разницы энергий пиков ~ 350 meV в спектрах 2PLE и 1PLE для НК InP/ZnSe [3] показывает, что двухфотонный переход связан с переходом $1S_{3/2} - 1P_e$. При этом потенциальный барьер U_B^e должен быть близок к разнице запрещенных зон ZnSe и InP, а спектр дырок в НК InP/ZnSe может быть рассмотрен с близким к нулю потенциальным барьером. При этом энергетическое расстояние $1S_{3/2} - 1P_{3/2}$ порядка 10 мэВ. Предложенная интерпретация согласуется с энергетической диаграммой, предложенной в работе [1], однако противоречит интерпретации, сделанной в недавней работе той же группы [2]. Отметим, что выводы работы [2] базируются на теоретическом расчете спектра электронов в рамках однозонной модели эффективной массы, в то время как в нашей работе расчет проведен в рамках восьмизонной модели Кейна.

Исследование выполнено за счёт гранта РФФИ №23-12-00300.

- [1] Velosa F.S et al., *Adv. Opt. Mater.*, **10**, №18, 2200328, (2022).
- [2] Respekta D. et al., *ACS Nano*, **19**, №21, 19831-19840, (2025).
- [3] Tolmachev D.O. et al., *ACS Nano*, **18**, №13, 9378-9388, (2024).
- [4] Won Y.H. et al., *Nature*, **575**, №7784, 634-638, (2019).
- [5] Jeong B.G. et al., *Nat. Mater.*, **21**, №2, 246-252, (2022).
- [6] Cavanaugh P. et al., *J. Chem. Phys.*, **159**, №13, 134704, (2023).

ВЛИЯНИЕ БЛИЖАЙШЕГО ОКРУЖЕНИЯ КВАНТОВЫХ НАНОПЛАСТИН CdSe НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИИ

Болтенко А.В., Ридер М.А., Орлова А.О.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
alexeyboltenko@yandex.ru

В работе представлены результаты исследования эффективности излучательной релаксации в квантовых нанопластинах типа ядро и ядро/крылья, CdSe и CdSe/CdS. Исследована их кинетика люминесценции в коллоидных растворах, слоях на диэлектрической подложке и в составе гибридной структуры на основе восстановленного оксида графена. Проанализировано влияние дефектных состояний на эффективность излучательной релаксации фотовозбуждения в нанопластинах.

Ключевые слова: квантовые нанопластины CdSe и CdSe/CdS, летучие органические соединения, кинетика люминесценции.

Квантовые точки (КТ) – искусственно созданные полупроводниковые люминофоры, которые, в отличие от большинства органических люминофоров, способны люминесцировать в составе слоев и гибридных структур [1]. Это связано с минимизацией эффекта концентрационного тушения и образованию эксимеров и эксиплексов. КТ в виде слоев на подложке все чаще применяются в люминесцентных сенсорах, в связи с увеличением площади контакта с анализируемым веществом и минимизацией влияния растворителя [2]. За счет этого применение КТ в сенсорных приложениях является актуальной задачей.

В последнее время, в сенсорных приложениях, традиционные КТ заменяют НП CdSe, 2D наноструктуры, в которых эффект конфайнмента проявляется только в одном из направлений [3]. За счет большей силы осциллятора и излучения в более узком спектральном диапазоне по сравнению с квантовыми точками НП стали достойной заменой КТ в оптических приложениях [4]. Изменение люминесцентного отклика сенсора возможно за счет увеличения эффективности безызлучательной релаксации, при этом скорость излучательной рекомбинации зависит от структуры нанокристалла. Поэтому именно излучательная константа и закономерности релаксации возбуждения вызывают наибольший интерес при исследовании НП в качестве сенсорных материалов.

Согласно теоретическим представлениям, экситонная люминесценция квантовых НП CdSe при комнатной температуре должна иметь характерное время затухания порядка 1 нс [3]. При этом множество опубликованных данных о кинетике люминесценции квантовых нанопластин и наш собственный опыт показывает явное противоречие между модельными представлениями и экспериментально наблюдаемыми характеристиками временами затухания люминесценции НП.

В работе представлены результаты исследования времен затухания люминесценции двух типов НП CdSe типа ядра, отличающихся толщиной и излучающих в двух спектральных диапазонах, а также НП типа ядро/крылья CdSe/CdS в растворе, слоях и в составе гибридной структуры на основе восстановленного оксида графена.

Проведен анализ изменения квантового выхода люминесценции, характерных времен затухания люминесценции НП при переходе от раствора к слоям, от слоев к гибридной структуре. Выполнен сравнительный анализ люминесцентных свойств НП разного типа в виде слоев на диэлектрической подложке и в составе гибридной структуры.

В результате работы выявлено, что нанопластины различной архитектуры при переходе от коллоидного раствора к слоям и гибридной структуре на основе восстановленного оксида графена демонстрируют разную степень тушения люминесценции, что может свидетельствовать о наличии дополнительных каналов релаксации возбуждения и о разных условиях переноса энергии и заряда между ближайшими НП и от НП к слоям восстановленного оксида графена.

Кинетика затухания люминесценции характеризуется трехэкспоненциальным распадом. Данный тип распада связан с быстрой рекомбинацией через экситонные состояния, безызлучательной рекомбинацией через поверхностные состояния или ловушечные состояния, уровни энергии которых лежат глубоко в запрещенной зоне НП. Анализ кинетики затухания люминесценции исследованных в работе НП CdSe показал, что увеличение толщины НП от 4,5 до 8 монослоев сопровождается увеличением времени жизни люминесценции. При этом формирование структуры типа ядро/крылья позволяет значительно уменьшить число ловушечных состояний в сравнении с НП типа ядро, что сопровождается сокращением среднего времени затухания люминесценции до 3 нс и увеличением квантового выхода люминесценции с 8% до 25%.

[1] Molaei M.J., *Anal. Methods*, **12**, №10, 1266-1287, (2020).

[2] Lesiak A., Drzozga K., Cabaj J., Bański M., Malecha K., Podhorodecki A., *Nanomaterials*, **9**, №2, 192, (2019).

[3] Yang Y, *IEEE Trans. Nanotechnology*, **18**, 220-225, (2019).

[4] Zhang J., etc., *Chem. Mater*, **32**, №22, 9490-9507, (2020).

СОЗДАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕГРАТОРОВ И ДИФФЕРЕНЦИАТОРОВ ОГИБАЮЩЕЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ СИГНАЛОВ С ШИРОКИМ РАБОЧИМ ДИАПАЗОНОМ НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Емельянцева П.С., Свяховский С.Е.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

emelyantsev97@mail.ru

Теоретически и экспериментально показана возможность создания одномерных фотонных кристаллов, выполняющих интегрирование и дифференцирование огибающей фемтосекундного импульса первого и высших порядков в широком спектральном диапазоне.

Ключевые слова: оптические дифференциаторы, оптические интеграторы, одномерные фотонные кристаллы.

Одной из наиболее актуальных задач современной экспериментальной оптики является задача прямой обработки оптических сигналов. Над аналоговыми оптическими сигналами могут выполняться математические операции, такие как дифференцирование и интегрирование [1]. Все известные исследования в области разработки оптических интеграторов и дифференциаторов опираются на известные спектральные свойства различных фотонных структур, в том числе брэгговских.

Мы представляем способ реализации оптических интеграторов и дифференциаторов на основе одномерных фотонных кристаллов (ФК) из пористого кремния. Из свойств производной спектра фемтосекундного импульса можно сделать вывод, что спектры структур, осуществляющих дифференцирование и интегрирование N-ой степени, должны иметь вид:

$$r_{d,N} = (i\omega)^N, \quad (1)$$

$$r_{i,N} = \frac{1}{(i\omega)^N}. \quad (2)$$

Структуры ФК со спектральными откликами (1) и (2) получались при помощи оригинального метода решения обратной задачи восстановления структуры ФК по заданным параметрам, описанного в работе [2]. Более подробно вопросы создания оптических интеграторов и дифференциаторов обсуждаются в работе [3].

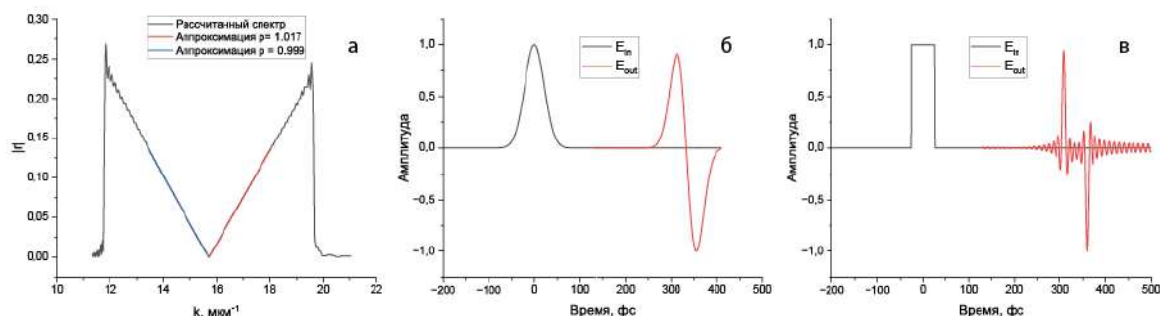


Рисунок. (а) спектральный отклик одномерного ФК, осуществляющего дифференцирование поля 1 степени; примеры дифференцирования сигналов для падающего (б) гауссова; (в) прямоугольного импульсов.

Спектральный отклик по амплитуде одномерного ФК, осуществляющего дифференцирование сигналов первой степени, а также временные профили падающих и отраженных от этого ФК фемтосекундных импульсов приведены на рисунке. Максимально достигнутые с помощью таких ФК степени дифференцирования и интегрирования составили 6 и 2, соответственно.

Разработанные оптические устройства из пористого кремния компактны, просты в производстве и имеют значительно более широкий рабочий диапазон, чем у аналогов. Изготовление опытных образцов осуществлялось при помощи метода электрохимического травления кремния. Данный метод позволяет обеспечить высокое разрешения по толщине слоев одномерного ФК и достаточную толщину структуры, необходимых для реализации метода решения обратной задачи, описанного в работе [2].

[1] Bykov D.A., Doskolovich L.L., Soifer V.A., *JETP*, **114**, 724-730, (2012).

[2] Emelyantsev P.S., Pyshkov N.I., Svyakhovskiy S.E., *JETP Letters*, **117**, №11, 821-826, (2023).

[3] Емельянцева П.С., Свяховский С.Е., *ЖЭТФ*, **166**, №3, 1-11, (2024).

ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag_2S В ПРИСУТСТВИИ МОЛЕКУЛ ТЕТРАЦИКЛИНОВОЙ ГРУППЫ

Зябкина М.М., Кондратенко Т.С., Чевычелова Т.А.,
Лачинов Д.А., Овчинников О.В.

Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

zyabkina.2002@mail.ru

Рассматривается влияние молекул антибиотика окситетрациклина на люминесцентные свойства коллоидных квантовых точек Ag_2S , пассивированных молекулами тиокарбоновых кислот. Наблюдаемые закономерности объясняются влиянием антибиотика на центры рекомбинационной люминесценции квантовых точек.

Ключевые слова: квантовые точки, окситетрациклин, спектры люминесценции.

Перспективным рецептором в люминесцентной сенсорике признаются полупроводниковые коллоидные квантовые точки (КТ) [1, 3]. Для разработки люминесцентных на основе КТ сенсоров детектирования антибиотиков в различных средах (вода, молоко и др.) актуальным является решение фундаментального вопроса взаимодействия молекул антибиотика с рецептором и его проявление в спектрально-люминесцентных свойствах, что достаточно специфично и требует выяснения закономерностей и природы их проявления в каждом конкретном случае [1-3]. В настоящей работе рассмотрено влияние молекул антибиотика тетрациклиновой группы окситетрациклина (ОСТ) на люминесцентные свойства коллоидных КТ Ag_2S , пассивированных молекулами тиокарбоновых кислот (тиогликолевой - КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ и L-цистеина - КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{L-Cys}$), средним размером 2.5 нм, полученных по методике, подробно описанной в [4].

Исследования выполнены абсорбционными и люминесцентными методами с использованием спектрометра USB2000+ (OceanOptics, USA) и спектрально-люминесцентного комплекса на базе дифракционного монохроматора МДР-4 (ЛОМО, Россия).

На рисунке представлены спектры люминесценции исследуемых образцов, возбуждаемой излучением с длиной волны 405 нм.

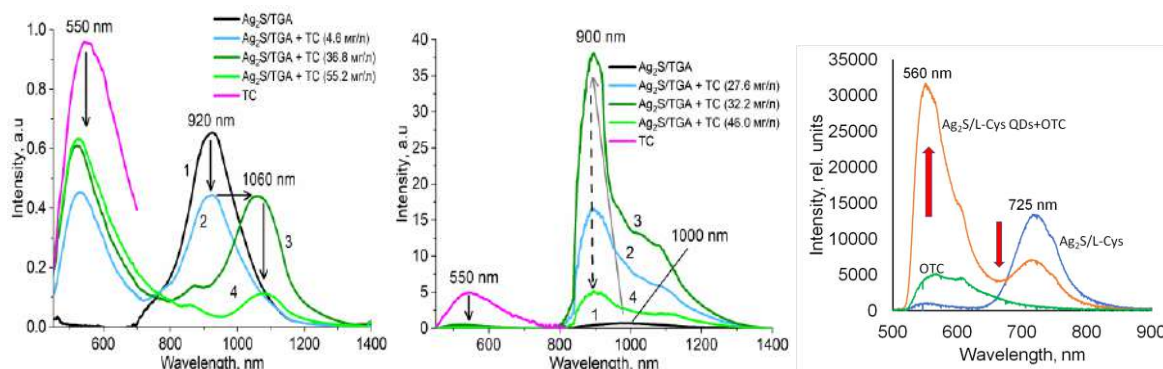


Рисунок. Спектры люминесценции КТ Ag_2S в присутствии молекул ОТС

В присутствии молекул окситетрациклина (ОТС) наблюдается трансформация спектров люминесценции КТ: для КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$, имеющих пик люминесценции в области 1000 нм, наблюдается увеличение интенсивности свечения в 10 раз и смещение максимума полосы в коротковолновую область; для $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$, имеющих пик люминесценции в области 920 нм, наблюдается тушение этой полосы люминесценции и появление новой полосы при дальнейшем увеличении концентрации ОТС, при этом, в области свечения ОТС (550 нм) интенсивность люминесценции снижается. Для КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{L-Cys}$ наблюдается тушение люминесценции в полосе КТ (725 нм) и увеличение интенсивности свечения в полосе антибиотика (550 нм). Наблюдаемые закономерности обусловлены влиянием ОТС на центры рекомбинационной люминесценции КТ Ag_2S , которая имеет интерфейсную природу. Полученные результаты указывают на возможность практического применения коллоидного раствора КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ в качестве люминесцентного рецептора на присутствие в растворе антибиотиков тетрациклинового ряда.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00668).

- [1] Anand S.K., *Spectrochimica Acta Part A*, **213**, 410-415, (2019).
- [2] Бузмакова У.А., *Вестник Пермского университета. Серия «Химия»*, **8**, №1, 6-28, (2018).
- [3] Oladipo A.A., Oskouei S.D and Gazi M., Beilstein J., *Nanotechnol.*, **14**, 631-673, (2023).
- [4] Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., *Journal of Luminescence*, **227**, №117526, 1-8, (2020).

**ОПТИЧЕСКАЯ МОДУЛЯЦИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В ДИХАЛЬКОГЕНИДАХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ WSe_2 , WS_2 И $MoSe_2$**

**Лебедева Е.Д., Авдеев П.Ю., Алферьев А.Л., Кузнецов К.Г.,
Булавинцева Е.А., Буряков А.М., Мишина Е.Д.**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

lebedeva_ed@mirea.ru

Проведено сравнительное исследование оптической модуляции ТГц-сигнала структурами дихалькогенидов переходных металлов (WSe_2 , WS_2 и $MoSe_2$), полученных методом жидкофазной эксфолиации. Достигнуто значение модуляции ТГц сигнала до 5% при использовании непрерывного лазерного излучения на длине волны 532 нм.

Ключевые слова: дихалькогениды переходных металлов, терагерцевая модуляция, двумерные материалы.

Развитие технологий терагерцового (ТГц) диапазона требует создания эффективных модуляторов, пригодных для интеграции в компактные и быстродействующие устройства. В последние годы активное внимание привлекают двумерные полупроводники семейства дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), таких как MoS_2 , WS_2 , WSe_2 и $MoSe_2$. Благодаря высокой подвижности носителей заряда, широкой запрещенной зонной и сильному взаимодействию с внешними полями, эти материалы демонстрируют необходимые характеристики в задачах оптической модуляции. Предыдущие исследования [1-5] показали, что воздействие на ДПМ короткими лазерными импульсами или непрерывным излучением приводит к изменению их проводимости, что, в свою очередь, влияет на прохождение ТГц-сигнала. Однако сравнительный эксперимент при идентичных условиях для различных ДПМ выполнен впервые, что делает данную работу актуальной для оценки их практического потенциала.

Эксперимент проводился на установке THz-TDS, использующей кристалл $ZnTe$ в качестве источника ТГц-излучения с амплитудой поля порядка 130 кВ/см. Детектирование сигнала осуществлялось в кристалле $ZnTe$ с ориентацией $(\bar{1}10)$. Оптическое воздействие на образцы модуляторов осуществлялось фемтосекундным импульсным лазером (525 нм, 50 фс, 80 МГц, плотность энергии 128 нДж/см²), а также непрерывным лазером с длиной волны 532 нм и регулируемой мощностью до 300 мВт. Диаметр оптического пучка на полувысоте интенсивности составлял 2.8 мм, в то время как диаметр ТГц-пучка — около 2.5 мм.

В качестве исследуемых образцов использовались структуры ДПМ (WSe_2 , WS_2 , $MoSe_2$), полученные методом жидкофазной эксфолиации на подложки из высокоомного кремния, чистая кремниевая подложка и объемный кристалл WSe_2 . Чистая кремниевая подложка использовалась в качестве контрольного образца и демонстрировала глубину модуляции ТГц-сигнала порядка 3%. Объемный кристалл WSe_2 показал более выраженный эффект — до 4.5%. Среди тонкопленочных ДПМ-флейков наибольшая модуляция была зафиксирована у $MoSe_2$ — до 5% изменения амплитуды ТГц-сигнала при облучении. Образцы на основе WSe_2 и WS_2 продемонстрировали сопоставимые значения — 4.5% и 4%, соответственно. Все структуры сохраняли стабильную работу на протяжении многократных циклов оптической модуляции без признаков деградации.

Полученные результаты подтверждают, что даже при использовании непрерывного лазера возможно добиться устойчивой модуляции ТГц-излучения за счёт возбуждения носителей заряда в ДПМ. Это делает такие структуры перспективными кандидатами для создания компактных, бесконтактных и управляемых ТГц-модуляторов. Перспективные области применения включают неразрушающий контроль, визуализацию скрытых объектов, биомедицинскую диагностику и развитие систем ТГц-коммуникации, включая прототипы терагерцовой связи ближнего действия [6, 7].

Исследование выполнено при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 24-79-10302).

- [1] Ma Z.T. et al., *Research*, **2019**, 22 pages, (2019).
- [2] Gopalan P. et al., *Adv. Opt. Mater.*, **8**, 3, (2020).
- [3] Yang D.-S. et al., *Opt. Express*, **25**, 14, 16364, (2017).
- [4] Cao Y. et al., *Sci. Rep.*, **6**, 1, 22899, (2016).
- [5] Jakhar A. et al., *Nano Express*, **2**, 4, 040004, (2021).
- [6] Jiang W. et al., *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 1-1, (2024).
- [7] Chen X. et al., *Chem. Phys. Rev.*, **3**, 1, (2022).

ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ФОТОНИКИ

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$, ЛЕГИРОВАННЫХ ИНДИЕМ

Ружевич М.С.¹, Мынбаев К.Д.^{1,2}, Баженов Н.Л.², Дорогов М.В.¹, Балашов В.С.¹,
Варавин В.С.³, Ремесник В.Г.³, Ужаков И.Н.³, Михайлов Н.Н.³

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

³ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

max.ruzhevich@niuitmo.ru

Приведены результаты исследований легированных индием пленок $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией. Установлено, что умеренное легирование повышает устойчивость свойств материала к отжигу и формирует донорный уровень с энергией ионизации 10–12 мэВ.

Ключевые слова: теллуриды кадмия-ртути, легирование, дефекты.

Твердые растворы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ) с содержанием CdTe (составом) $x \approx 0.7$ востребованы при разработке фотодиодов ближнего инфракрасного диапазона для астрономических наблюдений [1] и при создании барьерных слоев лазерных структур [2]. Для изготовления этих приборов необходим материал n -типа проводимости с заданным уровнем легирования. Традиционным вариантом для КРТ с $x < 0.5$ является легирование индием (In). К преимуществам In как донорной примеси, в частности, при выращивании КРТ методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), относятся высокая электрическая активность и отсутствие электрической компенсации, проявляющейся только при концентрации примеси $C_{\text{In}} > 10^{18} \text{ см}^{-3}$. На данный момент, однако, результаты исследований легирования индием КРТ с $x > 0.5$, выращенных методом МЛЭ, практически отсутствуют. В работе будут представлены результаты исследований оптических свойств эпитаксиальных пленок (ЭП) $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$, легированных In в диапазоне $C_{\text{In}} = 10^{16}–10^{18} \text{ см}^{-3}$, в том числе, после различных видов отжига.

ЭП с $x \approx 0.7$ и толщиной $\sim 3 \text{ мкм}$ были выращены на подложках (013)GaAs в ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН [3]. Величина C_{In} задавалась изменением температуры источника In. Свойства пленок изучались методами оптического отражения (ОО) и оптического пропускания (ОП) при температуре $T = 293 \text{ К}$ и фотолуминесценции (ФЛ) в диапазоне температур $T = 4.2–293 \text{ К}$.

Положение пиков E_I и $E_I + \Delta$ на спектрах ОО соответствовало заявленным составам пленок, при этом их малая интенсивность и размытость свидетельствовали о некотором разупорядочении структуры на поверхности. Нормированные спектры ФЛ исследованных ЭП при температуре $T = 4.2 \text{ К}$ приведены на рисунке. При $C_{\text{In}} \geq 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в них появлялась низкоэнергетическая полоса, свидетельствующая об образовании донорного уровня с энергией ионизации 10–12 мэВ; при $C_{\text{In}} > 10^{18} \text{ см}^{-3}$ происходило размытие этой полосы, связанное, по-видимому, с генерацией дополнительных дефектов.

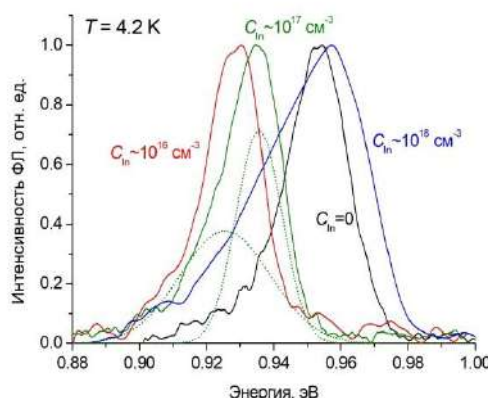


Рисунок. Спектры ФЛ ЭП при $T = 4.2 \text{ К}$ с разложением спектра пленки с $C_{\text{In}} \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$

Для умеренно легированных ЭП по данным ОП и ФЛ после термических отжигов наблюдалась неизменность их химического состава и уменьшение степени разупорядочения твердого раствора. Нелегированные и сильно ($C_{\text{In}} > 10^{18} \text{ см}^{-3}$) легированные ЭП выказывали существенное изменение оптических свойств после отжигов. В докладе будут обсуждаться физические процессы, происходящие в КРТ $x \approx 0.7$ при легировании индием и последующей термообработке материала.

[1] Boltar K.O., Yakovleva N.I., *J. Commun. Technol. Electron.*, **69**, №4-6, 173, (2024).

[2] Rumyantsev V.V., Mazhukina K.A., et al., *Appl. Phys. Lett.*, **124**, №16, 161111, (2024).

[3] Швеиц В.А., Михайлов Н.Н., Икусов Д.Г., и др., *Опт. и спектр.*, **127**, №8, 318-324, (2019).

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ ЛЮМИНОФОРА С АНОМАЛЬНО БОЛЬШИМ СТОКСОВЫМ СДВИГОМ

Парфёнова Е.В.¹, Слюсаренко Н.В.¹, Раджарамакришна Р.², Слюсарева Е.А.¹

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

sci_box@mail.ru

Продemonстрирована возможность управления люминесценцией люминофора, реализующего механизм переноса протона в возбужденном состоянии в присутствии наночастиц золота.

Ключевые слова: внутримолекулярный перенос протона в возбужденном состоянии, аномально большой стоксов сдвиг, люминесценция.

Люминофоры с аномально большим стоксовым сдвигом бесцветны при дневном освещении и способны давать яркое свечение в видимой области, не испытывая при этом перепоглощения собственного излучения из-за отсутствия антистоксовой области. Предпосылкой тому является внутримолекулярный перенос протона в возбужденном состоянии (ВППВС), при котором происходит быстрая фототаутомеризация возбужденного состояния молекулы-люминофора [1]. ВППВС может быть чувствителен к изменению параметров окружения, что позволяет использовать их в качестве сенсоров [2]. Особенностью таких соединений являются невысокие квантовые выходы в воде. Решить данную проблему возможно при помощи помещения люминофоров в твердые матрицы, что не всегда бывает обоснованно. Другим решением может быть применение металлических наночастиц, которые способны усиливать электромагнитное поле своей поверхности благодаря локализованному плазмонному резонансу [3].

Целью работы было исследование влияния наночастиц золота (Au) на спектральные свойства динамической соли 3-(1,3-бензотиазол-2-ил)-4-({4-хлор-6-[(3-сульфенил)амино]1,3,5-триазин-2-ил}амино)бензолсульфокислоты (Рисунок (а)) в водном растворе. Люминофор предоставлен ООО Фирма «ОЛБО».

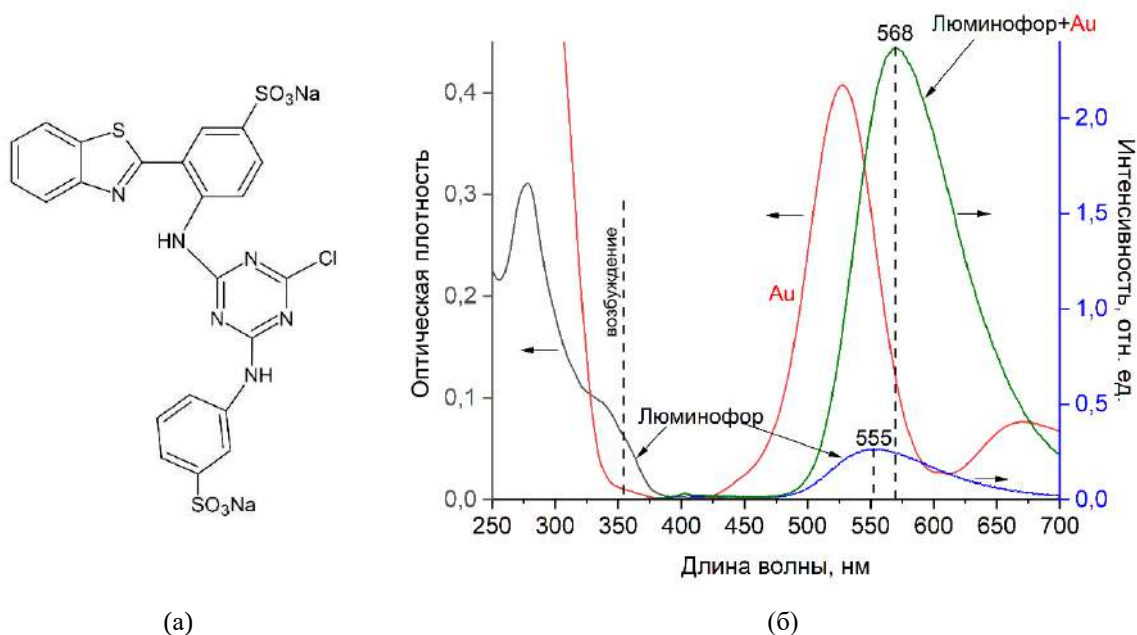


Рисунок. Структурная формула люминофора (а) спектры поглощения и флуоресценции (б)

На рисунке (б) показаны спектры поглощения и люминесценции люминофора, наночастиц золота и люминофора в присутствии наночастиц золота. В присутствии наночастиц происходит значительное увеличение квантового выхода люминесценции и красный сдвиг спектра. Удалось получить усиление интенсивности люминесценции люминофора в 9,5 раз, при этом значение квантового выхода люминесценции выросло с 5 до 30%, а батохромный сдвиг достигал 13 нм. Данный подход может в дальнейшем использоваться не только для настройки спектральных свойств люминофоров, но и для увеличения спектральной чувствительности оптических сенсоров на основе внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии.

[1] Udhayakumari D., Jerome P., Vijay N., Oh T.H., *Journal of Luminescence*, **267**, 120350, (2024).

[2] Li J-F., Li C-Y., Aroca R.F., *Chem. Soc. Rev.*, **46**, 3962-3979, (2017).

[3] Sedgwick A.C., Wu L., Han H. et.al., *Chem. Soc. Rev.*, **47**, 8842-8880, (2018).

**ПРОТОНООБМЕННЫЕ СЛОИ В СМЕШАННЫХ КРИСТАЛЛАХ
ТВЕРДОГО РАСТВОРА НИОБАТА-ТАНТАЛА ЛИТИЯ**

Сосунов А.В., Петухов И.В., Мясникова Е.В., Масалкин Д.Н.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

avsosunov@psu.ru

Работа посвящена изучению структуры и свойств протонобменных волноводных слоев в смешанных кристаллах ниобата-тантала лития. Определены основные закономерности и особенности, происходящие в ходе прямого протонного обмена, а также изучены структурно-фазовые превращения, происходящие в ходе отжига. Полученные результаты являются основой для формирования канальных волноводов и дальнейшей оценке перспектив применения в области нелинейной и интегральной фотоники.

Ключевые слова: оптические материалы, протонный обмен, волновод.

Смешанные кристаллы ниобата-тантала лития (ЛНТ) представляют собой новую систему твердых растворов, которая обещает новые возможности в интегральной и нелинейной фотонике. Протонный обмен является одним из наиболее широко используемых методов создания оптических волноводов [1], диэлектрических слоев и активации поверхности [2]. Данная работа посвящена изучению структуры и свойств кристаллов ЛНТ X- и Z-среза в результате протонного обмена с последующим отжигом.

Смешанные кристаллы были выращены методом Чохральского в институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов (Черноголовка). В качестве исследуемых образцов использовали $\text{LiNb}_{0.97}\text{Ta}_{0.03}\text{O}_3$ X- и Z-срезов. Протонный обмен проводили в закрытом циркониевом реакторе при температурах от 190 до 210 °С в течение 2 часов в расплаве чистой бензойной кислоты с последующим высокотемпературным отжигом на воздухе при температурах 350-370 °С.

Структура и свойства протонных обменных слоев в образцах X- и Z-среза были систематически изучены с использованием различных структурных и интегрально-оптических методов: оптическая микроскопия, рентгеновская дифракция, ИК-спектроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, призмный ввод излучения, рентгенофлуоресцентный элементный анализ.

Прямой протонный обмен приводит к образованию волноводного слоя со ступенчатым профилем показателя преломления. Граница волновод-подложка четкая (не размыта). На этой границе параметры кристаллической решетки резко изменяются. Протонный обмен приводит к образованию деформационных двойников и поверхностному повреждению кристаллической структуры образцов ЛНТ. Результаты фазового анализа образцов свидетельствуют о наличии β -фаз с высокими степенями деформации кристаллической решетки. Рассчитанные кинетические параметры диффузии протонов в кристаллах ЛНТ существенно ниже, чем для кристаллов ниобата лития, что обусловлено как примесью тантала, так и большей разупорядоченностью кристаллической решетки, что приводит к уменьшению приращения показателя преломления. Полученные результаты дают физическую основу диффузионного процесса в твердых растворах ЛНТ [3].

Установлено, что для образцов обоих срезов ЛНТ при отжиге реализуется последовательность фазовых переходов $\beta \rightarrow \kappa \rightarrow \alpha$. Определены как диапазоны содержания протонов, так и диапазоны приращения показателя преломления промежуточных фаз. Для кристаллов ЛНТ X-среза процесс превращения из κ_2 в κ_1 -фазу происходит с образованием необычного упорядоченного рисунка на поверхности. При этом протоны не перемещаются вглубь кристалла и показатель преломления не изменяется. Для Z-среза ЛНТ такие особенности не наблюдаются из-за меньших деформаций кристаллической решетки при отжиге. Промежуточные фазы характеризуются более высокими частотами колебаний ОН-групп, чем у протонобменных слоев ниобата лития при отжиге. Это связано с более короткими «в плоскости» ОН-связями из-за несколько иного состава и структуры ЛНТ. Полученные результаты будут способствовать предсказуемости оптических и структурных характеристик протонобменных слоев в твердых растворах ЛНТ для различных применений [4, 5].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края [грант №24-22-20097].

[1] Cai L., Kang Y., Hu H., *Opt. Express*, **24**, 4640-4647, (2016).

[2] Du Y., Pang Z., Zou Y., et al., *Chemical Engineering Journal*, **496**, 154046, (2024).

[3] Sosunov A., Petukhov I., Kornilicyn A., Mololkin A., et. al., *Solid State Ionics*, **417**, 116692, (2024).

[4] Sosunov A., Petukhov I., Myasnikova E., Kornilicyn A., et. al., *Materials Today Communications*, **43**, 111840-6, (2025).

[5] Мясникова Е.В., Петухов И.В., Кунева М., Сосунов А.В., *тезисы докладов Всероссийской научной конференции с международным участием «Енисейская фотоника»*, **1**, 74-75, (2024).

СПЕКТРЫ ЭКСИТОНОПОДОБНЫХ И ПОЛЯРИТОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В НАНОРЕШЕТКАХ МИКРОПОР С ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ

Безус Ю.А., Федоров С.А.

ФГБНУ ДОНФТИ, г. Донецк, ДНР, Россия

paladyan0108@yandex.ru

Исследованы особенности спектра экситоноподобных и поляритонных возбуждений для гексагональных решеток микропор. Выявлено, что законы дисперсии для данных систем имеют сложный характер, значительно большее число топологических особенностей, чем такие же системы с квадратной решеткой.

Ключевые слова: гексагональная решетка, экситоноподобные возбуждения, поляритонные возбуждения.

В настоящее время имеется значительное число работ посвященных исследованиям особенностей оптических свойств фотонных структур, связанных с медленным светом. Актуальность таких исследований обусловлена как современным уровнем развития нанофотоники [1, 2], так и необходимостью разработки и проектирования различных квантово-оптических запоминающих устройств. Важным физическим явлением при этом является эффективное снижение групповой скорости света, которое было продемонстрировано в оптических волноводных резонаторах, а также в различных типах твердотельных полупроводниковых многослойных структурах, и, как следствие, численное моделирование характеристик электромагнитных волн в таких системах представляет особый интерес как с прикладной, так и с теоретической точки зрения современной фотоники.

Применительно к топологически упорядоченным нанокристаллическим массивам микропор решение указанных проблем предполагает известными состояния экситоноподобных и поляритонных возбуждений и их дисперсионных характеристик [2-4]. Методика расчета квазичастичных состояний соответствующих объектов разработана в работах [2, 3], где изучались нанокристаллические системы с квадратной решеткой.

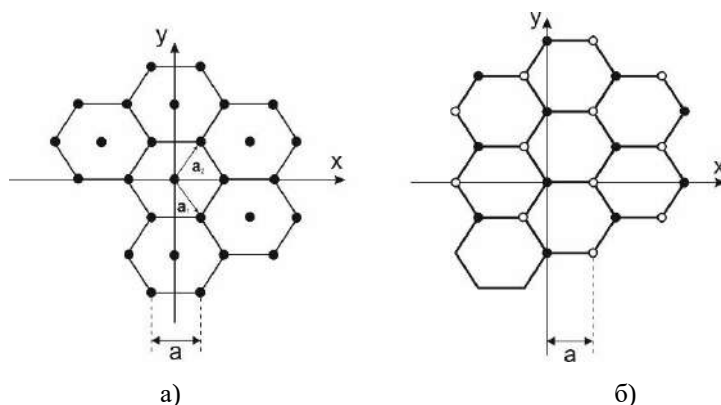


Рисунок. Нанокристаллическая одноподрешоточная (а) и двухподрешоточная (б) фотонная система микропор с гексагональной симметрией

В настоящей работе исследуются квазичастичные состояния в неидеальных одно- и двухподрешоточных массивах микропор с гексагональной решеткой. Для одноподрешоточной системы (рисунок а) предметом исследования выбраны поляритонные возбуждения в системе микропор с квантовыми точками. В тоже время для двухподрешоточных систем рассмотрены экситоноподобные возбуждения без квантовых точек (рисунок б). Выполнен расчет спектров как для идеальных нанорешеток, так и для систем с точечными дефектами. Нахождение энергий соответствующих квазичастичных возбуждений осуществлялось с использованием аппарата усредненных функций Грина и приближением виртуального кристалла [2-4]. Компьютерное моделирование позволило получить дисперсионные (в пределах первой зоны Бриллюэна) и концентрационные зависимости энергий соответствующих возбуждений.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что функциональные характеристики пористых материалов могут быть существенно улучшены посредством целенаправленного введения структурных дефектов и за счет модификации симметрии нанорешеток Браве. Эти подходы открывают новые возможности для управления их свойствами на уровне наномасштаба [4].

[1] Lodahl P. *Quantum Science and Technology*, **3**, 013001, (2018).

[2] Rumyantsev V., Fedorov S. et al., *Scientific Reports*, **4**, 06945, (2014).

[3] Румянцев В.В., Федоров С.А. и др. *ЖТФ*, **90**, вып. 5, 850-855, (2020).

[4] Румянцев В.В., Безус Ю.А. и др. *ФТВД*, **35**, №1, 44-51, (2025).

**АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ – ИНСТРУМЕНТ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДНК-ОРИГАМИ НАНОСТРУКТУР**

**Магарян К.А.¹, Аржанов А.И.^{1,2}, Егорова Т.В.¹,
Степанов М.Е.¹, Наумов А.В.^{1,2}, Хохрякова У.А.¹**

¹Московский педагогический государственный университет (МПГУ), Москва, Россия

²Троицкое обособленное подразделение ФИАН им. П.Н. Лебедева, Троицк, Москва, Россия
MagaryanKA@my.msu.ru

Рассмотрен метод сборки коммерчески доступных ДНК-оригами наноструктур и их анализа с использованием атомно-силового микроскопа. Обсуждаются стабильность структуры и возможности дальнейшего использования наноструктур.

Ключевые слова: ДНК-оригами, атомно-силовая микроскопия, наноструктуры, фотоника.

С появлением техники ДНК-оригами стало возможным быстро синтезировать молекулярные наноструктуры практически любой формы. Этот метод также обеспечивает субнанометровую точность позиционирования, что делает ДНК-оригами идеальной платформой для точного размещения функциональных элементов, таких как наночастицы, флуоресцентные красители и белки. Благодаря этому, наноструктуры на основе ДНК-оригами нашли применение в различных областях, включая доставку лекарств, биосенсорику, плазмонику и синтез неорганических материалов. Поскольку многие из этих применений требуют сохранения чёткой структурной целостности, устойчивость ДНК-оригами в различных условиях стала важным направлением исследований [1-3].

В данной работе мы демонстрируем возможность собирать коммерчески доступные ДНК-оригами структуры. Готовые скаффолды (одноцепочечные спирали ДНК), скрепки (молекулы, направляющие самосборку цепочки ДНК), и буферные растворы были приобретены у Tilibit Nanosystems GmbH (Германия). Сборка проводилась по протоколу производителя.

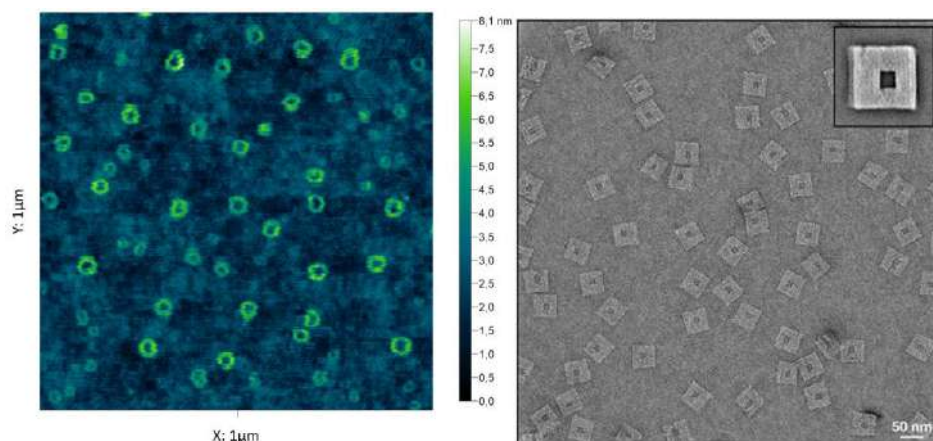


Рисунок. АСМ-изображение высаженных на покровное стекло синтезированных ДНК-оригами структур (Ntegra, «Активная фотоника») (слева). Изображение с электронного микроскопа ДНК наноструктур, зарегистрированное производителем Tilibit nanosystems GmbH (справа)

Синтезированные наноструктуры высаживались на покровное стекло и исследовались атомно-силовым микроскопом (рисунок). Продемонстрирована успешная сборка наноструктуры в виде прямоугольника с отверстием.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства просвещения Российской Федерации «Физика наноструктурированных материалов и высокочувствительная сенсорика: синтез, фундаментальные исследования и приложения в фотонике, науках о жизни, квантовых и нанотехнологиях» (тема № 124031100005-5).

[1] Степанов М.Е., Хохрякова У.А., Егорова Т.В., Магарян К.А., Наумов А.В., *Фотоника*, **18**, №1, 72-80, (2024).

[2] Степанов М.Е., Хохрякова У.А., Егорова Т.В., Магарян К.А., Наумов А.В., *Фотоника*, **18**, №2, 166-176, (2024).

[3] Степанов М.Е., Хохрякова У.А., Егорова Т.В., Магарян К.А., Наумов А.В., *Фотоника*, **18**, №5, 398-505, (2024).

РЕЗОНАНСНОЕ РАМАНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ В НАНОТРУБКАХ НА ОСНОВЕ MoS₂

Казанов Д.Р., Пошакинский А.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

kazanovdr@gmail.com

Описано резонансное усиление рамановского рассеяния света в нанотрубках MoS₂ при совпадении спектрального расстояния между оптическими модами шепчущей галереи, локализованными в стенке нанотрубки, с частотой оптического фонона.

Ключевые слова: резонансное рамановское рассеяние, моды шепчущей галереи, нанотрубки.

Нанотрубки на основе MoS₂ – перспективные структуры для нанофотоники, сочетающие яркую экситонную фотолуминесценцию и свойства оптических резонаторов с модами шепчущей галереи (МШГ), локализованными в стенках нанотрубки и поляризованными вдоль ее оси [1]. Оптические МШГ проявляют себя как резкие пики в спектрах фотолуминесценции, способны формировать экситон-поляритоны [2], и могут быть использованы для характеристики деформации трубки [3].

В настоящей работе исследуется возможность резонансного взаимодействия между оптическими МШГ и рамановскими фононными модами в нанотрубках на основе MoS₂. Для данного материала характерны три оптические активные рамановские моды: A_{1g}, E_{1g} и 2E_{2g}, каждая из которых описывается соответствующим раман-тензором [4]. В соответствии с правилами отбора рамановского рассеяния была построена теоретическая модель, учитывающая цилиндрическую симметрию нанотрубки, поляризацию и направление как падающего, так и рассеянного электромагнитного поля. Модель основана на переходе к цилиндрической системе координат, в которой раман-тензор имеет тот же вид, что и для слоистого MoS₂. Интенсивность рамановского рассеяния определяется свёрткой поля падающей волны с рассеянным полем, на частоте, смещённой на энергию фонона:

$$I^{\alpha_1, \alpha_2}(\omega_2, \omega_1) \sim \int |E_s(\omega_2) \cdot R_{|\omega_2 - \omega_1|} E_i(\omega_1)|^2 r dr d\varphi, \quad (1)$$

где ω_1, ω_2 – частоты падающего и рассеянного света, $E_{i,s}$ – падающее и рассеянное электромагнитное поле на соответствующих частотах, $|\omega_2 - \omega_1|$ – рамановский сдвиг, $R_{|\omega_2 - \omega_1|}$ – раман-тензор, α_1, α_2 – поляризации падающего и рассеянного света. Такой формализм позволяет анализировать условия резонансного усиления рассеяния, возникающего при совпадении рамановского сдвига частоты с частотным интервалом между оптическими МШГ, а также оценивать вклад пространственного перекрытия мод в эффективность рассеяния. Результаты расчета показаны на рисунке.

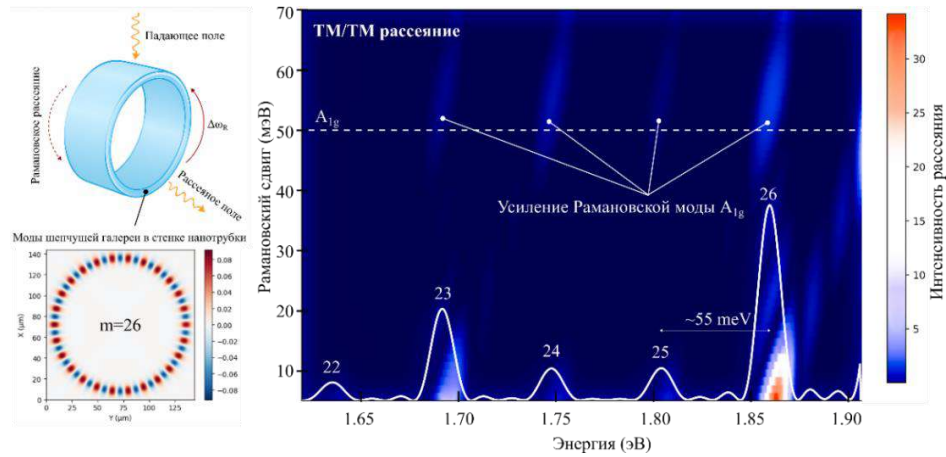


Рисунок. Спектр интенсивности рамановского рассеяния в нанотрубке MoS₂ в зависимости от энергии рамановского сдвига при ТМ-поляризованных падающем и рассеянном полях. В данной конфигурации возбуждается преимущественно мода A_{1g}. При совпадении энергии рамановского перехода с частотным интервалом между модами шепчущей галереи наблюдается резонансное усиление сигнала

Работа была частично поддержана в рамках Государственного задания (№ FFUG-2024-0043).

[1] Kazanov D.R., Poshakinskiy A.V., Davydov V. Yu., Smirnov A.N., Eliseyev I.A., Kirilenko D.A., Remskar M., Fathipour S., Mintairov A., Seabaugh A., Gil B., and Shubina T.V., *Appl. Phys. Lett.*, **113**, 101106, (2018).

[2] Galimov A.I., Kazanov D.R., Poshakinskiy A.V., Rakhlin M.V., Eliseyev I.A., Toropov A.A., Remskar M., and Shubina T.V., *Nanoscale Horizons*, **9**, 968-975, (2024).

[3] Eliseyev I.A., Borodin B.R., Kazanov D.R., Poshakinskiy A.V., Remskar M., Pavlov S.I., Kotova L.V., Alekseev P.A., Platonov A.V., Davydov V. Yu., and Shubina T.V., *Adv. Optical Mater.*, **11**, №15, 2202782, (2023).

[4] Ding Y., Zheng W., Jin M., Zhu Y., Zhu R., Lin Z., and Huang F., *Opt. Lett.*, **45**, 1313-1316, (2020).

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
БОРОГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОКРИСТАЛЛЫ
СВИНЦОВО-ГАЛОГЕНИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ**

Шеремет В.Г., Харисова Р.Д., Зырянова К.С., Миронов Л.Ю.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

v.g.seremet@gmail.com

Работа посвящена изучению формирования нанокристаллов перовскитов состава CsPbX_3 ($\text{X}=\text{Br}^-$, I^-) в борогерманатных стёклах. Была синтезирована серия стёкол, содержащая свинцово-галогенидные кластеры. В результате термообработки в полученных образцах выделялись нанокристаллы перовскитов.

Ключевые слова: люминесценция, галоидные перовскиты, борогерманатное стекло.

В настоящее время разработка новых люминесцентных материалов, обладающих функциональными оптическими свойствами, является одной из актуальных задач в области оптического материаловедения, поскольку такие материалы могут стать основой для изготовления различных оптических устройств: детекторов, сцинтилляторов, концентраторов солнечных батарей [1]. Подходящим материалом для этих целей является стекло с нанокристаллами перовскитов. Оно обладает уникальными оптическими свойствами: узкополосная люминесценция, высокие значения квантового выхода, возможность перестроить спектр люминесценции за счёт варьирования галогенов в составе нанокристаллов [2].

В ходе данной работы было синтезировано борогерманатное стекло системы $\text{GeO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{Cs}_2\text{O} - \text{ZnO} - \text{PbO} - \text{K}_2\text{O} - \text{Hal}$, $\text{Hal} = \text{Br}^-$, I^- . Синтез стекла был проведен при температуре 950°C в течение 30 минут с использованием стекритовых тиглей, также был проведен инерционный отжиг от температуры 470°C . Всего было синтезировано 4 состава: содержащий Cs_2O , ZnO , Br^- (I^- отсутствует); содержащий Cs_2O , ZnO , I^- (Br^- отсутствует); содержащий Cs_2O , Br^- (ZnO , I^- отсутствуют); содержащий ZnO , Br^- (Cs_2O , I^- отсутствуют). Для выделения нанокристаллов перовскитов в объёме матрицы стекла после синтеза образцов была проведена дополнительная термообработка при температуре 550°C в течение 1 часа.

Спектры люминесценции регистрировались в диапазоне длин волн 350-740 нм. Длина волны возбуждения составила 340 нм. Стёкла с галогенсодержащими кластерами в составе имели широкую полосу люминесценции в видимом диапазоне, которая была интерпретирована как люминесценция галогенсодержащих кластеров. Для стёкол после проведения термообработки были зарегистрированы узкие полосы люминесценции, что свидетельствует о формировании нанокристаллов перовскитов. Для стёкол до и после термообработки было показано, что при замене брома в составе образца на йод пик люминесценции сдвигался в длинноволновую область спектра. Установлено, что люминесценция кластеров проявляется в составах, не содержащих Cs_2O , TiO_2 , P_2O_5 и ZnO , однако исчезает при удалении из состава свинца и галогенов. Также исходя из результатов проведенных измерений было установлено, что наличие кристаллизаторов (TiO_2 , P_2O_5) в составе образца не является обязательным условием для формирования нанокристаллов перовскитов.

Таким образом, в результате данной работы был синтезирован ряд борогерманатных стёкол, содержащих нанокристаллы перовскитов состава CsPbX_3 ($\text{X}=\text{Br}^-$, I^-), а также свинцово-галогенидные кластеры.

[1] Samiei S., Soheyli E., Vignesh K., Nabiyouni G, Rogach A.L., *Small*, **20**, №17, 2307972, (2024).

[2] Protesescu L, Yakunin S., Bodnarchuk M.I., Krieg F., Caputo R., Hendon C.H., Yang R.X., Walsh A., Kovalenko M.V., *Nano Letters*, **15**, №6, 3692-3696, (2015).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
ТЯЖЕЛЫХ СВИНЦОВО-ГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ МЕТОДОМ
ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Леонидова А.А., Асеев В.А., Никоноров Н.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

aaleonidova@itmo.ru

Разработан метод исследования распределения свинца по площади поверхности свинцово-германатных стекол на основе ЛИЭС. Оптимизированы параметры воздействия лазерного излучения на поверхность образцов (энергия импульса, частота повторения, длина волны, задержка регистрации сигнала).

Ключевые слова: лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия, тяжелые оптические стекла, анализ состава.

Синтез однородных свинцово-германатных стекол связан с рядом трудностей. Температура плавления оксида свинца (около 886 °С) значительно ниже температуры плавления оксида германия (около 1116 °С). Это означает, что оксид свинца может начать плавиться и взаимодействовать с другими компонентами шихты и с компонентами, входящими в состав тигля, при более низких температурах, что может привести к неравномерному распределению соединений свинца в стекле. При высоких температурах, необходимых для плавления германия, свинец может уже находиться в расплавленном состоянии, что может привести к его агрегации или формированию неравномерных фаз или кристаллических образований в стекле [1]. Также, если свинец и германий не перемешиваются при охлаждении расплава, это приводит к образованию неоднородных структур (свилы) и дефектам стекла (газовые пузырьки, трещины) [2, 3].

Данное исследование посвящено разработке бесконтактного метода определения однородности химического состава тяжелых оптических свинцово-германатных стекол на основе лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС). Данный метод перспективен для стекольной промышленности, поскольку позволяет решить проблему высокой энергозатратности и низкой эффективности традиционных методов синтеза и отбраковки оптического стекла, при которых лишь малая часть продукции соответствует требованиям качества. Предлагаемый метод ЛИЭС позволяет визуализировать распределение химических элементов на поверхности и в объеме заготовки неразрушающим способом, автоматизировать процесс отбраковки и соотнести карту распределения химических элементов с технологией синтеза стекла. Метод ЛИЭС, получивший широкое распространение с появлением компактных лазерных устройств, основан на измерении спектра вторичной эмиссии, возбуждаемого лазерным импульсом, и позволяет определять качественный элементный состав вещества, а также получать количественную информацию о содержании элементов.

В настоящей работе показано, что на основе эмиссионных спектров свинцово-германатных стекол получены данные о количественном содержании свинца и германия в химическом составе образцов стекол. Оптимизированы параметры воздействия лазерного излучения на поверхность образцов (энергия импульса, частота повторения лазерных импульсов, длина волны лазера, задержка между импульсом и регистрацией сигнала). Получены карты распределения свинца и германия по поверхности заготовок свинцово-германатных стекол. Установлена связь между распределением элементов (Pb, Ge) в объеме заготовки и концентрацией PbO и GeO₂ в составе образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-43-20020).

[1] Alderman, O.L., Hannon, A.C., Holland, D., Umesaki, N., *J. of non-cryst. sol.*, **386**, 56-60, (2014).

[2] Храмов В.П., Чугунов Е.А., *Высш. школа*, 16-25, (1987).

[3] Шелаева Т.Б., *Дисс. канд. техн. наук. М., РХТУ*, 7-9, (2015).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПИРАМИДАЛЬНЫХ
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ОСТРОВКОВ С РАЗЛИЧНЫМ КОНТАКТНЫМ УГЛОМ
ДЛЯ АНТИОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ**

Лозовой К.А., Дирко В.В., Кукунов О.И., Коханенко А.П., Войцеховский А.В.

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

lozovoymailbox@mail.ru

В работе рассмотрена энергетика образования пирамидальных эпитаксиальных островков с различным контактным углом. Показано существование равновесного значения угла при основании, при котором для заданных энергетических, упругих и морфологических параметров системы достигается минимум свободной энергии, что соответствует экспериментально наблюдаемой геометрической форме островка. Предложены пути создания массивов островков с заданным контактным углом, оптимальным для антиотражающих покрытий.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, квантовая точка, контактный угол.

В настоящее время гетероструктуры с квантовыми точками находят широкое применение при разработке различных оптоэлектронных устройств, таких как фотоприемники видимого и инфракрасного диапазонов, солнечные элементы, полупроводниковые светодиоды и лазеры. Для создания таких приборов используются разнообразные полупроводниковые материальные системы, которые наилучшим образом соответствуют предъявляемым требованиям: соединения A3B5, A2B6, A4B4 и другие. Несмотря на значительный прогресс в их изучении и применении, потенциал этих структур еще не раскрыт полностью, и они по-прежнему остаются одними из самых перспективных платформ для оптоэлектроники.

Наиболее перспективным методом формирования квантовых точек стало их самопроизвольное образование в процессе молекулярно-лучевой или газовой эпитаксии. Этот механизм самоорганизации возможен при наличии несовпадения постоянных решеток между подложкой и осаждаемым материалом. Когда толщина двумерного слоя достигает критического значения, накопленные упругие напряжения делают послойный рост неустойчивым, и начинается формирование трёхмерных островков [1, 2].

В данной работе на основе развития существующих термодинамических моделей эпитаксиального роста будет рассмотрена энергетика образования пирамидальных эпитаксиальных островков с различным контактным углом, а также показано существование равновесного значения угла при основании, при котором для заданных энергетических, упругих и морфологических параметров системы достигается минимум свободной энергии, что соответствует экспериментально наблюдаемой геометрической форме островка.

Основой для построения модели является выражение для изменения свободной энергии при переходе атомов из смачивающего слоя, образующегося на поверхности подложки, в островок. Учитывается вклад в изменение свободной энергии за счет увеличения поверхностной энергии и длины ребер при образовании трехмерного кластера, релаксации упругих напряжений, возникающих из-за наличия в системе рассогласования по параметру кристаллической решетки, а также за счет уменьшения притяжения атомов к подложке [3].

Найдены выражения для минимума свободной энергии системы и критического числа атомов в островке, учитывающие образование дополнительных ребер. Определены зависимости равновесного угла при основании от энергетических и упругих параметров осаждаемого материала и подложки. Показано, что равновесный угол увеличивается с увеличением рассогласования по постоянной решетки между двумя материалами, а также с увеличением количества осажденного материала, что приводит к экспериментально наблюдаемой морфологической перестройке островков на поздних стадиях роста.

Предложены пути управления величиной контактного угла для получения островков с большим отношением высоты к ширине основания, необходимых для создания эффективных антиотражающих покрытий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-12-20004, <https://rscf.ru/project/25-12-20004/> и Администрации Томской области.

[1] Dirko V.V., Lozovoy K.A., Kokhanenko A.P., Voitsekhovskii A.V., High-resolution RHEED analysis of dynamics of low-temperature superstructure transitions in Ge/Si(001) epitaxial system, *Nanotechnology*, **33**, №11, 115603, (2022).

[2] Hafez M.A., Zayed M.K., Elsayed-Ali H.E., Review: Geometric interpretation of reflection and transmission RHEED patterns, *Micron*, **159**, 103286, (2022).

[3] Lozovoy K.A., Kokhanenko A.P., Voitsekhovskii A.V., Influence of edge energy on modeling the growth kinetics of quantum dots, *Crystal Growth & Design*, **15**, №3, 1055, (2015).

**РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ФТОРФОСФАТНЫМ
СТЕКЛОМ, СОДЕРЖАЩИМ ИОНЫ ЦЕЗИЯ, СВИНЦА И БРОМА**

Кузьменко Н.К.¹, Колобкова Е.В.^{1,2}, Сергеев М.М.¹, Никоноров Н.В.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
Санкт-Петербург, Россия
nataliakuz01@yandex.ru

В работе рассчитана температура области облучения фторфосфатного стекла, содержащего прекурсоры перовскита, фемтосекундным лазерным облучением, в результате которого были сформированы нанокристаллы CsPbBr_3 . Предложен экспериментальный метод оценки температуры, основанный на люминесцентной термометрии.

Ключевые слова: перовскиты, оптическая запись информации, фторфосфатное стекло.

В последние годы активно исследуется влияние фемтосекундных лазерных импульсов на стекло. Благодаря ультракороткой длительности импульсов (порядка сотен фемтосекунд) можно локально изменять структуру материала в микроскопических областях, где достигается пиковая интенсивность излучения [1]. Такая прецизионная модификация без разрушения материала открывает перспективы для трёхмерного хранения данных с высокой плотностью записи.

Особый интерес представляет люминесцентный метод записи и считывания информации. Его принцип основан на образовании люминесцирующих нанокристаллов внутри стеклянной матрицы. При этом управление люминесценцией (её подавление или восстановление) возможно за счёт комбинированного воздействия лазерного излучения и термообработки, что позволяет реализовать перезаписываемые носители. Глубокое изучение механизмов кристаллизации под действием фемтосекундного лазера поможет создавать нанокристаллы с заданными оптическими и функциональными характеристиками.

В данном исследовании в качестве материала использовалось фторфосфатное стекло, легированное ионами цезия, свинца и брома. Запись производилась в объёме образца на глубине около 200 мкм. Под воздействием лазера в его объёме формируются нанокристаллы перовскита CsPbBr_3 . Сразу после фемтосекундной записи люминесценция не наблюдается, однако термообработка при температурах ниже температуры стеклования приводит к появлению зелёной люминесценции.

Для анализа процесса кристаллизации были рассчитаны температура и время её воздействия в зоне облучения. Расчёты проводились на основе модели теплового источника [2], учитывающей параметры лазера, свойства стекла, геометрию источника и нелинейные эффекты поглощения. Согласно этой модели, лазерная энергия мгновенно преобразуется в тепло, генерируя свободные электроны в зоне проводимости, которые затем передают энергию кристаллической решётке. После этого начинается её остывание. При частоте повторения импульсов 50 кГц (длина волны 1030 нм, длительность импульса 130 фс) расчётные температуры варьировались в диапазоне 1500–9000°C в зависимости от энергии в импульсе. Кроме того, были определены времена, в течение которых область взаимодействия лазерного излучения с веществом находилась при температурах выше температуры стеклования, то есть времена, в течение которых происходила термическая диффузия элементов. Для частоты следования импульсов 50 кГц эти времена находятся в диапазоне от нескольких микросекунд до нескольких десятков микросекунд. Экспериментально полученные максимумы полос люминесценции при различных параметрах лазерного излучения были сопоставлены с температурами и временами, полученными в процессе моделирования.

Для экспериментальной оценки температуры в зоне взаимодействия был использован метод люминесцентной термометрии. В его основе — применение редкоземельных ионов (например, эрбия), обладающих термосвязанными энергетическими уровнями с малым энергетическим зазором между ними (порядка 800 см⁻¹). При нагреве стекла, легированного эрбием, происходит изменение населенностей термосвязанных уровней и, как следствие, соотношения интенсивностей люминесцентных полос, соответствующих переходам с этих уровней. Измерение спектров люминесценции этих полос позволяет оценить температуру стекла в области взаимодействия при температурах ниже температуры стеклования и сопоставить полученные результаты с теоретической моделью.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект номер 24-43-20020).

[1] Sun K., Tan D., Song J., Xiang W., Xu B., Qiu J., *Advanced Optical Materials*, **9**, №11, 2100094, (2021).

[2] Miyamoto I., Cvecek K., Okamoto Y., Schmidt M., *Physics Procedia*, **5**, 483-493, (2010).

АПКОНВЕРСИЯ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ Y_2O_3 ,
АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er И Yb

Кулинкин А.Б.¹, Коровин А.М.¹, Кузин Д.С.¹, Ван И.², Хуан Л.², Соколов Н.С.¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Нанкинский технический университет, Нанкин, Китай

alexey.kulinkin@mail.ioffe.ru

Изучены спектры и кинетика апконверсионной и стоксовской фотолюминесценции гетероструктур с эпитаксиальными слоями $Y_2O_3:(Er,Yb)$. Полученные данные позволяют получить дополнительную информацию о механизмах процесса апконверсии.

Ключевые слова: апконверсия, система Er-Yb, эпитаксиальные слои Y_2O_3 .

Возросший в последнее время интерес к апконверсионным наноматериалам связан с широкими возможностями их практических применений и появлением новых методов их синтеза и характеристики. В случае эпитаксиальных наноразмерных гетероструктур, например, можно обеспечить формирование заданных профилей пространственного распределения активаторов и сенситизаторов, в том числе контролируемое разделение между ними в селективно легированных слоях и гетероструктурах.

В данной работе, являющейся развитием нашей более ранней работы [1], на подложках $SrTiO_3(001)$ методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии (LMBE) были выращены слои Y_2O_3 , как с однородным, так и с селективным легированием эрбием и иттербием, служащими в качестве активатора и сенситизатора соответственно. Кристаллическая структура слоев была определена методом дифракции быстрых электронов, а их оптические свойства изучались по спектрам обычной (стоксовой) (PL) и апконверсионной (UCL) фотолюминесценции.

В верхней части рисунка а представлен спектр UCL однородно легированного слоя $Y_2O_3(Er,Yb)$ — образец #8873, измеренный при возбуждении полупроводниковым лазером, работающим в непрерывном режиме с длиной волны, соответствующей максимуму поглощения кубического центра Yb^{3+} в Y_2O_3 ($\lambda_{exc}=976,5$ нм). На средней кривой рисунка а показан спектр PL этого же образца, полученный при его возбуждении лазером с длиной волны $\lambda_{exc}=532$ нм, возбуждающим непосредственно ионы Er^{3+} . Регистрация спектров PL и UCL производилась с помощью компактного оптического спектрометра, оснащенного ПЗС линейкой. Сравнивая форму спектров UCL и PL, можно сделать вывод о том, что верхние по энергии уровни мультиплета $^4S_{3/2}$ иона Er^{3+} играют важную роль в процессе передачи энергии от ионов Yb^{3+} к ионам Er^{3+} , который в значительной мере определяет эффективность апконверсии.

Для дальнейшего уточнения микроскопических механизмов этого процесса были проведены измерения PL и ее кинетики в образцах с пленками Y_2O_3 , селективно легированными только Er и только Yb. При этом вышеупомянутые легированные слои были разделены слоями спейсера (нелегированного Y_2O_3) с толщинами $d = 5, 10$ и 30 нм. Оказалось, что спектры PL в зеленой области спектра слабо зависят от толщины спейсера и почти не отличаются от спектров Er^{3+} в Y_2O_3 без Yb^{3+} , т.е. взаимодействия ионов Er^{3+} и Yb^{3+} , находящихся в разных слоях, в форме спектров PL явным образом не проявляется.

В то же время, в кривых затухания красной PL ионов Er^{3+} в селективно легированных слоях при их возбуждении импульсной ксеноновой лампой наблюдалась зависимость времени затухания τ этой люминесценции от толщины спейсера Y_2O_3 (рисунок б). Наблюдаемое сокращение τ от 1.3 до 0.95 мс при уменьшении толщины спейсера от 30 до 5 нм можно объяснить увеличением близкого к резонансному взаимодействия ионов Er^{3+} и Yb^{3+} , расположенных в соседних слоях.

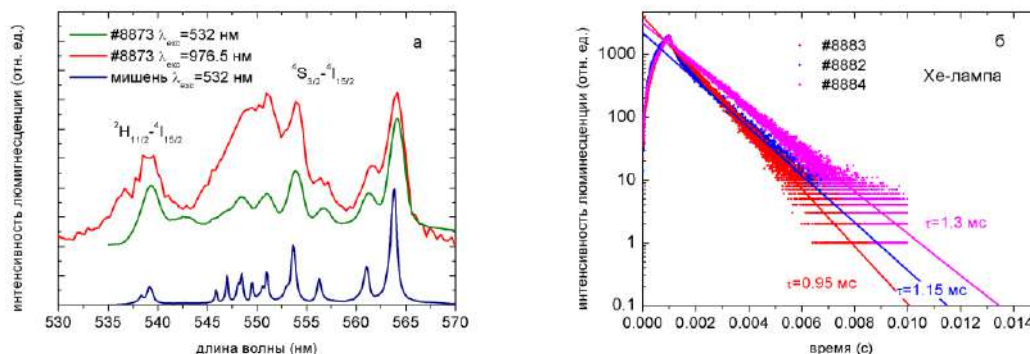


Рисунок. а — спектры UCL и PL образца #8873 и спектр PL мишени, **б** — кинетика PL образцов с селективным легированием и разной толщиной спейсера: #8883 — 5 нм, #8882 — 10 нм, #8884 — 30 нм

[1] Kulinkin A.B., Korovin A.M., Wang Y., Kuzin D.S., Khomchenko A.S., Boiko M.E., Sakharov V.I., Serenkov I.T., Suturin S.M., Huang L., Sokolov N.S., *Optical Materials*, **149**, 115089(1-6), (2024).

**СИНТЕЗ ОДИНОЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТА CsPbBr₃
НА ОМНИФОБНЫХ ПОДЛОЖКАХ**

Семынин М.С., Карцев Д.Д., Щербинин Д.П.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Semyininms@gmail.com

В настоящей работе представлен микрокапельный синтез микрокристаллов CsPbBr₃ на омнифобных подложках. Определено влияние условий сушки и объема капель на морфологию кристаллов.

Ключевые слова: микрокапельный синтез, перовскит CsPbBr₃, омнифобные подложки.

В течение последнего десятилетия нано и микрокристаллы галогенидных перовскитов привлекли значительное внимание научного сообщества как перспективный класс полупроводниковых материалов. Они характеризуются высоким сечением поглощения, высоким квантовым выходом фотолюминесценции (до 100%), стабильностью оптических характеристик и высокой устойчивостью к кристаллическим дефектам [1, 2]. Совокупность этих свойств делает перовскитные кристаллы одними из наиболее эффективных излучателей, что обуславливает их активное применение в области оптоэлектроники, нанопотоники, разработке фотонных интегральных схем и высокочувствительных сенсорных систем [3, 4]. В связи с этим актуальной задачей является разработка простых, доступных и масштабируемых методов синтеза микро- и нанокристаллов перовскита с контролируемыми морфологическими характеристиками. Традиционные методы синтеза в макрообъеме, как правило, не обеспечивают необходимую однородность размеров и форм образующихся кристаллов. В данном контексте микрокапельный подход к синтезу представляет собой перспективную альтернативу, позволяя реализовать дополнительный уровень контроля над процессами кристаллизации за счет варьирования объема реакционной среды в пределах одной капли, а также условий ее испарения [4]. Это создает возможность направленного регулирования размера и морфологии конечных кристаллических структур.

В настоящей работе синтез микрокристаллов перовскита CsPbBr₃ осуществлялся на подложках, покрытых омнифобным слоем полидиметилсилоксана, модифицированного 3-глицидилоксипропил-полиэдрическим олигомерным силсесквиоксаном (GPOSS-PDMS) [5]. Подготовка подложек включала нанесение прекурсора методом центрифугирования (POLOSTM SPIN150i, 1000 об/мин, 1 мин), последующую сушку на нагревательной плите при 60 °C в течение 10 мин и ультрафиолетовое облучение ртутной газоразрядной лампой высокого давления (250 Вт, 254–579 нм, 6,9 мВт/см² при 365 нм) в течение 7 мин. В качестве прекурсоров для получения перовскита CsPbBr₃ использовались растворы бромида цезия и бромида свинца (по 0,05 моль/л) в диметилсульфоксиде. Отметим, что в макрообъеме реакция образования кристаллов не протекает. Для инициирования кристаллизации раствор наносился на подготовленные подложки с использованием жидкостного манипулятора I.DOT (DISPENDIX) в виде микрокапель объемом от 10 до 1000 нл.

Проводилось исследование процессов высыхания капель и последующей кристаллизации. Рассматривалось два режима высыхания микрокапель: при комнатной температуре в течение четырёх суток и при 80 °C в течение 20 минут. Морфология полученных кристаллов анализировалась с использованием конфокального микроскопа LSM 710 (Carl Zeiss). Установлено, что повышение температуры при сушке способствует перераспределению центров кристаллизации. Так, в случае синтеза с использованием подогреваемых подложек и малых объемов капель (10 – 30 нл) наблюдалось образование нескольких кубических микрокристаллов размером в несколько десятков микрон. При увеличении объема капель формировались множественные центры кристаллизации по периферии капли, что приводило к образованию неупорядоченных кольцевых агломератов. Для капель объемом выше 500 нл наблюдалось формирование отдельных кристаллов внутри кольца размером менее 10 мкм. В условиях медленной сушки при комнатной температуре формировались более крупные кристаллы вытянутой формы, достигающие сотен микрон в длину. Показано, что для всех полученных структур наблюдается люминесценция с максимумом на длине волны 527 нм.

Таким образом, в рамках проведенного исследования был разработан метод синтеза одиночных микрокристаллов CsPbBr₃ на подложках с омнифобным покрытием GPOSS-PDMS путем нанесения микрокапель прекурсоров. Установлено, что объем капли и температура высыхания существенно влияют на морфологию конечных кристаллов. Полученные результаты представляют интерес для дальнейшего применения в области микро- и нанолазерных источников на основе перовскитных структур.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 24-79-00225.

[1] Shen W. et al., *Acs Photonics*, **8**, №1, 113-124, (2020).

[2] Liu M. et al., *Advanced Photonics Research*, **2**, №3, 2000118, (2021).

[3] Polushkin A.S. et al., *Nanophotonics*, **9**, №3, 599-610, (2020).

[4] Du H. et al., *ACS applied materials & interfaces*, **12**, №2, 2662-2670, (2019).

[5] Kartsev D.D. et al., *Advanced Materials Interfaces*, **10**, №16, 2300156, (2023).

ФОТОДЕТЕКТОРЫ КОРОТКОВОЛНОВОГО ИК-ДИАПАЗОНА

С $\lambda_{\text{cutoff}} = 2,6 \text{ мкм}$

НА ОСНОВЕ МЕТАМОРФНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР InGaAs/InP

Баранцев О.В.¹, Василькова Е.И.¹, Пирогов Е.В.¹, Воропаев К.О.², Васильев А.А.²,
Карачинский Л.Я.^{1,3}, Новиков И.И.^{1,3}, Соболев М.С.¹

¹СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

²АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород, Россия

³Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ovbarantsev@gmail.com

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии выращены гетероструктуры InGaAs/InP с метаморфными буферными слоями InAlAs. Изготовлены pin-фотодиоды с максимальной fotocувствительностью на длине волны 2,3 мкм и длинноволновой границей фотоотклика 2,6 мкм. Исследованы электрофизические и оптические характеристики устройств.

Ключевые слова: коротковолновые ИК-фотодетекторы.

Фотодетекторы SWIR (*short wave infrared* - коротковолнового инфракрасного) диапазона 0,9 - 2,6 мкм являются востребованными при решении задач ночного видения, дистанционного зондирования, анализа газов и органических веществ [1]. Хотя в ближнем ИК-диапазоне часто используют пару In_{0,53}Ga_{0,47}As/InP с совпадающими параметрами кристаллической решётки, для целевого диапазона требуется изменить состав, увеличив долю индия до 83%. Возникающее при этом рассогласование кристаллических решёток с подложкой InP приводит к образованию дефектов: дислокаций несоответствия и прорастающих дислокаций, негативно влияющих на характеристики устройств. Чтобы избежать этого, между подложкой InP и активным слоем предложено формирование метаморфных буферных слоёв (МБС).

Гетероструктуры для фотодетекторов были получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии, с помощью установки Ribier MBE49. Формирование метаморфных буферных слоёв In_xAl_{1-x}As толщиной 2 мкм происходило путем изменения температуры источников. Мольная доля индия в твёрдом растворе линейно изменялась от $x = 0,53$ до $x = 0,86$ по мере роста МБС. После формирования МБС были выращены активная область In_{0,83}Ga_{0,17}As толщиной 1,5 мкм и р-область In_{0,83}Al_{0,17}As толщиной 0,6 мкм. Кристаллы pin-фотодиодов с диаметром fotocувствительной области $d = 140 \text{ мкм}$ были изготовлены с помощью взрывной фотолитографии.

Были измерены и проанализированы вольт-амперные характеристики полученных приборов. Установлено, что значения темновых токов составляют $\sim 10^{-5} \text{ А}$ при комнатной температуре. Шунтирующее сопротивление при комнатной температуре составляет $\sim 40 \text{ кОм}$. При охлаждении приборов до температуры 80 К удалось зафиксировать снижение темновых токов до $\sim 10^{-7} \text{ А}$ [2]. Была измерена удельная ёмкость изготовленных фотодиодов, которая составила $\sim 100 \text{ нФ/см}^2$.

Разработанные pin-фотодиоды продемонстрировали фотоотклик в инфракрасном диапазоне от 1,2 до 2,6 мкм. Пик fotocувствительности приходится на длину волны 2,3 мкм (Рисунок). Были измерены значения токовой чувствительности и обнаружительной способности D^* образца pin-фотодиода в корпусе с линзой $\varnothing 3,3 \text{ мм}$ при комнатной температуре в пиковой длине волны. Токовая чувствительность составила 0,7 А/Вт, а обнаружительная способность оказалась равной $3 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$.

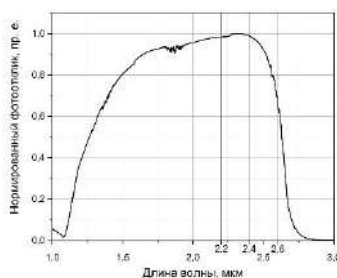


Рисунок. Спектральная зависимость фотоотклика изготовленных устройств

Работа выполнена при поддержке Министерства Науки и Высшего Образования Российской Федерации в рамках Государственного задания №FSRM-2025-0001.

[1] Бурлаков И.Д., Гринченко Л.Я., Дирочка А.И., Залетаев Н.Б., *Успехи Прикладной Физики*, **2**, №2, 131-162, (2014).

[2] Василькова Е.И., Баранцев О.В., Баранов А.И. и др., *ФТП*, **58**, №7, 358-364, (2024).

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ

Кострицкий С.М.¹, Яценко А.В.², Федоров В.А.¹

¹ООО НПК Оптилинк, Зеленоград, Москва, Россия

²Крымский федеральный университет, г. Симферополь, Россия
skostritskii@optolink.ru

Измерено пирозлектрическое напряжение, появляющееся у интегрально-оптических (ИО) чипов, изготовленных методом протонного обмена в кристаллах LiNbO_3 X-среза. Установлено, что этот пирозлектрический отклик пропорционален скорости изменения температуры и вызывает изменение коэффициента деления Y-разветвителя в многофункциональных интегрально-оптических элементах, использующих такие ИО чипы.

Ключевые слова: пирозлектрический эффект, ниобат лития, интегрально-оптический элемент, Y-разветвитель.

Многофункциональный интегрально-оптический элемент (МИОЭ) ключевой элемент волоконно-оптических гироскопов средней и высокой точности [1]. МИОЭ состоит из линейного поляризатора, Y-разветвителя и двух электрооптических фазовых модуляторов, выполненных на основе канальных волноводов в чипах X-среза кристаллов ниобата лития (НЛ) [1]. Изменение температуры МИОЭ может вызвать появление электрического поля большой напряжённости ($\leq 3,4 \times 10^6$ В/м [2]) из-за пирозлектрического эффекта в кристаллах НЛ (LiNbO_3) [1-3]. Появление этого поля вызывает дрейф электрооптических модуляторов [1] и рост оптических потерь в волноводах МИОЭ [3]. Вместе с этим, следует ожидать изменения и в работе Y-разветвителя из-за пирозлектрического эффекта. Поэтому нами исследованы изменения коэффициента деления оптической мощности при изменениях температуры T МИОЭ (Рисунок а).

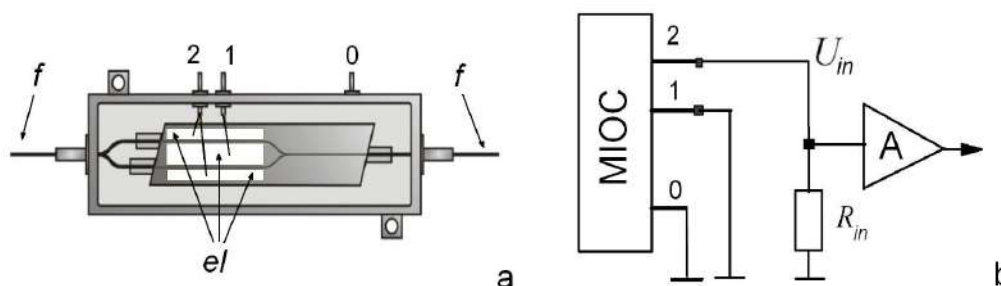


Рисунок. Схема МИОЭ: гермовыводы (1, 2), электроды (el), оптические волокна (f), канальные волноводы показаны чёрными линиями на рабочей поверхности ИО чипа – (а).

Схема измерений пироотклика: МИОЭ (МИОС), усилитель (А), разъём «корпус» (0) — (b)

Для измерения пирозлектрического отклика МИОЭ его гермовыводы подключались к входу электрометрического усилителя ($R_{in}=1,08$ ГОм) с последующей регистрацией пирозлектрического напряжения U_{in} потенциометром Н307/2, Рисунок b. Гермовыводы соединены с Au/Cr-электродами фазовых модуляторов внутри корпуса МИОЭ, Рисунок а. Исследуемый образец помещался в нагревательный модуль, который обеспечивает квазилинейное изменение температуры образца в диапазоне от 270 до 340К со скоростью $V = dT/dt = (0,7 \div 6)$ К/мин. Установлено, что амплитуда пирозлектрического отклика U_{in} пропорциональна скорости изменения температуры V .

Изменения коэффициента деления Y-разветвителя наблюдались при быстром и значительном изменении температуры ($V \geq 2$ К/мин). Эти изменения коррелируют с динамикой пирозлектрического отклика, как при нагревании, так и при охлаждении МИОЭ. Установлено, что такие изменения становятся более значительными с увеличением отклонения коэффициента деления от проектируемого значения 50/50% для идеального Y-разветвителя в стационарном состоянии при комнатной температуре. Нами были исследованы МИОЭ с Y-разветвителями, имеющими стационарные значения коэффициента деления в широком диапазоне от 45/55% до 49,5/50,5%. Одновременно с этим, наблюдается рост оптических потерь при $V \geq 4$ К/мин. Показано, что такие изменения коэффициента деления и рост оптических потерь значительно уменьшаются нанесением дополнительных электродов на края рабочей поверхности ИО чипа в МИОЭ.

[1] Kostritskii S.M. et al., *Ferroelectrics*, **574**, 171, (2021).

[2] Aksarin S.M., et al., *J. Information Technologies, Mechanics and Optics*, **21**, 361, (2021).

[3] Ponomarev R.S., Shevtsov D.I., and Karnaushkin P.V., *Appl. Sci.*, **9**, 4585, (2019).

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЁНОК САМАРИЯ

Попов Н.А., Акашев Л.А., Шевченко В.Г., Конюкова А.В.

Институт химии твердого тела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
n168@mail.ru

Методами одноволновой и спектральной эллипсометрии исследованы оптические свойства тонких плёнок и массивных образцов самария. Оптические постоянные измерены на спектральном автоматическом эллипсометре SPEL-7LED в диапазоне спектра 270-1000 нм. Показано, что исследуемые тонкие плёнки были аморфными, а массивные образцы - поликристаллическими.

Ключевые слова: эллипсометрия, оптические свойства.

Тонкие плёнки металлического самария получены методом вакуумного термического испарения с вольфрамового испарителя на установке ВУП-5М. В качестве подложки использована грань равнобедренной треугольной призмы из оптического стекла. Таким образом, эллипсометрические измерения проводились по геометрии Кречмана [1], т.е. для луча, отражённого от внутренней неокисленной стороны плёнки самария. Согласно исследованиям электронной растровой микроскопии, толщина плёнок самария составляла 650-700 нанометров. Исследуемая поверхность массивных образцов самария была получена полировкой алмазными пастами и промывкой в этиловом спирте. Для исключения влияния оксидной плёнки на оптические постоянные массивных образцов самария использовалось приближение Друде-Арчера-Саксены [2]. В результате эллипсометрических спектральных измерений получены таблицы оптических постоянных в указанном диапазоне спектра. На основе этих данных были вычислены дисперсионные зависимости световой проводимости σ , отражательной способности R , мнимой и действительной частей диэлектрической проницаемости ϵ_1 и ϵ_2 , функции характеристических потерь энергии электронов $\text{Im}(\epsilon)^{-1}$. Показано, что исследуемые плёнки были аморфными, не имели никаких полос поглощения, массивные образцы были поликристаллическими, имели значительную полосу поглощения. На рисунке представлены зависимости световой проводимости σ тонких пленок (1) и массивных образцов (2) от энергии фотонов. На рисунке видно, что световая проводимость σ тонкой плёнки (кривая 1) монотонно возрастает с уменьшением энергии фотонов, а световая проводимость массивного образца (кривая 2) имеет максимум при энергии фотонов 2,76 эВ, обусловленный межзонными переходами электронов около уровня Ферми.

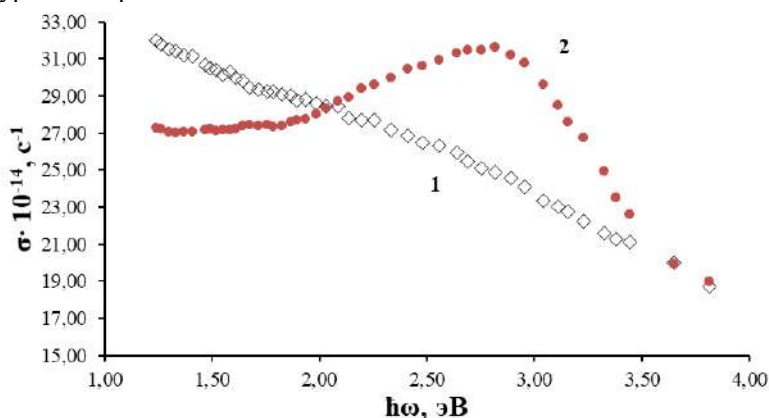


Рисунок. Спектр световой проводимости тонкой пленки самария (1) и массивного образца (2).

Отражательная способность тонкой пленки самария изменяется от 37% до 63%, а массивного образца несколько ниже – от 28% до 60%

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием и планами НИР ИХТТ УрО РАН, № 124020600007-8 блок2.

[1] Климов В.В., Наноплазмоника, М: ФИЗМАТЛИТ, 480 с., (2009).

[2] Ржанов А.В., Основы эллипсометрии, М.: Наука, 424 с., (1979).

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИСПЕРСИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛЕ ГАЛОГЕНИДНОГО ПЕРОВСКИТА MAPbI_3

Самсонова А.Ю., Селиванов Н.И., Капитонов Ю.В.

Санкт-Петербургский Государственный Университет, кафедра фотоники, Санкт-Петербург, Россия
a.y.samsonova@spbu.ru

В работе определена дисперсия показателя преломления в галогенидном перовските MAPbI_3 в области прозрачности вблизи экситонного резонанса при температурах 4–88 К путем наблюдения интерференции света в микрокристалле.

Ключевые слова: галогенидные перовскиты, экситоны, показатель преломления.

Галогенидные перовскиты – полупроводники, обладающие высоким потенциалом в различных устройствах фотоники: от солнечных элементов и фотодетекторов до светодиодов и лазеров. Для этих применений одним из наиболее важных оптических параметров является показатель преломления в области прозрачности ниже запрещенной зоны материала [1].

В данной работе были измерены низкотемпературные спектры отражения $R(E)$ при нормальном падении света от микрокристалла галогенидного перовскита MAPbI_3 ($\text{MA}^+ = \text{CH}_3\text{NH}_3^+$). Интерференция света, отраженного от граней микрокристалла, приводит к проявлению интерференционных максимумов и минимумов в этих спектрах в области прозрачности материала (Рисунок, А).

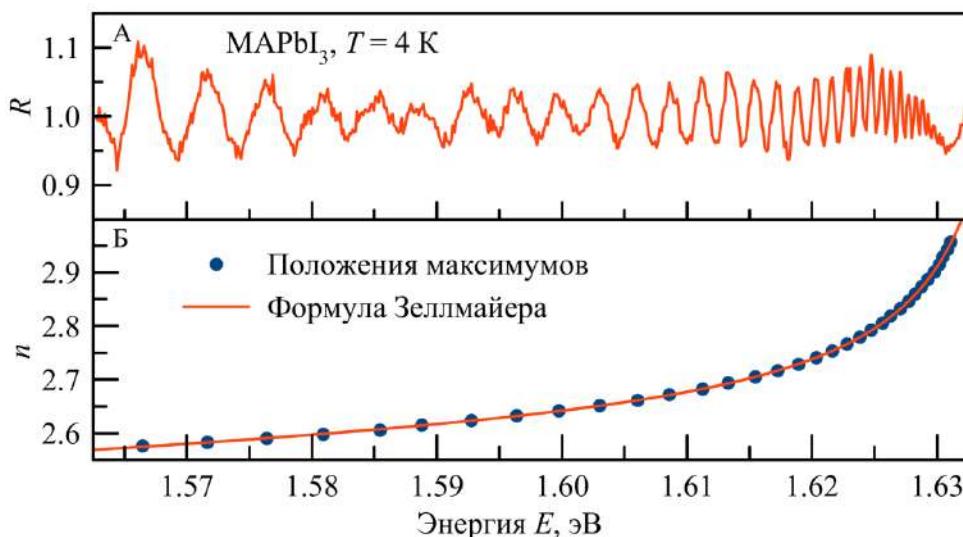


Рисунок. Спектр отражения $R(E)$ от микрокристалла MAPbI_3 (А) и дисперсия показателя преломления $n(E)$ (Б) в области прозрачности материала при температуре $T = 4 \text{ K}$

Путем извлечения номеров максимумов m и их положений по энергии E_m из спектра отражения $R(E)$, можно получить значения показателя преломления $n(E_m)$ материала на данных энергиях с помощью формулы (1), если для некоторого интерференционного максимума при энергии E_0 значение показателя преломления известно и в случае нормальной дисперсии.

$$n(E_m) = \frac{1}{E_m} \left(\frac{\hbar c m}{L} + n(E_0) E_0 \right), \quad (1)$$

где $m = k - k_0$ - номер максимума со значениями 0,1,2,3..., $k = L \cdot n(E_k) \frac{E_k}{\hbar c}$ - число длин волн, которые вписываются в оптическую длину резонатора, $k_0 = L \cdot n(E_0) \frac{E_0}{\hbar c}$.

Таким образом, была определена дисперсия показателя преломления MAPbI_3 в его области прозрачности вблизи экситонного резонанса при температуре 4 К (Рисунок, Б), а также в температурном диапазоне 4–88 К. Полученные дисперсии хорошо согласуются с моделью Зеллмайера с двумя резонансами, связанными с экситонным переходом при 1,64 эВ и переходом, расположенным около 2,45 эВ. Было показано, что дисперсия показателя преломления значительна даже вдали от экситонного резонанса и особенно сильна вблизи него. Предложенный в работе метод можно использовать для измерения с высокой точностью дисперсии показателя преломления в галогенидных перовскитах, в частности, вблизи резонансов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда № 25-12-20007 (<https://rscf.ru/project/25-12-20007/>). Работа выполнена на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Нанопотоника».

[1] Samsonova A.Y., Teslina P.P., Deribina E.I., Selivanov N.I., Stoumpos C.C., Kapitonov Y.V., *J. Phys. Chem. C.*, **128**, 9730-9734, (2024).

ОБРАТИМАЯ ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ ИЗОМЕРИЗАЦИЯ 1,3,5-ТРИФЕНИЛФОРМАЗАНА В ПЛЕНКАХ ПВБ, Ф-32Л И Ф-42

Серебров Е.И., Белов Д.В., Беляев С.Н., Сороколетова Н.А.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН», Нижний Новгород, Россия

e.serebrov@ipfran.ru

Целью настоящей работы являлось изучение фотоиндуцированной изомеризации TFT в пленках, установление порядка реакции и расчет кинетических параметров – константы скорости реакции, константа устойчивости полученных изомеров.

Ключевые слова: фотоизомеризация, 1,3,5-трифенилформазан, фторопласт.

Формазаны включают азогруппу ($-N=N-$) и гидразоновую группу ($-C=N-N-$), причем обе способны изомеризоваться по двойной связи при возбуждении видимым светом. 1,3,5-трифенилформазан (TPF) демонстрирует уникальный фотохромизм, который зависит от условий возбуждения и среды растворителя.

В то время как полярные растворители с более высокой полярностью приводят к снижению активационного барьера анти-син-изомеризации вокруг связи $C=N$, водородная связь имеет противоположно направленный эффект и может стабилизировать транс-анти-изомер при определенных условиях.

Известно [1], что многократная транс $\rightarrow$ цис $\rightarrow$ транс фотоизомеризация азобензольного фрагмента является триггером записи поверхностных рельефных решёток (SRG). Таким образом, SRG, образованные в результате массового переноса, вызванного только фотоизомеризацией молекул азобензола под воздействием монохроматического света, могут быть использованы для оптического хранения данных, в устройствах оптической связи, в стираемой и перезаписываемой голографической памяти и т. д.

В ходе работы были получены УФ-спектры TFT в пленках ПВБ – поливинилбутираль, Ф-32Л – сополимер трифторхлорэтилена и фтористого винилидена и Ф-42 – сополимер тетрафторэтилена и фтористого винилидена. Предложен способ стабилизации двух изомеров с характерной областью поглощения TFT в пленке на подложке из кварцевого стекла (рисунок).

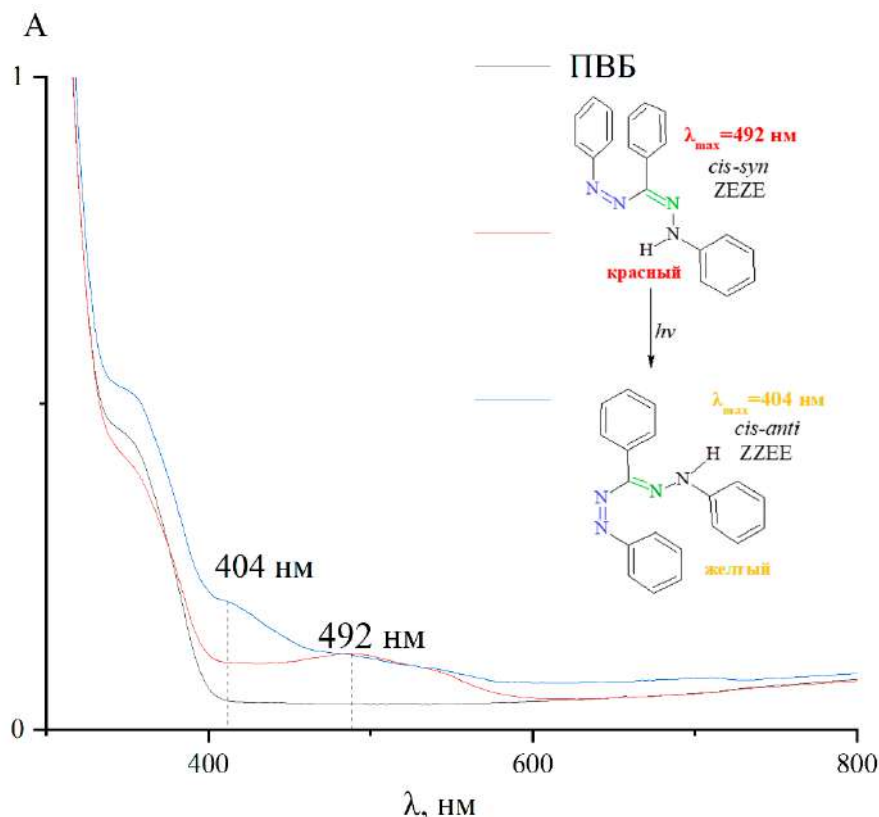


Рисунок. Фотоиндуцированная изомеризация TFT в пленке ПВБ

[1] Alam M.Z., Tomoko O., Tomonari O., Takamasa N., Seiji K., *Optical Materials*, **29**, №4, 365-370, (2006).

КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ДОМЕНОВ И ДОМЕННЫХ СТЕНОК В МОНОКРИСТАЛЛАХ ГАЛОГЕНИДНОГО ПЕРОВСКИТА MAPbCl_3

Шевага Н.И., Капитонов Ю.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

cooled235@gmail.com

С помощью катодолюминесценции были исследованы монокристаллы галогенидного перовскита MAPbCl_3 в низкотемпературной фазе. На полученных изображениях видны сегнетоэластические домены и доменные стенки, причём свечение стенок заметно ярче свечения доменов.

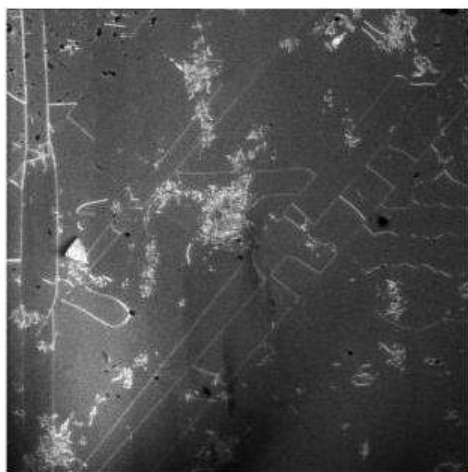
Ключевые слова: галогенидные перовскиты, домены, катодолюминесценция.

Галогенидные перовскиты являются перспективными материалами для применения в оптоэлектронике и фотовальтике. Наблюдение катодолюминесценции в электронном микроскопе как метод исследования имеет преимущество в виде высокого разрешения, что позволяет получать изображения поверхности образцов, на которых хорошо различимы мелкие детали.

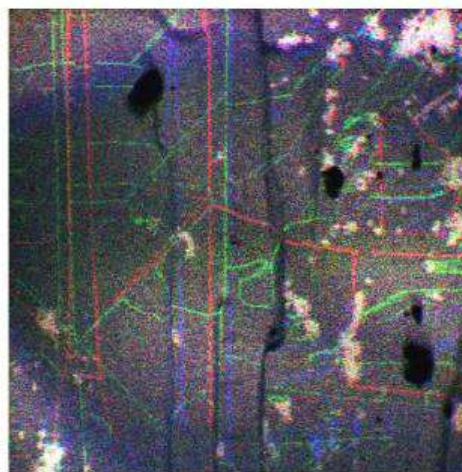
В ранних исследованиях было установлено, что в спектре фотолуминесценции MAPbCl_3 можно выделить три полосы: E - экситонная люминесценция, D - свечение дефектов, P - свечение посторонних включений [1]. Самой широкой в спектре является полоса D. Этот факт особенно интересен в связи с доменной структурой образцов, так как при сегнетоэластическом фазовом переходе между частями кристалла формируются дефекты - доменные стенки.

В ходе исследования было впервые обнаружено свечение доменных стенок. Интегральное по спектру свечение стенок ярче интегрального свечения доменов. Кроме того, были проведены температурные циклы, содержащие фазовый переход. После проведения циклов распределение стенок менялось, что подтверждает их доменную природу.

На рисунке а) представлен пример изображения, полученного с помощью катодолюминесценции. На рисунке б) показано RGB-наложение трёх изображений поверхности образца при температуре 150 К, демонстрирующее перераспределение доменов. Серые области (R) демонстрирует распределение доменов до температурных циклов, другие два (G, B) - после проведения первого и второго циклов, соответственно.



а)



б)

Рисунок. а) Пример изображения, полученного с помощью катодолюминесценции. Серые области - домены, белые линии - доменные стенки, белые "сетки" - неизвестные дефекты; б) RGB-наложение трёх изображений образца при температуре 150 К, демонстрирующее перераспределение доменов. Серые области - домены, линии различных цветов - доменные стенки в различных конфигурациях, каждой из которых отвечает свой цвет; белые области - неизвестные дефекты

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда №25-12-20007 на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Нанотехнологии».

[1] Samsonova A.Yu., Mamaeva M.P., Murzin A.O., Spanou V., Bashegurova E.A., Petrov Yu.V., Stoumpos C.C., and Kapitonov Yu.V., *J. Phys. Chem. Lett.*, **15**, 9405-9410, (2024).

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ЦЕРИЕМ НА ОПТИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ

Александрова Е.*, Асеев В., Никоноров Н., Раджарамакришна Р.**

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
aaaleksandrova@itmo.ru*, rajaramakrishna@itmo.ru**

Исследованы люминесцентные, структурные свойства стекол $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$, соактивированных ионами Gd_2O_3 , CeF_3 . Пики Ce^{3+} (344-352 нм) смещаются в красную область с ростом концентрации CeF_3 . Установлен перенос энергии Gd^{3+} (сенситизатора) $\rightarrow$ Ce^{3+} (активатору).

Ключевые слова: ионы церия, фотолюминесценция, барий-фосфатные стекла.

Стекла на основе P_2O_5 , легированные оксидами редкоземельных элементов, представляют значительный интерес благодаря их уникальным оптическим и структурным свойствам. В данной работе исследованы $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$ - стекла, соактивированные Gd_2O_3 и CeF_3 . Основу стекольной матрицы составляет P_2O_5 , известный своей превосходной стеклообразующей способностью, с добавками, такими как $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$ для повышения показателя преломления [1], MgF_2 для обеспечения высокой прозрачности в УФ- и видимой областях спектра [2], Al_2O_3 для улучшения термической и химической устойчивости [3], Gd_2O_3 в качестве модификатора структуры [4] и Yb_2O_3 для обеспечения эффективного переноса энергии [5]. CeF_3 вводится в состав в качестве сцинтилляционного центра, ценного за яркую люминесценцию и быстрое затухание в наносекундном диапазоне [6]. Для изучения структурных, оптических свойств и механизмов переноса энергии были синтезированы стекла с различными концентрациями CeF_3 , соактивированные Gd_2O_3 . Наблюдения показали, что эти стекла обладают интенсивным УФ-излучением при 347 нм, а также был зафиксирован процесс переноса энергии от ионов Gd^{3+} к Ce^{3+} (рисунок). Частичная диаграмма энергетических уровней ионов Gd^{3+} (сенситизатор) и Ce^{3+} (активатор) представлена на рисунке, что позволяет глубже понять механизм переноса энергии в соактивированных стеклах. Схема уровней указывает на возможность переноса энергии с уровней P_6^6 или I_6^6 ионов Gd^{3+} на 5d-уровни Ce^{3+} . Фосфатные стекла способны растворять высокие концентрации переходных металлов без потери аморфной структуры, а также обладают такими преимуществами, как низкая стоимость, более низкие температуры плавления, лучший коэффициент термического расширения и высокий электрический потенциал.

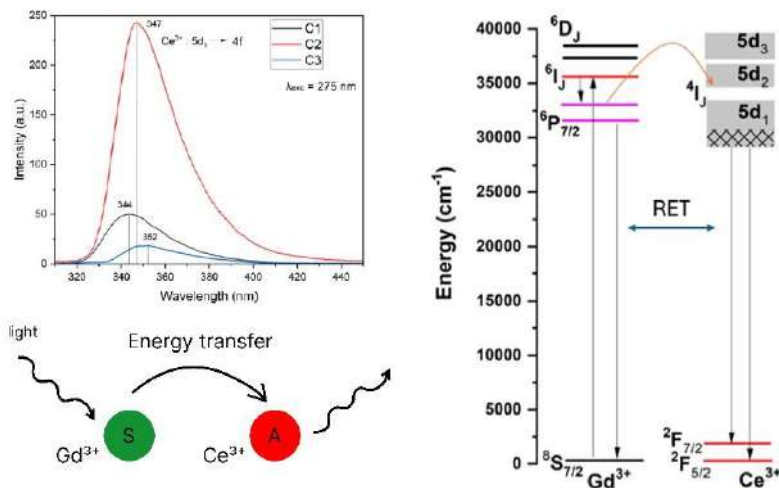


Рисунок. Люминесценция церия и явление переноса энергии в барий-фосфатных стеклах

Благодарности: Авторы выражают благодарность Университету ИТМО (Санкт-Петербург, Россия). Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-43-20020).

- [1] Бочарова Т.В., Карапетян Г.О., Тагильцева Н.О., Халилев В.Д., *Физика и химия стекла*, **27**, №1, 48-53, (2001).
- [2] Li W., Cao W., Zhou H., Zhang X., Wang K., *RSC Adv*, **14**, 2757-2762, (2014).
- [3] Ariane K., Tamayo A., Chorfa A., Rubio F., Rubio J., *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, **59**, №6, 239-250, (2020).
- [4] Xu H., Wang X., Jiang F., Liu J., Zhang J., Mei X., Zhang Y., *Journal of Non-Crystalline Solids*, **575**, 121196, (2022).
- [5] Krishnaiah K.V., Kumar K.U., Agarwal V., Murali C.G., Chaurasia S., Dhreshwar L.J., Lavin V., *Physics Procedia*, **29**, 109-113, (2012).
- [6] Rajaramakrishna R., Kaewjaeng S., Kaewkhao J., Kothan S., *Optical Materials*, **102**, 109826, (2020).

ПОРИСТАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ЛАЗЕРНО МОДИФИЦИРОВАННОГО ТИТАНА ДЛЯ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Курицкий М.С., Цибульникова А.В., Лятун И.И., Зюбин А.Ю., Самусев И.Г.

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

Mix-Mux@yandex.ru

В работе описывается методика создания лазерно-индуцированных пористых метаповерхностей на основе анодированного титана, обладающих плазмонным поглощением, увеличенной смачиваемостью и свойством усиления сигнала люминесценции, для использования в составе новых биосенсоров.

Ключевые слова: пористая метаповерхность, лазерное структурирование, усиление сигнала люминесценции.

В настоящее время метаповерхности на основе различных материалов, в том числе металлов, активно используются в самых различных оптических, механических, энергетических, электронных, тепловых и биомедицинских приложениях. Функциональные поверхностные структуры, возникающие в результате нано- и фемтосекундного лазерного воздействия, придают таким поверхностям абсолютно новые свойства [1].

В данной работе исследуется лазерно-индуцированная пористая метаповерхность на основе анодированного титана. Структурирование поверхности производилось лазерными импульсами длительностью 10 нс при частоте повторения импульсов 10 Гц при плотности мощности 280 мДж/см². Уникальность методики заключается в одновременном использовании двух гармоник лазерного излучения – основной (1064 нм) и второй гармоники (532 нм). Причём ИК-составляющая излучения фокусируется на поверхности образца, в то время как излучение второй гармоники остаётся несфокусированным за счёт использования соответствующей ИК-линзы. В результате воздействия, согласно заданной особой траектории, облучаемая поверхность образца приобретает характерную пористую морфологию, состоящую из нанотрещин шириной 10-40 нм и нанопор диаметром 70-200 нм (рисунок, а).

Данные метаповерхности отличаются ярко выраженным эффектом плазмонного поглощения, что подтверждается характерным видом кривых в спектрах действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости и спектрах коэффициентов отражения р- и s-поляризованного излучения, полученных в результате спектральной эллипсометрии образцов. Также данные поверхности обладают хорошей смачиваемостью с уменьшением угла смачиваемости после структурирования до 25-30°.

Наконец, целью настоящей работы было продемонстрировать увеличение интенсивности люминесценции контрольного вещества на структурированной поверхности титана ("Structured Ti / MP9") по сравнению с поверхностью, не подвергавшейся лазерному воздействию ("Ti / MP9"). В качестве люминесцирующей среды использовался раствор дигидрохлорида мезопорфирина IX (C₃₄H₃₈N₄O₄·2HCl, "MP9") концентрацией C = 10⁻⁴ М. Эксперимент показал двухкратное увеличение сигнала люминесценции (рисунок, б) и 20-кратное увеличение сигнала комбинационного рассеяния света при исследовании структурированных поверхностей методом рамановской спектроскопии.

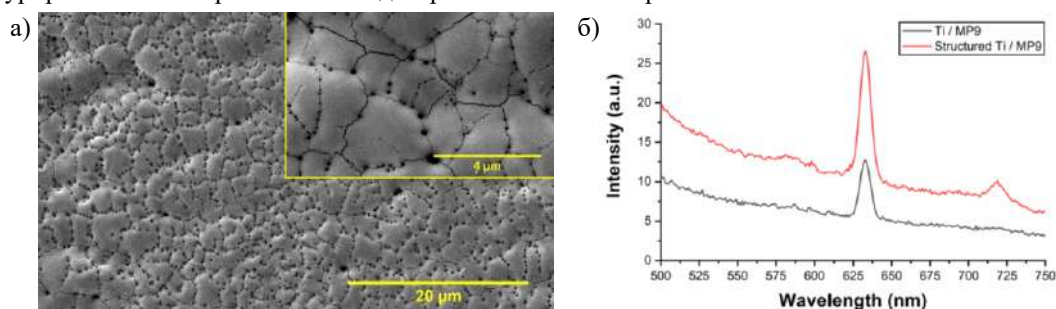


Рисунок. а – СЭМ-изображения структурированной поверхности титана; б – спектры люминесценции MP9 на структурированном и неструктурированном образцах

Описанные свойства плазмонного поглощения, увеличения смачиваемости и усиления сигнала люминесценции позволяют использовать такие метаповерхности в составе новых высокочувствительных биосенсоров и фотосенсибилизаторов [2], а также в качестве усилителей люминесцентных свойств слаболюминесцирующих сред.

Настоящее исследование выполнено в рамках Федерального проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZWM-2024-0010).

[1] Wang H., Deng D., Zhai Z., Yao Y., *Journal of Manufacturing Processes*, **116**, 247-283, (2024).

[2] Alhawari A., Almawgani A., Taya S., Daher M., Prajapati Y., Gumaih H., *Diamond & Related Materials*, **151**, 111867, (2025).

УСИЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ МШГ-РЕЗОНАТОРОВ ПРИ МОДИФИКАЦИИ АКТИВНОГО СЛОЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА

Ткач А.П., Соловьева Е.О., Стрелкова К.В., Богданов К.В.

Университет ИТМО, международный научно-образовательный центр физики наноструктур,
Санкт-Петербург, Россия
toni.tkach95@gmail.com

Исследованы активные резонаторы с модами шепчущей галереи на основе полистирольных микросфер, модифицированных квантовыми точками $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ и плазмонными наночастицами золота с различными стабилизаторами. Оптимизированы методы функционализации поверхности.

Ключевые слова: моды шепчущей галереи, квантовые точки, плазмонные наночастицы.

В настоящей работе рассмотрено применение квантовых точек $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в качестве среды усиления в активных МШГ-резонаторах, дополнительно усиленных плазмонными наночастицами золота с различными типами поверхностной модификации. Полученные гибридные структуры сочетают преимущества активной среды и плазмонных наночастиц, что позволяет значительно повысить локальное электромагнитное поле, усилить люминесценцию и улучшить характеристики мод резонатора [1, 2].

Для оптимизации связывания полистирольной микросферной базы с активными и усиливающими компонентами были протестированы различные методы функционализации поверхности: модификация (3-аминопропил)триэтоксисиланом (APTES), нанесение поли(аллиламина гидрохлорида) (ПАН) и прямое смешивание компонентов. Наиболее стабильные и воспроизводимые оптические характеристики продемонстрировали структуры, полученные с применением APTES, обеспечивающего формирование прочных ковалентных связей между квантовыми точками и поверхностью микросферы (рисунок).

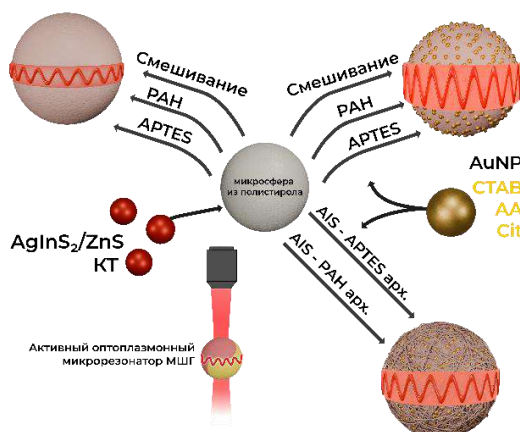


Рисунок. Схематическое изображение экспериментальных образцов и стратегий функционализации поверхности

Влияние типа стабилизатора на свойства золота является критически важным для качества резонансов [3]. В ходе работы были проанализированы наночастицы золота с цитратными (Au-Cit), аскорбатными (Au-AA) и СТАВ (Au-CTAB) лигандами. Результаты показали, что наилучшие свойства усиленных активных МШГ-структур наблюдались при использовании наночастиц Au-AA . Эти частицы обеспечивали концентрированное поле плазмонного резонанса и минимальные потери на рассеяние, что позволяло эффективно усилить излучение $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$. В то время как цитратные наночастицы вызывали среднее увеличение резонансной интенсивности, наличие слоя СТАВ, наоборот, препятствовало образованию концентрированного поля и вызывало потери, что подтверждает значение природы стабилизатора для повышения качества активных резонаторов.

Таким образом, результаты работы демонстрируют возможность оптимизации активных резонаторов на основе $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ квантовых точек за счёт выбора подходящего метода иммобилизации и типа плазмонных наночастиц золота, что открывает путь к созданию высококочувствительных фотонных устройств нового поколения.

Исследование поддержано РФФ № 23-72-10010.

- [1] Tkach A.P., Miropoltsev M.A., Kundelev E.V., Sokolova A.V., Khorkina S.A., Rogach A.L., & Bogdanov K.V., *Optics & Laser Technology*, **179**, №1, 111359, (2024).
- [2] Hamanaka Y., Ogawa T., Tsuzuki M., & Kuzuya T., *The Journal of Physical Chemistry C*, **115**, №5, 1786-1792, (2011).
- [3] Chen Y., Yin Y., Ma L., & Schmidt O.G., *Advanced Optical Materials*, **9**, №12, 2100143, (2021).

**ДИФФУЗИОННОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ ТЕМНОВОГО ТОКА В MWIR МЛЭ
HgCdTe nВ(SL)_n ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ**

**Войцеховский А.В.¹, Дзядх С.М.¹, Горн Д.И.¹, Михайлов Н.Н.^{1,2},
Дворецкий С.А.^{1,2}, Сидоров Г.Ю.², Якушев М.В.², Средин В.Г.³**

¹НИ ТГУ, г. Томск, Россия

²ИФП СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³ВА РВСН им. Петра Великого, Москва, Россия

gorn.di@gmail.ru

Приведены результаты исследования nВn-структуры на основе HgCdTe, предназначенной для детектирования излучения MWIR диапазона, со сверхрешеткой в барьерной области в темновом режиме работы и при воздействии постоянного ИК-излучения.

Ключевые слова: nВn, HgCdTe, сверхрешётка.

Проведены исследования nВn-структуры [1] на основе HgCdTe, предназначенной для детектирования излучения MWIR диапазона, со сверхрешеткой в барьерной области [2] в темновом режиме работы и при воздействии постоянной подсветки ИК-светодиодом. Выявлена асимметрия поведения положительной и отрицательной ветвей ВАХ в широком диапазоне температур. Установлено, что плотность тока при воздействии подсветки существенно увеличивается только при отрицательных смещениях, причем максимум чувствительности структуры наблюдается вблизи напряжения смещения – 0.5 В. При увеличении температуры структуры фоточувствительность сохраняется приблизительно до 180 К.

Проведён анализ зависимости энергии активации в структуре от напряжения смещения. Показано, что в рассматриваемой структуре в исследованном диапазоне напряжений смещения при положительных напряжениях реализуется генерационно-рекомбинационное ограничение темнового тока, а при отрицательных – диффузионное ограничение. Вывод о диффузионном ограничении темнового тока в рассматриваемой структуре при отрицательных напряжениях смещения подтверждается также проведённым исследованием токов поверхностной утечки.

Показано, что в исследованной в данной работе структуре за счёт использования сверхрешётки удалось несколько уменьшить барьер для неосновных носителей заряда по сравнению с аналогичной структурой с однородным барьером при той же величине напряжения смещения. А для напряжения смещения, соответствующего максимальному отношению «фототок/темновой ток», удалось достичь двукратного снижения величины энергетического барьера для неосновных носителей.

Хотя по общему уровню темнового тока исследованная структура продемонстрировала значения, на несколько порядков больше, чем аналогичная nВn структура с однородным барьером, полученные значения плотности темнового тока на несколько порядков меньше, чем любые известные MWIR nВn структуры на основе HgCdTe со сверхрешёткой в барьерной области.

Таким образом, показано, что в исследуемом образце на меза структуре диаметром 0,1 мм удалось реализовать диффузионное ограничение темнового тока при отрицательных напряжениях смещения. Следует отметить, что для фотодетекторов на основе nВn структур *n*-типа проводимости отрицательное напряжение смещения является рабочим. Также отметим, что изготовленный экспериментальный образец, обладает неоднородностью параметров полупроводниковых слоёв по площади структуры. Данная неоднородность, как предполагается, обуславливает различия в поведении отрицательных ветвей темновых ВАХ на различных меза структурах. При этом детально исследованные меза структуры с диаметром 0,1 мм продемонстрировали приемлемые значения плотности темнового тока, а также фототоки, превышающие уровень темнового тока на один порядок при определённом напряжении смещения и температуре.

Можно заключить, что nВn структура с данной конфигурацией слоёв является перспективной в качестве фотоприёмного MWIR устройства, но она требует дальнейшей оптимизации параметров сверхрешёточного барьера для уменьшения уровня темнового тока и одновременного снижения барьера для неосновных носителей заряда в валентной зоне. Тем не менее, практическая реализация данной структуры и экспериментальная демонстрация её работоспособности является важным этапом в развитии концепции nВn фотоприёмных устройств на основе HgCdTe.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>.

[1] Shi Q., Zhang S.-K., Wang J.-L., Chu J.-H., *J. Infrared Millim. Waves*, **41** №1, 139-150, (2022).

[2] Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y. *Ch. 6, II-VI Semiconductor-Based Unipolar Barrier Structures for Infrared Photodetector Arrays in Handbook of II-VI Semiconductor-Based Sensors and Radiation Detectors. Cham: Springer*, 135-154, (2023).

**ФОТОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИСТАЛЛАХ BaY_2F_8
ПРИ ДВОЙНОЙ АКТИВАЦИИ ИОНАМИ Tb^{3+} - Yb^{3+}**

**Зубарева А.М.*, Шавельев А.А., Шакиров А.А., Миннебаев Т.М., Олейникова Е.И.,
Сидоров И.Д., Гинкель А.К., Низамутдинов А.С.**

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики, Казань, Россия

* gumonya@list.ru

В данной работе были проведены исследования механизмов передачи энергии и преобразования света в кристаллах BaY_2F_8 при двойной активации парой редкоземельных ионов Tb^{3+} - Yb^{3+} .

Ключевые слова: передача энергии, BaY_2F_8 , люминесценция.

Солнечные панели остаются одним из ключевых направлений в развитии возобновляемых источников энергии. Современные исследования направлены на повышение их эффективности и долговечности за счет оптимизации материалов и конструкций. Одним из перспективных подходов является использование фторидных кристаллов в качестве дополнительных подложек или функциональных слоев, что позволяет улучшить оптические и термические характеристики солнечных панелей [1]. Примером практического применения являются фторидные стекла с примесными ионами эрбия Er^{3+} и Yb^{3+} . В исследовании было показано, что использование соединения $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$ позволило повысить значение квантовой эффективности на 0.05% [2].

В данной работе были исследованы фотодинамические процессы в кристаллах BaY_2F_8 при двойной активации ионами Tb^{3+} и Yb^{3+} . Были зарегистрированы и проанализированы спектры люминесценции в диапазоне длин волн 200-1100 нм для случаев повышения (апконверсионная люминесценция, возбуждение на длине волны 980 нм) и понижения (стоксова люминесценция, возбуждение на длине волны 266 нм) энергии кванта; также были проведены низкотемпературные исследования в диапазоне температур 77-300 К люминесценции ионов Yb^{3+} . Также была получена зависимость времени жизни от концентрации люминесцентного иона в случае понижения энергии кванта. Был произведен расчет параметров решетки в присутствии примесных ионов на основе данных рентгенофазового анализа, которые составили: $a = 6.94 \text{ \AA}$; $b = 10.48 \text{ \AA}$; $c = 4.24 \text{ \AA}$ и $\beta = 99.8^\circ$. Была произведена оценка количества фотонов возбуждения, участвующих в процессах передачи энергии в случае повышения энергии кванта, значения которых составили 2,27 и 2 для уровней $^5\text{D}_4$ и $^5\text{D}_3$, соответственно. Были проведены измерения квантового выхода для случаев повышения и понижения энергии кванта, которые составили 0,004%, 0,03% и 0,014% для, соответственно, 2 ат.%, 5 ат.% и 10 ат.% ионов Yb^{3+} (повышение энергии кванта); 70,3%, 49,3% и 55,05% для, соответственно, 2 ат.%, 5 ат.% и 10 ат.% ионов Yb^{3+} (понижение энергии кванта). Было выдвинуто предположение о наличии обратных процессов передачи энергии на ионы Yb^{3+} в случае повышения энергии кванта, по-видимому, за счет процессов кросс-релаксации на населенности $^5\text{D}_3$ и $^5\text{D}_4$ уровней ионов тербия. Также показано, что передача энергии в паре ионов Tb^{3+} - Yb^{3+} происходит не по кооперативным процессам, а, вероятно, по механизму переноса заряда.

[1] Green M.A. et al., *Prog Photovolt Res Appl.*, 1-13, (2023).

[2] Liu D., Wang Q., Wang Q., *Beilstein J. Nanotechnol.*, **9**, 2788-2793, (2018).

**ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НИКЕЛЕВЫХ ВОЛОКОН
НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПРОЗРАЧНЫХ
КОМПОЗИТНЫХ ПЛЁНОК ZnO/NiFs**

Кузнецова В.В., Низамеева Г.Р., Лебедева Э.М., Низамеев И.Р.

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия
viktori.a_kuznetsova@mail.ru

Получено прозрачное проводящее покрытие на основе сети из ориентированных волокон никеля в матрице оксида цинка и изучена зависимость поверхностного сопротивления материала от количества волокон никеля.

Ключевые слова: прозрачные электроды, оксид цинка, сеть волокон никеля.

В современной технологии важную роль играют прозрачные проводящие покрытия (ТСС), которые служат основой для создания прозрачных электродов. Такие электроды являются ключевыми компонентами тонкоплёночных солнечных элементов, фотоэлектрических сенсоров, тачскринов, дисплеев и других оптоэлектронных устройств [1]. Среди перспективных материалов для ТСС выделяется оксид цинка (ZnO), который рассматривается как возможная замена широко используемому, но более дорогому оксиду индия-олова (ITO) [2]. ZnO обладает рядом преимуществ: он нетоксичен, доступен по стоимости, отличается высокой фото- и химической стабильностью, а также может быть получен различными методами [3]. Однако его применение ограничивается сравнительно низкой электропроводностью, из-за чего исследования, направленные на повышение проводимости ZnO-покрытий, остаются востребованными.

В данном исследовании для повышения электропроводности оксида цинка был использован подход, заключающийся во внедрении упорядоченной сети никелевых волокон (NiFs) в ZnO-плёнку. В ходе эксперимента создали два типа покрытий: из чистого оксида цинка и композитного материала ZnO/NiFs с варьируемой концентрацией волокон в диапазоне 2,4–82,6 мкг/см². Методика изготовления включала несколько этапов: сначала предварительно синтезированные NiFs с ориентацией в магнитном поле наносили на очищенные стеклянные подложки, затем методом центрифугирования формировали ZnO-покрытие, после чего образцы подвергали отжигу.

Для исследования электропроводности композитных покрытий ZnO/NiFs было проведено измерение их поверхностного сопротивления (R_s) методом Ван дер Пау. Анализ показал, что чистая плёнка ZnO обладает высоким сопротивлением – 4×10^7 Ом/кв. При малых концентрациях NiFs (2,4 – 59 мкг/см²) проводимость остаётся недостаточной из-за отсутствия непрерывных проводящих путей: изолированные волокна не образуют устойчивых контактов, и R_s варьируется в диапазоне $4,6 \times 10^6$ – $1,5 \times 10^6$ Ом/кв. Улучшение проводимости наблюдается при достижении порога перколяции (59 мкг/см²), когда формируется связанная сеть волокон, обеспечивающая поверхностное сопротивление равное $R_s = 711,45$ Ом/кв. Дальнейшее увеличение концентрации NiFs до 70,8 мкг/см² снижает сопротивление до 299,45 Ом/кв, что в 2,4 раза лучше предыдущего значения. Однако превышение этой концентрации (82,6 мкг/см²) приводит к росту R_s до 3×10^7 Ом/кв из-за нарушения однородности распределения волокон и их агломерации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-73-00072.

[1] Patel J., Sharpe R.K., Quijada M.A., Rana M.M., *Nanomaterials*, **14**, №24, 2013, (2024).

[2] Shankar U., Oberoi D., Bandyopadhyay A., *Polym. Adv. Technol.*, **33**, №10, 3078-3111, (2022).

[3] Raha S., Ahmaruzzaman M., *Nanoscale Adv.*, **4**, №8, 1868-1925, (2022).

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МОЛИБДАТЕ ЛИТИЯ-НАТРИЯ В УСЛОВИЯХ SSF-СИНХРОНИЗМА

Денисов Д.А.¹, Демушкин Д.Ю.¹, Коняшкин А.В.²

¹МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

²ФирЭ РАН им. В.А. Котельникова, г. Фрязино, Россия

denisov.da@phystech.edu

В условиях ssf-синхронизма осуществлена генерация второй гармоники импульсного лазерного излучения на длине волны 1030 нм в кристаллах молибдата лития-натрия.

Ключевые слова: молибдат лития-натрия, генерация второй гармоники, инфракрасное излучение.

Кристаллический молибдат лития-натрия (химическая формула $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$, сокращенное название LNM) является относительно новым оптическим материалом фотоники. Исследования показали, что он обладает большим двулучепреломлением ($\Delta n = 0,262$ @ 435 нм, $\Delta n = 0,193$ @ 1014 нм) и высоким порогом лазерного разрушения (2,64 ГВт/см² при длине волны $\lambda = 1064$ нм, длительности импульса $\tau = 10$ нс, частоте повторения $f = 1$ Гц), что указывает на его применимость для создания поляризационных элементов мощных лазерных систем [1]. Также в одной из работ был проведен численный анализ процессов генерации второй гармоники (ГВГ) и параметрического преобразования излучения ближнего и среднего инфракрасного диапазона, который показал перспективность кристалла в области преобразования частоты лазерного излучения [2].

В настоящей работе в условиях ssf-синхронизма осуществлена ГВГ инфракрасного лазерного излучения с длиной волны 1030 нм в кристаллах LNM. Образцы $2 \times 5 \times 10$ мм³ были вырезаны в направлении $\theta = 90^\circ$, $\phi = 28^\circ$ из буль, выращенных методом Чохральского. В качестве излучения накачки использовалось импульсное линейно-поляризованное лазерное излучение со следующими параметрами: $\lambda = 1030$ нм, $\tau = 2,6$ нс, $f = 100$ кГц, диаметр пучка $d_{4\sigma} = 0,27$ мм. Излучение направлялось в образец (ориентация кристалла была такой, что кристаллооптическая ось z образца совпадала с направлением колебаний электрического вектора волны накачки), где происходил процесс ГВГ, после чего излучение второй гармоники (ВГ) и непреобразованное излучение накачки разделялось дихроичным зеркалом. График зависимости мощности ВГ и эффективности ГВГ от интенсивности излучения накачки представлен на рисунке. Наибольшая эффективность преобразования составила 14% при средней мощности накачки 7 Вт. Полученный результат свидетельствует о потенциальной возможности использования кристаллов LNM в процессах преобразования частоты лазерного излучения.

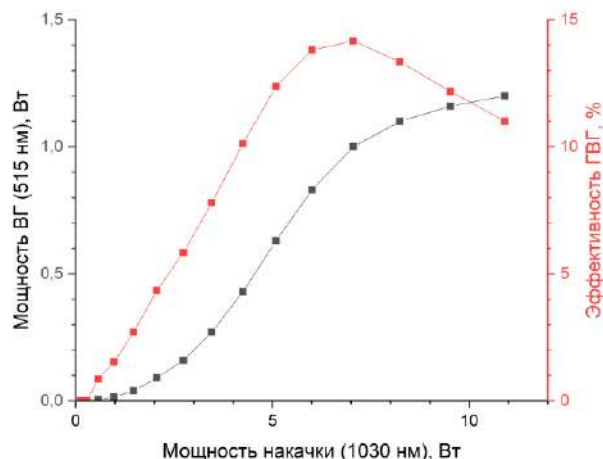


Рисунок. Зависимость мощности ВГ и эффективности ГВГ от интенсивности излучения накачки

[1] Du X., Gao Z., Chen L., Sun Y., Tao X., et al., *Chinese Opt. Lett.*, **20**, №5, 051602, (2022).

[2] Grechin S.G., Khohlov N.A., Kochiev D.G., Sukharev V.A., Sadovsky A.P., Avetissov I.C., *Opt. Mater.*, **135**, 113226, (2023).

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ СЛОЕВ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ InAs/(InAsSb)/InAsSbP МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Кириленко Я.Д.¹, Ружевич М.С.¹, Дорогов М.В.¹, Романов В.В.², Моисеев К.Д.²,
Мынбаев К.Д.^{1,2}, Чуманов И.В.³, Фирсов Д.Д.³, Комков О.С.³

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

³СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты исследования гетероструктур InAs/(InAsSb)/InAsSbP и образующих их слоёв методами оптического пропускания, отражения, фотолюминесценции и фотоотражения. Обсуждается влияние состава активных слоев InAs(Sb) на оптические свойства барьерных слоев InAsSbP и характеристики гетероструктур.

Ключевые слова: арсениды-антимониды индия, гетероструктуры, оптические свойства.

Твердые растворы арсенидов и фосфидов индия и мышьяка являются ключевыми материалами для изготовления полупроводниковых фото- и оптоэлектронных приборов, работающих в среднем инфракрасном спектральном диапазоне. Такие приборы широко используются в системах мониторинга окружающей среды, в промышленности и в медицинской диагностике [1]. Используя в активном слое полупроводниковых гетероструктур (ГС) твердый раствор $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$, можно охватить спектральный диапазон от 3,4 до 11,0 мкм. Однако увеличение мольной доли InSb y , необходимое для создания длинноволновых структур, приводит к сильному рассогласованию параметров кристаллической решетки эпитаксиального слоя активной области, подложки и барьерного слоя. Рассогласование параметров решетки и особенности осаждения друг на друга материалов с различным химическим составом в методе газовой фазной эпитаксии с использованием металлорганических соединений (МОГФЭ) могут приводить к специфическим свойствам выращенных слоев, составляющих ГС, и оказывать влияние на работу оптоэлектронных приборов [2]. Для определения этого влияния свойства ГС InAs/(InAsSb)/InAsSbP и отдельных их слоев в настоящей работе были исследованы с использованием методов оптического пропускания (ОП), оптического отражения (ОО), фотолюминесценции (ФЛ) и фотоотражения (ФО).

Исследование спектров ОП и сопоставление их со спектрами ФЛ (рисунок, а) позволило оценить качество узкозонных активных слоев из InAsSb; для них оказалось характерно неравномерное распределение состава (размытый край ОП) и присутствие акцепторных состояний (по данным низкотемпературной ФЛ). Аналогичные эффекты наблюдались для барьерных слоев из InAsSbP по результатам исследования ОО, ФО и ФЛ. Результаты, полученные методами ФЛ и ФО, хорошо согласовались и позволили определить фактическую ширину запрещенной зоны E_g этих слоев. Её значение оказалось меньше расчетной величины, заданной составом твердого раствора на стадии роста (рисунок, б). Качество этих слоев, как было установлено в работе, существенно зависело от состава материала, на котором они выращивались. В докладе будет обсуждаться влияние состава активного слоя ГС на качество барьерных слоёв и гетероинтерфейса InAs(Sb)/InAsSbP, и на электрические и оптические свойства ГС с различным составом активного слоя и при различных температурах.

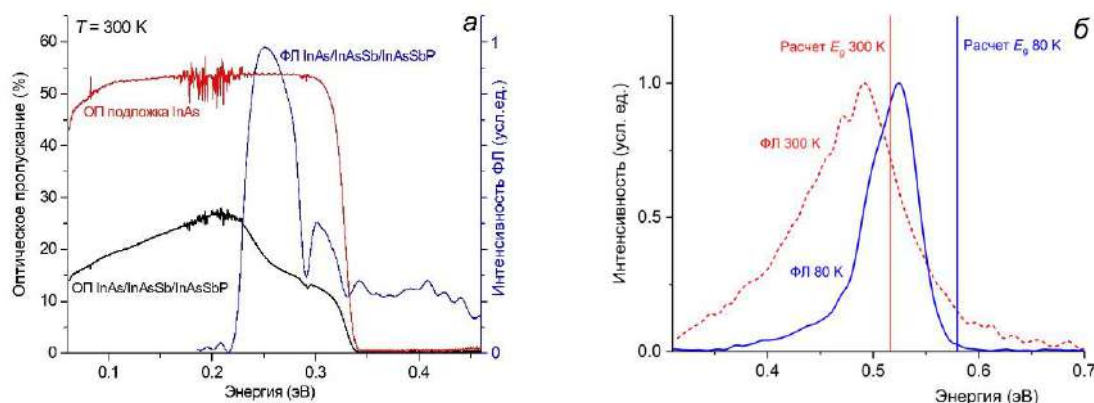


Рисунок. Спектры ОП подложки из InAs и ГС InAs/(InAsSb)/InAsSbP и спектр ФЛ слоя $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ из указанной ГС (а); спектры ФЛ слоя InAsSbP из той же ГС при $T = 80$ и $T = 300$ К с расчетными значениями E_g для этого слоя (б)

Работа в Университете ИТМО выполнена в рамках государственного задания FSER-2025-0005.

[1] Tang Y., Zhao Y., Liu H., ACS Sens., 7, 3582-3597, (2022).

[2] Романов В.В., Моисеев К.Д., ФТТ, 65, 1707-1714, (2023).

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ГОМОЭПИТАКСИАЛЬНОМ РОСТЕ НА ПОВЕРХНОСТИ Si(001)

Коханенко А.П., Кукунов О.И., Дирко В.В., Лозовой К.А.

Томский государственный университет, г. Томск, Россия
kokh@mail.tsu.ru

В работе методом дифракции быстрых отраженных электронов исследованы температурные особенности переходов от двумерно-островкового роста к росту по механизму движения ступеней при гомоэпитаксиальном осаждении кремния на поверхность Si(100).

Ключевые слова: кремний, молекулярно-пучковая эпитаксия, механизмы роста.

Развитие современных опто- и наноэлектроники предъявляет высокие требования к технологии создания наноструктур. На сегодняшний день наиболее совершенные эпитаксиальные структуры с минимальной концентрацией дефектов получают с использованием метода молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Обеспечение высокого качества наноструктур требует прецизионного контроля поверхности подложки и точных методов управления ее состоянием. В этом контексте метод дифракции быстрых отраженных электронов (ДБОЭ), встроенный в процесс МПЭ, зарекомендовал себя как надежный инструмент для *in situ* мониторинга морфологии поверхности при выращивании полупроводниковых наноструктур [1, 2]. Для создания приборных гетероструктур на основе соединений III–V групп, применяются высококачественные кремниевые подложки, полученные путем гомоэпитаксиального роста на кремнии с кристаллографической ориентацией (001). Управление переходами от двумерно-островкового роста к росту по механизму движения ступеней и от монокристаллического к биатомным ступеням в такой системе позволяет формировать атомарно-гладкую поверхность с минимальным числом дефектов и террасами, обладающими максимально возможной площадью.

Гомоэпитаксиальный рост Si на Si(001) происходит с образованием чередующихся террас двух типов [3]: террасы T_A и T_B со сверхструктурами 1×2 и 2×1 с параллельной и ортогональной ориентацией димерных рядов относительно края террасы (ступени). Синтез Si на Si(001) проводился со скоростью роста 0,1 МС/сек при различных температурах роста после высокотемпературного отжига подложки Si(001).

При проведении эпитаксиального роста Si на Si(001) методом дифракции быстрых отраженных электронов были построены зависимости отношения интенсивностей и отношения периодов колебаний при низких и средних температурах роста; получена температурная зависимость отношения интенсивностей рефлексов 2×1 и 1×2 в направлении $[100]$ при эпитаксии Si на Si(001) в широком диапазоне температур (рисунок). Анализ данных, полученных методом дифракции быстрых отраженных электронов в направлении $[110]$, показал, что отношение интенсивностей колебаний, соответствующих образованию различных типов террас зависит не только от их ширины, но и от разных коэффициентов отражения. При анализе синтеза Si на Si(100) в направлении $[100]$ на отношение интенсивностей рефлексов 2×1 и 1×2 коэффициенты отражения не влияют, поскольку все димеры расположены под одинаковым углом относительно пучка электронов. Однако на интенсивность могут влиять различные особенности дифракционной картины (например, фоновая засветка, дифракционные линии от объема вещества и др.), что усложняет анализ ростовых процессов.

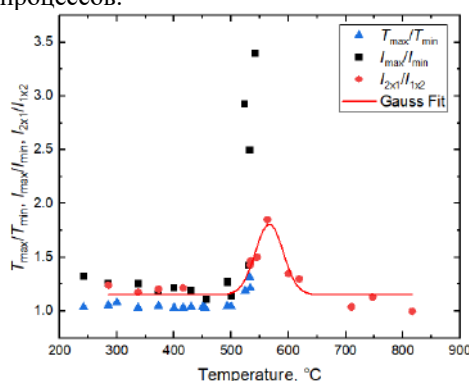


Рисунок. Зависимость отношений периодов и интенсивностей колебаний от температуры

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-12-20004, <https://rscf.ru/project/25-12-20004/> и Администрации Томской области.

[1] Margalit N., Xiang C., Bowers S.M., *Appl. Phys. Lett.*, **118**, 220501, (2021).

[2] Douhan R., Lozovoy K., Kokhanenko A., *Technologies*, **11**, 17, (2023).

[3] Yesin M., Deryabin A., Kolesnikov A., Nikiforov A., *Phys. Solid State*, **64**, 609-615, (2022).

МОДЕЛИРОВАНИЕ GFF ФИЛЬТРА ПО ЗАДАННОМУ СПЕКТРУ ПРОПУСКАНИЯ НА ОСНОВЕ ВБР

Корнеев С.Г., Мирошниченко Г.П., Аржаненкова А.Н.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты численного моделирования сглаживающего фильтра, основанного на моделировании требуемого спектра пропускания короткопериодных решеток (ВБР - волоконных брэгговских решёток), записанных в фоторефрактивном оптическом волокне (ОВ).

Ключевые слова: GFF фильтр, ВБР, chirpирование.

Волоконные фильтры (Gain Flattening Filters – GFF фильтры), выравнивающие спектр волоконно-оптического усилителя на оптическом волокне, активно применяются в системах оптоволоконной связи с целью выравнивания спектрального усиления и исключения сигнала комбинационного рассеяния [1]. Актуальной задачей является упрощение и улучшение производства таких фильтров, которую можно решить численным моделированием, заранее рассчитав необходимые параметры: Δn_{ef} - глубину модуляции эффективного показателя преломления, ξ - произвольное изменение фазы (chirpирование), Λ - период решетки, $\overline{\Delta n}$ - усредненное по периоду решетки возмущение показателя преломления и параметр аподизации γ . Подбор начальных параметров производится вручную, после чего решается система дифференциальных уравнений взаимодействующих мод:

$$F_{ap} = \exp\left(-\left(\frac{z - L/2}{\gamma \cdot L/2}\right)^2\right),$$

$$\frac{da(z)}{dz} = -i \frac{2\pi \cdot \Delta n_{ef}}{\lambda} \cdot F_{ap} \cdot a(z) - i \frac{\pi \cdot \Delta n_{ef}}{\lambda} \cdot F_{ap} \cdot \exp\left(i \cdot \left(\Delta\beta(\lambda) \cdot z - 2\pi\xi \left(\frac{z}{\Lambda}\right)^2\right)\right) \cdot b(z),$$

$$\frac{db(z)}{dz} = i \frac{\pi \cdot \Delta n_{ef}}{\lambda} \cdot F_{ap} \cdot \exp\left(-i \cdot \left(\Delta\beta(\lambda) \cdot z - 2\pi\xi \left(\frac{z}{\Lambda}\right)^2\right)\right) \cdot a(z) + i \frac{2\pi \cdot \Delta n_{ef}}{\lambda} \cdot F_{ap} \cdot b(z).$$

Данные формулы были получены в приближении медленных огибающих в работах [2-4].

Решением системы уравнений является выражение, описывающее коэффициент пропускания для последовательности chirpированных решёток:

$$T(L) = \left| \frac{a(L)}{a(0)} \right|^2. \quad (2)$$

Результат моделирования представлен на рисунке, где можно увидеть сравнение требуемой и смоделированной кривой фильтра для 4 решёток. С помощью спектроанализатора снимался спектр на выходе усилителя, по которому вычислялся требуемый спектр пропускания фильтра. Выбор количества решёток при моделировании находился из анализа требуемой кривой фильтра: каждая решётка связана с минимумом на спектре. После расчётов модель оптимизировалась с помощью уменьшения среднеквадратической погрешности. Данная работа позволит качественно улучшить производство GFF фильтров.

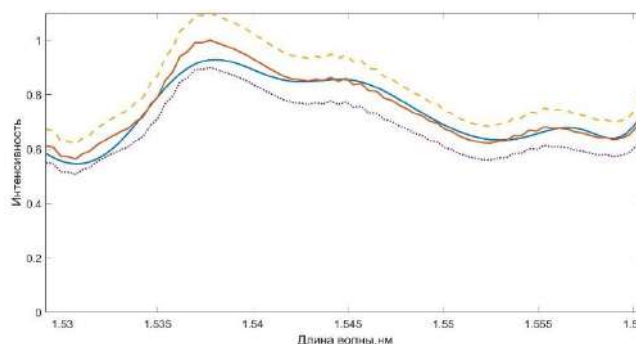


Рисунок. Сравнение требуемой кривой GFF фильтра и смоделированной

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006).

- [1] Dochow S. et al., *Optics Express*, **20**, №18, 20156-20169, (2012).
- [2] Kashyap R., *San Diego, CA: Academic.*, (2010).
- [3] Marcuse D., *Theory of Dielectric Optical Waveguides*, (1991).
- [4] Erdogan T., *Journal of Lightwave Technology*, **15**, 1277-1294, (1997).

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИОННЫЙ ОБМЕН NA-AG И NA-K В ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОМ СТЕКЛЕ

Попова В.А., Никоноров Н.В., Песняков В.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Lygma17@gmail.com

При объединении фото-термо-индуцированной кристаллизации (ФТИК) и низкотемпературного ионного обмена (НИО) в фото-термо-рефрактивном (ФТР) стекле возникает вопрос о возможном влиянии ФТИК на последующий процесс НИО. ФТИК слабо влияет на НИО.

Ключевые слова: фото-термо-рефрактивное стекло, брэгговская решетка, ионный обмен.

Фото-термо-рефрактивное (ФТР) стекло позволяет объединить технологию записи объёмных брэгговских решеток (ОБР) и технологию низкотемпературного ионного обмена (НИО). Было показано [1], что НИО может быть проведен после записи ОБР без искажения характеристик (периода и угла наклона) брэгговских решеток. Однако на данный момент характер влияния фото-термо-индуцированной кристаллизации (ФТИК), вследствие которой образуется ОБР, на протекание НИО не был установлен. В данной работе проведено исследование влияния ФТИК на процесс НИО Na^+-Ag^+ и Na^+-K^+ двумя подходами. В первом подходе использовался метод волноводной спектроскопии — проводился НИО в закристаллизованную и незакристаллизованную области стекла, в результате которого создавались Ag^+ и K^+ ионообменные волноводы, после этого измерялось распределение эффективных показателей преломления волноводных мод по глубине волновода и проводилось их сравнение. Во втором подходе проводилась запись ОБР за счет ФТИК и последующий НИО. В эксперименте анализировался контур угловой селективности ОБР до и после проведения НИО. Для волноводной спектроскопии половина образца ФТР стекла была облучена УФ, без записи ОБР. Все образцы стекла подвергались термообработке при 505 °С и шлифовке–полировке с двух сторон перед НИО. Исследования методом волноводной спектроскопии и анализ угловой селективности брэгговских решеток показали следующие результаты (рисунок относится к НИО Na^+-Ag^+ , для НИО Na^+-K^+ результаты подобны). Закристаллизованная область ФТР стекла слабо влияет на ионный обмен, т.е. волноводные структуры практически с одинаковыми параметрами образуются как в закристаллизованной, так и в незакристаллизованной области. Контур угловой селективности ОБР в ФТР стекле практически не меняется до и после НИО Na^+-Ag^+ и Na^+-K^+ .

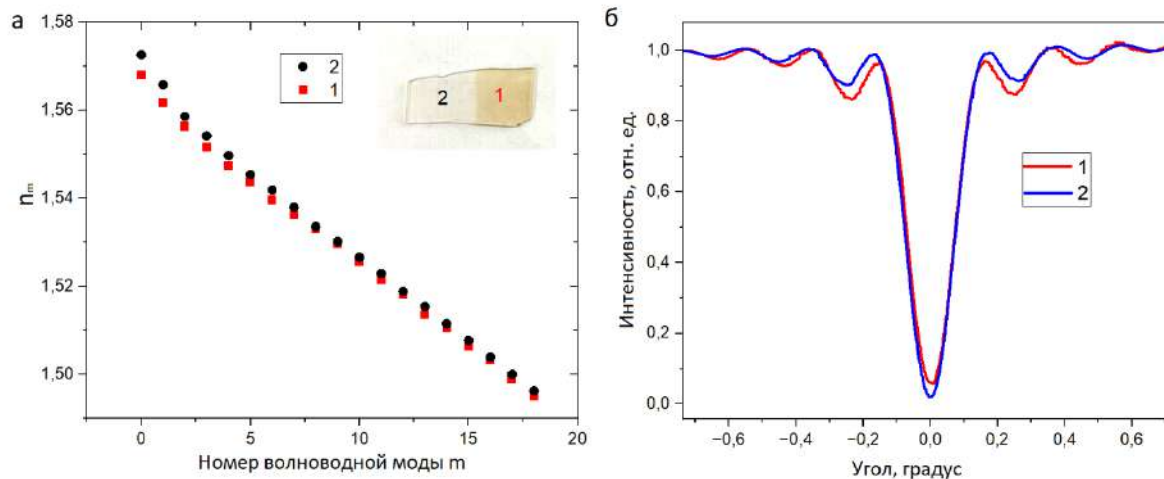


Рисунок. а) Эффективные показатели преломления серебряных волноводов в закристаллизованной (1) и незакристаллизованной области стекла (2). На вставке фото образца стекла для метода волноводной спектроскопии б) Контур угловой ОБР, записанной в ФТР стекле, после НИО Na^+-Ag^+ (1 кривая) и до НИО (2 кривая)

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Проект № 24-43-20020).

[1] Попова В.А., Марасанов Д.В., Никоноров Н.В., *ХОЛОЭКСПО 2024: XXI Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям (Казань, 9–13 сентября 2024 года)*, 1, №1, 300-303, (2024).

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ КРИСТАЛЛА ЛИТИЙ-НАТРИЕВОГО МОЛИБДАТА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1070 НМ

Демушкин Д.Ю.¹, Денисов Д.А.¹, Коняшкин А.В.²

¹МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

²ФИРЭ РАН им. В.А. Котельникова, г. Фрязино, Россия

demushkin.diu@phystech.edu

Методом пьезоэлектрической резонансной лазерной калориметрии измерен коэффициент оптического поглощения нелинейно-оптического кристалла литий-натриевого молибдата при воздействии непрерывного лазерного излучения с длиной волны 1070 нм в диапазоне интенсивностей 1 – 6 МВт/см².

Ключевые слова: молибдат лития-натрия, коэффициент оптического поглощения, пьезоэлектрическая резонансная лазерная калориметрия.

Литий-натриевый молибдат LiNa₅Mo₉O₃₀ (LNM) является новым нелинейно-оптическим (н-о) кристаллом, перспективным для решения современных задач фотоники. Ряд исследований данного материала показал, что LNM обладает высоким порогом лазерного разрушения (1,2 ГВт/см² при длине волны 1064 нм, длительности импульса 6 нс и частоте повторения 5 Гц) и большим двулучепреломлением ($\Delta n = 0,262$ @ 435 нм, $\Delta n = 0,193$ @ 1014 нм) по сравнению с материалами, широко используемыми в качестве поляризаторов [1, 2]. Таким образом, LNM является отличным материалом для создания поляризационных призм и элементов, преобразующих частоты мощного лазерного излучения.

В данной работе для измерения оптического поглощения кристаллов LNM был использован недавно представленный метод пьезоэлектрической резонансной лазерной калориметрии (ПРЛК). Ввиду того, что н-о кристаллы проявляют пьезоэлектрические свойства, в радиочастотном (РЧ) спектре их импедансов наблюдаются характерные резонансы на частотах, соответствующих собственным модам механических колебаний кристаллов. Эти частоты в первом приближении линейно зависят от температуры, потому при разогреве образца лазерным излучением изменение его температуры можно определить напрямую по величине сдвига резонансной частоты [3]. Важным преимуществом ПРЛК является отсутствие влияния рассеянного образцом излучения на измерение ΔT , что связано с использованием в качестве термодатчика не внешних детекторов, а самого образца.

Ранее коэффициент оптического поглощения был измерен на длине волны 1064 нм при одном значении мощности лазерного излучения [4]. В настоящей работе определено значение коэффициента поглощения в широком диапазоне мощностей. В качестве источника излучения используется непрерывный волоконный лазер с длиной волны 1070 нм. Поляризация излучения направлена перпендикулярно кристаллографической оси *b*, параметр качества пучка составляет $M^2 = 1,05$, диаметр пучка в кристалле равен $d_{FWHM} = 1600$ мкм.

Показано, что в диапазоне интенсивностей 1 – 6 МВт/см² коэффициент поглощения остается постоянным, а его среднее значение составляет $(4,7 \pm 0,4) \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ (рисунок).

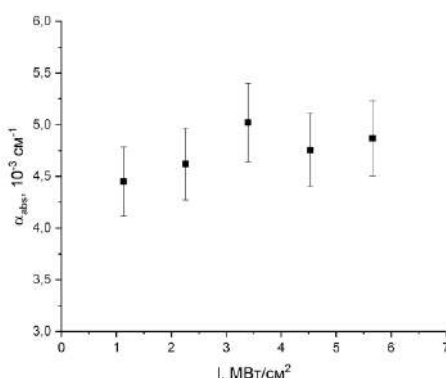


Рисунок. Зависимость коэффициента поглощения исследуемого кристалла LNM от интенсивности лазерного излучения на длине волны 1070 нм

- [1] Zhang W. et al., *Chem. Mater.*, **28**, №12, 4483-4491, (2016).
- [2] Du X. et al., *Chinese Opt. Lett.*, **20**, №5, 051602, (2022).
- [3] Grishchenko I.V. et al., *Opt. Spectrosc.*, **128**, 1368-1373, (2020).
- [4] Demushkin D.Y. et al., *2024 International Conference Laser Optics (ICLO), IEEE*, 94-94, (2024).

ЗАПИСЬ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В KCl-TiNO₃

Григоров Я.И.^{1,2}, Тютрин А.А.^{1,2}, Мартынович Е.Ф.^{1,2}

¹Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Crevedcko.1@gmail.com

В данной работе впервые реализован метод прямой лазерной записи люминесцентного изображения с помощью фемтосекундных лазерных импульсов внутри кристалла хлористого калия с примесью азотнокислого таллия; измерены спектроскопические характеристики образующихся центров люминесценции.

Ключевые слова: люминесценция, нелинейность, фотоматериал.

Существуют различные нелинейные объемные фотографические среды, такие материалы пропускают излучение малой интенсивности, но взаимодействуют с высокоинтенсивным излучением и при этом в них происходят процессы лазерно-индуцированного дефектообразования. Такие среды пригодны для изучения нелинейных эффектов взаимодействия света и вещества, а также могут использоваться в качестве материала оптических носителей информации. Подобные материалы ранее были созданы на основе LiF [1], фтористого магния [2], а также исследуемого в данной работе кристалла KCl [3].

Центры окраски, создаваемые в чистых кристаллах хлористого калия оптически и термически неустойчивы, поэтому для использования хлористого калия в качестве фотографической среды необходимо добавление примесей, в данном случае кристалл был допирован солью TiNO₃. Центры окраски, образующиеся в данном кристалле термически устойчивы вплоть до 400 K [4].

Под воздействием фемтосекундных лазерных импульсов внутри кристалла KCl было записано изображение пятиконечной звезды размером 5 мм на глубине около 1 мм. С помощью конфокального сканирующего люминесцентного микроскопа MicroTime 200, сопряженного со спектрометром Ocean Optics QE 65000, были измерены спектры фотолюминесценции центров окраски, созданных в данном кристалле (рисунок). Люминесценция возбуждалась пикосекундными лазерными импульсами с длинами волн 375, 405 и 470 нм.

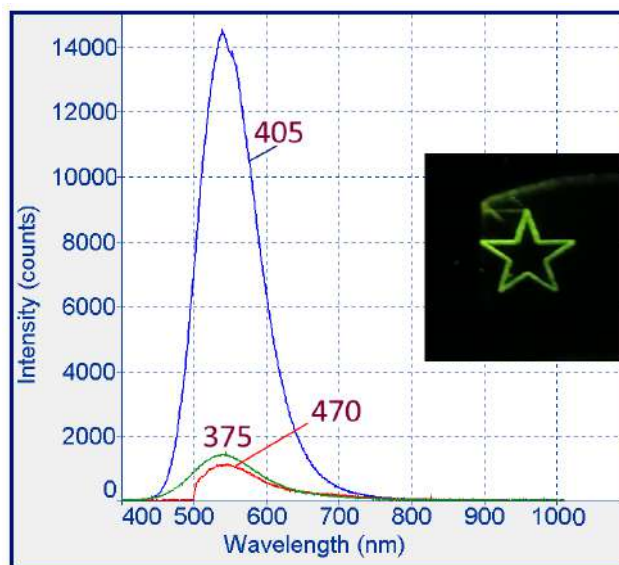


Рисунок. Спектр фотолюминесценции образованных центров окраски, возбуждаемой пикосекундными лазерными импульсами с длинами волн 375, 405 и 470 нм и сформированное внутри кристалла изображение звездочки (на вставке)

Также была измерена кинетика затухания данной люминесценции, программное разложение показало наличие двух временных компонентов с постоянными затухания 4,5 и 28 нс, что близко к результату [4].

[1] Мартынович Е.Ф., Глазунов Д.С., Григорова А.А. и др., *Опт. и спектр.*, **105**, №3, 380, (2008); Martynovich E.F., Glazunov D.S., Grigorova A.A. et al., *Opt. and Spectr.*, **105**, №3, 348, (2008).

[2] Martynovich E.F., Lazareva N.L., Zilov S.A., *J. Luminescence*, **234**, 117989, (2021).

[3] Мартынович Е.Ф., Нелинейный фотографический люминесцентный материал. Патент РФ № 2758567, (2021).

[4] Протасова Е.А., Ракевич А.Л., Мартынович Е.Ф., *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, **86**, №10, 1424-1428, (2022).

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ПЕРОВСКИТОВ CsPbI₃

Капустин Г.А., Колобкова Е.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Grigory414@yandex.ru

В работе исследуются влияние катионного (Cd^{2+}), и анионного (Cl , Br) замещение на люминесценцию йодных перовскитов, сформированных во фторофосфатном стекле. Дан анализ влияния размера квантовых точек на квантовый выход.

Ключевые слова: перовскит, квантовые точки, люминесценция.

Нанокристаллы галоидных перовскитов ($CsPbX_3$ $X = I, Br, Cl$) обладают уникальными оптическими и электронными свойствами, что делает их перспективными для оптоэлектроники. Однако йодидные перовскиты ($CsPbI_3$) демонстрируют фазовую нестабильность в условиях окружающей среды [1, 2], переходя из черной α -фазы в желтую δ -фазу, не имеющую люминесценции.

Исследование коллоидных нанокристаллов перовскитов показало, что легирование кадмием стабилизирует α -фазу и усиливает яркость излучения за счет уменьшения количества вакансий йода, образуя прочные связи $Cd-I$ [3]. Схожий эффект наблюдался при введении хлора [4] и брома [5].

В работе было показано, что стабилизация α -фазы квантовым выходом при введении в состав стекла брома или кадмия не приводит к увеличению квантового выхода ($Br - 0, 3\%$, $Cd - 2, 9\%$). Введение хлора стабилизирует α -фазу и подавляет возникновение δ -фазы.

В работе рассматриваются данные двух серий стекол, легированных хлором. В первой серии по сдвигу пика люминесценции в красную зону (рисунок б), сдвигу границы поглощения (рисунок а) и увеличению квантового выхода (с 10% до 13%), можно сделать вывод о росте кристаллов при повышении температуры термообработки [6-8]. Во второй серии при изменении температуры от 410°C до 460°C наблюдаются резкие изменения в спектре поглощения (рисунок в) и увеличение квантового выхода (с 2% до 8%), по которым можно судить о переходе из неперовскитной δ -фазы в перовскитную γ -фазу [9].

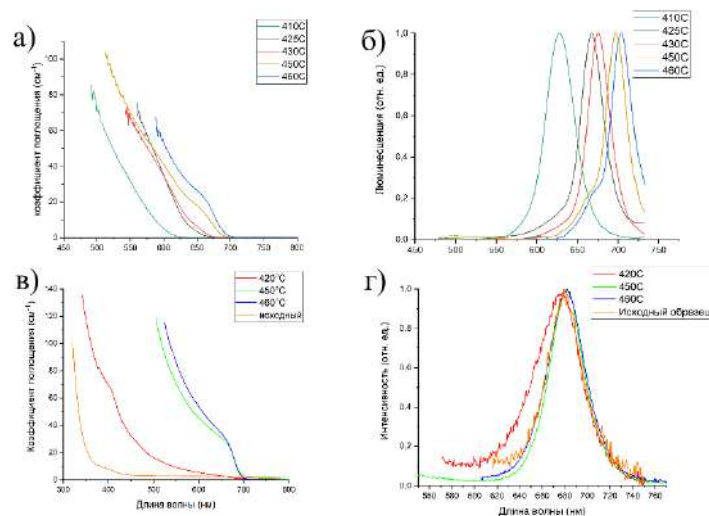


Рисунок. Спектры люминесценции и поглощения двух серий стекол, легированных хлором

В ходе исследования было установлено, что стабилизация γ -фазы не происходит при введении добавок Br и Cd . Добавление хлора увеличивает квантовый выход, но его значение зависит от размера наночастиц. Во второй серии наблюдается фазовый сдвиг – переход из δ -фазы в γ -фазу. Рост температуры обработки приводит к увеличению квантового выхода, но сохранению красного цвета свечения.

- [1] Yuan S. et al., *Journal of Materials Chemistry A*, **11**, №36, 19685-19695, (2023).
- [2] Wang N., Wu Y., *Materials*, **17**, №5, 1091, (2024).
- [3] Wu W. et al., *Journal of the American Chemical Society*, **142**, №8, 3989-3996, (2020).
- [4] Cakan D. N. et al., *RSC Advances*, **14**, №29, 21065-21074, (2024).
- [5] Guo S. et al., *Optics Letters*, **45**, №10, 2724-2727, (2020).
- [6] Rodríguez-Fernández M. et al., *MRS Bulletin*, **49**, №7, 677-690, (2024).
- [7] Wen Z. et al., *RSC Advances*, **9**, №43, 24928-24934, (2019).
- [8] Liu M. et al., *Chemical Engineering Journal*, **413**, 127547, (2021).
- [9] Kondo S. et al., *Solid State Communications*, **124**, №5-6, 211-214, (2002).

ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ СЕНСОРИКА НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ $\text{CeF}_3\text{-TbF}_3\text{-YF}_3$

Калиниченко С.И., Пудовкин М.С., Низамутдинов А.С.

Казанский федеральный университет, Институт физики, Казань, Россия
kalinichenko_sveta12@mail.ru

Для наночастиц $\text{Ce}_{0.5}\text{Y}_{0.5-x}\text{Tb}_x\text{F}_3$ ($x = 0, 0.001, 0.05$) было установлено, что эффективное время затухания люминесценции ионов Ce^{3+} значительно уменьшается с ростом температуры, что связано с явлением механизма температурного тушения.

Ключевые слова: люминесцентная термометрия, ионная пара $\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$, время затухания люминесценции.

Температура является критически важным параметром для множества технологических и научных применений, требующих точного контроля. Поэтому люминесцентная термометрия, как способ измерения температуры с высоким разрешением, активно развивается. В качестве наиболее перспективных материалов для нее рассматриваются наночастицы фторидов, легированные редкоземельными ионами. Поскольку многие механизмы передачи энергии в таких системах еще требуют изучения, в данной работе проводится спектрально-кинетическая характеристика наночастиц для целей люминесцентной температурной сенсорики.

Объектом исследования в этой работе были наночастицы $\text{Ce}_{0.5}\text{Y}_{0.5-x}\text{Tb}_x\text{F}_3$ ($x = 0.001, 0.002, 0.005, 0.01$ и 0.05), синтезированные методом со-осаждения из водных растворов при комнатной температуре с последующей микроволновой обработкой [1]. Полученные наночастицы твердых растворов имели средний диаметр 20 ± 1 нм и гексагональную фазу, соответствующую матрице CeF_3 . Для исследования кинетической характеристики образцов возбуждение люминесценции осуществлялось импульсным ультрафиолетовым лазерным излучением с длиной волны 289 нм от твердотельной ультрафиолетовой системы МОРА на основе кристаллов $\text{Ce}^{3+}:\text{LiCAF}$ [2].

Была проведена спектрально-кинетическая характеристика наночастиц $\text{Ce}_{0.5}\text{Y}_{0.5-x}\text{Tb}_x\text{F}_3$ ($x = 0, 0.001$ и 0.05) в диапазоне температур 293–523 К. Изучалась температурная зависимость эффективного времени затухания люминесценции иона Ce^{3+} , которая представлена на рисунке. Время затухания люминесценции иона церия заметно уменьшаются с увеличением температуры за счет наличия дополнительного механизма, обусловленного температурным тушением.

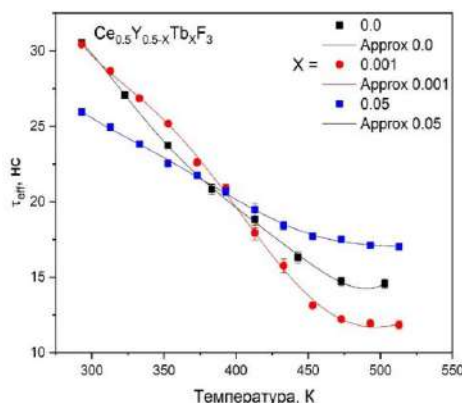


Рисунок. Эффективные времена затухания люминесценции τ_{eff} в зависимости от температуры для образцов $\text{Ce}_{0.5}\text{Y}_{0.5-x}\text{Tb}_x\text{F}_3$ ($x = 0; 0.001$ и 0.05)

Данное исследование финансировалось за счет субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (номер проекта FZSM-2022-0021).

[1] Li C., Yang J., Yang P., Lian H., Lin J., *Chemistry of Materials*, **20**, №13, 4317–4326, (2008).

[2] Farukhshin I.I., Nizamutdinov A.S., Korableva S.L., Semashko V.V., *Optical Materials Express*, **6**, №4, 1131–1137, (2016).

**ДИНАМИКА СОСТОЯНИЙ ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ И ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ ИОНОВ Tm^{3+} И No^{3+}
В СМЕШАННЫХ КРИСТАЛЛАХ $LiY_{0,3}Lu_{0,7}F_4$**

Миннебаев Т.М.¹, Низамутдинов А.С.¹, Шавельев А.А.¹, Семашко В.В.^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

²Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН, Казань, Россия

timurminnebaev271@mail.ru

В работе проведено исследование спектрально-кинетических характеристик серии смешанных кристаллов $LiY_{0,3}Lu_{0,7}F_4$ с совместным легированием ионами Tm^{3+} и No^{3+} , выращенных методом Бриджмена. Проанализированы механизмы сенсibilизированной люминесценции и поляризационные свойства спектров, которые демонстрируют заметное уширение линий. На основе экспериментальных данных определены параметры переноса энергии в паре $Tm^{3+} \rightarrow No^{3+}$, включая радиус Ферстера и константы скоростей прямого и обратного переноса.

Ключевые слова: сенсibilизированная люминесценция, Ферстеровская передача энергии.

Практический интерес к ионам Tm^{3+} и No^{3+} связан с возможностью создания лазерных систем, генерирующих излучение в инфракрасном диапазоне от 1,8 до 2,0 мкм. Такие источники света востребованы в медицинских целях, а также в системах экологического мониторинга. Все эти применения возможны благодаря сильному поглощению излучения на этих длинах волн молекулами воды [1].

Лазерная генерация в средах, активированных только Tm^{3+} или No^{3+} , ограничена сильными процессами кросс-релаксации. Эффективная генерация на длине волны 2 мкм достигается в соактивированных кристаллах по схеме сенсibilизированной люминесценции, где ионы Tm^{3+} передают энергию возбуждения ионам No^{3+} на переходах ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ и ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$, соответственно. Достижение инверсной населенности в такой системе осуществляется с использованием излучения с длиной волны 790 нм, которое может быть получено с использованием доступных лазерных диодов. Применение смешанных матриц $LiY_{1-x}Lu_xF_4$ способствует уширению спектральных линий, что потенциально повышает эффективность передачи энергии и расширяет полосу усиления, обеспечивая более широкий диапазон перестройки длины волны лазера, а также увеличению интеграла спектрального перекрытия.

В ходе исследований зарегистрирована интенсивная сенсibilизированная люминесценция ионов No^{3+} при возбуждении на переход ионов Tm^{3+} ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$. Проанализированы поляризационные зависимости спектров поглощения и люминесценции, соответствующие электронным переходам Tm^{3+} ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$, ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ и No^{3+} ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_5$, ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$. Полученные спектрально-кинетические данные использованы для количественной оценки параметров миграции энергии в исследуемой системе. Также обсуждаются перспективы достижения лазерной генерации в данной активной среде в сравнении с другими кристаллическими матрицами.

Работа выполнена в рамках субсидии, выделенной Казанскому (Приволжскому) федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

[1] Zhu X. et al., *Chinese Optics Letters*, **10**, №1, 012801, (2012).

УСИЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМОННЫХ АНТЕННАХ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР {InGaAs/InAlAs}

Ковалева П.М.¹, Кузнецов К.А.¹, Климов Е.А.^{2,3}, Ключков А.Н.⁴, Пушкарев С.С.²

¹МГУ им. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Акционерное общество НПО «Орион», Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

kovaleva.pm19@physics.msu.ru

Показано усиление генерации ТГц-излучения в пьезоэлектрических {InGaAs/InAlAs} гетероструктурах. Выделены механизмы генерации и продемонстрирован эффект увеличения излучаемой мощности ТГц поля в плазмонных фотопроводящих антеннах на основе данных структур.

Ключевые слова: терагерцовая фотоника, плазмонные фотопроводящие антенны.

Генерация терагерцового (ТГц) излучения в полупроводниковых тонких пленках и фотопроводящих антеннах (ФПА) обусловлена ультрабыстрыми фототоками, возникающими под действием фемтосекундных оптических импульсов при наличии электрического смещения. В гетероструктурах {InGaAs/InAlAs}, выращенных на подложках с ориентацией (111)A, напряжение между слоями, вызванное рассогласованием молярной доли индия, индуцирует пьезоэлектрическую поляризацию, формируя встроенное вертикальное электрическое поле. Показано, что такое встроенное поле приводит к существенному увеличению интенсивности ТГц-излучения по сравнению с ненапряжёнными референсными структурами.

Анализ поляризационных и угловых зависимостей ТГц-излучения позволяет выделить несколько механизмов его генерации: оптическое выпрямление (OR), оптическое выпрямление, индуцированное электрическим полем (EFIOR) [1], а также вклад диполя, колеблющегося под углом к поверхности [2]. Кроме того, в рамках настоящей работы была реализована интеграция плазмонных решеток с пьезоэлектрическими гетероструктурами, что позволило повысить поглощение оптического излучения и локализацию поля в ближней зоне.

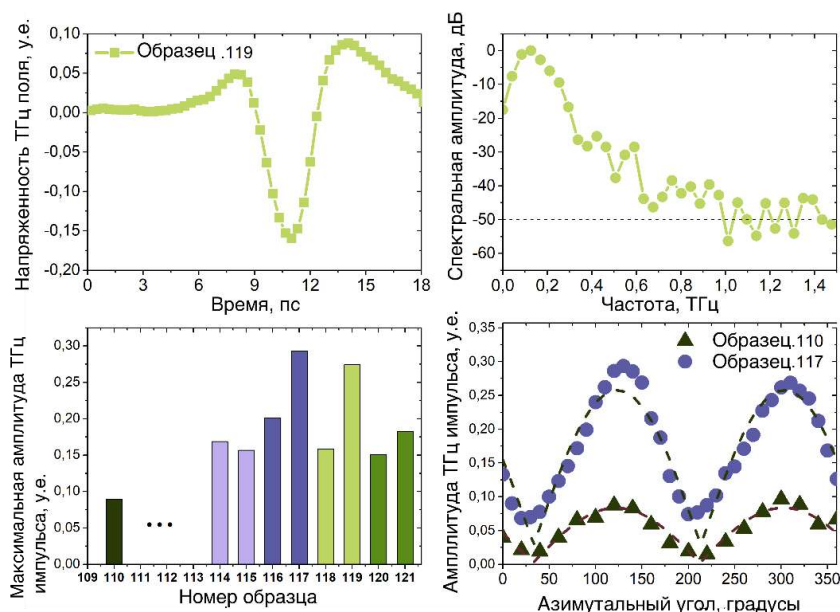


Рисунок. (a) Временная зависимость ТГц-излучения от пьезоэлектрической полупроводниковой гетероструктуры и соответствующий спектр (b); (c) максимальная амплитуда ТГц-сигнала от различных гетероструктур; (d) азимутальная угловая зависимость излучаемого ТГц-сигнала от гетероструктуры

Полученные результаты (рисунок) демонстрируют перспективность пьезоэлектрически-напряжённых гетероструктур без внешнего смещения как основы для создания компактных и высокоэффективных источников ТГц-излучения [3]. Данная работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00656) и Фонда содействия развитию теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант № 24-2-1-8-1).

[1] Reid M., Cravetchi I.V., and Fedosejevs R., *Phys. Rev. B*, **72**, №3, 035201, (2005).

[2] Beleckaitė I. et al., *Electron. Lett.*, **52**, №23, 1954-1956, (2016).

[3] Klimov E.A. et. al., *Opt. and Spectr.*, **133**, №3, (2025).

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ФОТОЭЛЕКТРОНОВ

В $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ P-I-N ДИОДЕ

Фань С.¹, Трухин В.Н.²

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

xfan97@gmail.com

В данной работе представлена аналитическая модель, описывающая динамику фотоэлектронов, возбуждаемые фемтосекундными оптическими импульсами в p-i-n диоде $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.

Ключевые слова: p-i-n диод терагерцового излучения, экранирующий эффект, эффект «velocity overshoot».

Исследуемая среда представляет собой гетероструктурный $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ p-i-n диод. Оптический импульс поглощается в i-слое p-i-n диода. При возбуждении p-i-n диода оптическими импульсами (аппроксимируемыми дельта функцией) в i-слое рождаются электроны и дырки, которые движутся в электрическом поле. Поскольку эффективная масса электрона намного меньше эффективной массы дырки, в нашей модели мы будем учитывать динамику фотоэлектронов, считая дырки неподвижными. При движении фотоэлектронов в электрическом поле электроны и дырки в i-слое разделяются, что приводит к созданию электрического поля, экранирующее исходное внутреннее поле. Формирования этого поля можно учесть учетом собственной емкости p-i-n диода (C). Таким образом, аналитическая модель, основанная на уравнениях баланса импульса и энергии, а также уравнения эквивалентной схемы подключения p-i-n диода, представляется в следующем виде:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{q}{m_e^*} \left(\frac{V}{d} + E_0 \right) - \frac{v}{\tau_p}, \quad (1)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = q \left(\frac{V}{d} + E_0 \right) v - \frac{\varepsilon - \varepsilon_L}{\tau_e}, \quad (2)$$

$$\frac{V_0 - V}{R} = SqNv + C \frac{dV}{dt}, \quad (3)$$

где q – элементарный заряд, m_e^* – эффективная масса, E_0 – начальное внутреннее электрическое поле, V – напряжение на p-i-n диоде, v – скорость дрейфа, τ_p – время релаксации импульса, ε – энергия фотоэлектрона, ε_0 – тепловая энергия, N – концентрация фотоэлектронов, S , d – сечение и толщина i-слоя, R – сопротивление нагрузки. При рассмотрении зависимости τ_p , τ_e , m_e^* от энергии фотоэлектронов [2], изменяется динамика фотоэлектронов и меняется механизм генерации ТГц. Решения уравнений (1) и (3) получены численно с использованием компьютерной программы «Mathematica». На рисунке показана динамика фототока для начальной концентрации электронов $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ и различных значений обратного смещения V_0 .

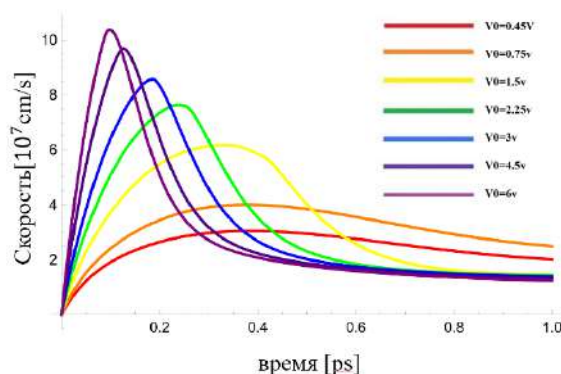


Рисунок. Зависимость во времени скорости фотоэлектронов, возникающих в p-i-n диоде

Отчетливо видно, что время, необходимое для достижения фотоэлектронами максимальной скорости, зависит от приложенного электрического поля, а зависимость положения максимума от времени не является монотонной. Полученные результаты соответствуют экспериментальным результатам [1]. Кроме того, результаты показывают, что при высоком внутреннем электрическом поле скорость фотоэлектронов, соответственно, генерация ТГц в гетероструктурированном p-i-n диоде $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, обусловлена ускорением электронов на баллистической стадии в электрическом поле до скорости, значительно превышающей скорость насыщения на временах в сотни фемтосекунд («velocity overshoot»), с последующим резким спадом, связанным с междолинным переходом электронов из Г-домена.

[1] Trukhin V., et. al., *Appl. Phys. Lett.*, **125**, №3, 031101, (2024).

[2] Ridley B.K., *J. Appl. Phys.*, **48**, 754-764, (1977).

СИНТЕЗ И ОПТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЁНОК МОЛИБДАТОВ ЕВРОПИЯ

Кузин Д.С., Большаков В.О., Кулинкин А.Б., Селькин А.В., Соколов Н.С.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

dskuzin@mail.ioffe.ru

Методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии выращены субмикронные слои Eu_xMoO_4 на подложках $\text{SrTiO}_3(001)$. Изучены их кристаллическая структура и химический состав, методом спектральной эллипсометрии определены оптические характеристики (n , k и E_g) при различных значениях x .

Ключевые слова: спектральная эллипсометрия, оптические постоянные, лазерная молекулярно-лучевая эпитаксия.

Широкозонные оксидные материалы, содержащие редкоземельные ионы, находят многочисленные применения в различных областях фотоники. Объемные монокристаллы, хотя и обладают совершенной структурой, часто трудны для выращивания и не дают перспективы масштабируемого производства. В качестве альтернативы можно использовать высококачественные субмикронные пленки, содержащие в своем составе редкоземельные ионы. Одним из наиболее перспективных методов синтеза таких пленок является лазерная молекулярно-лучевая эпитаксия. В настоящей работе упомянутый метод применен для создания эпитаксиальных гетероструктур со слоями метастабильной тетрагональной фазы молибдата европия Eu_xMoO_4 , имеющей структуру шеелита (пространственная группа $I4_1/a$), в которой все ионы Eu двукратно заряжены, и при $x < 1$ содержащую вакансии Eu^{2+} . Измерения картин дифракции быстрых электронов методом 3D-RHEED [1] (рисунок а), и рентгеновских лучей [2] показали, что структура шеелита сохраняется в широком диапазоне значений x , тетрагональная ось c направлена по нормали к поверхности пленки, а кристаллическая решетка пленки развернута на 45° в плоскости (001) подложки SrTiO_3 , вызывающей гетероэпитаксиальную стабилизацию тетрагональной фазы.

Следует отметить, что в литературе практически нет информации об оптических свойствах молибдата европия со структурой шеелита. Ранее в [2] лишь отмечалась зависимость вида спектров люминесценции Eu от относительного вклада Eu/Mo. В настоящей работе метод спектральной эллипсометрии был применен для выяснения спектральной зависимости действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления и определения ранее неизвестной ширины запрещенной зоны E_g . Измерения эллипсометрических параметров Ψ и Δ в диапазоне энергий 1.5–6.5 эВ были выполнены при комнатной температуре с помощью эллипсометра SemiLab SE-2000 на образцах с различной величиной x (рисунок б). Для анализа данных использован программный пакет SEA. В модели эффективной многослойной среды, кроме подложки STO и основного слоя молибдата европия, фигурировали тонкие интерфейсный и поверхностный слои.

Приведенные на рисунке б данные соответствуют спектральной зависимости коэффициента преломления материала с величиной ширины запрещенной зоны около 3.7 эВ, слегка меняющейся в зависимости от отношения Eu/Mo.

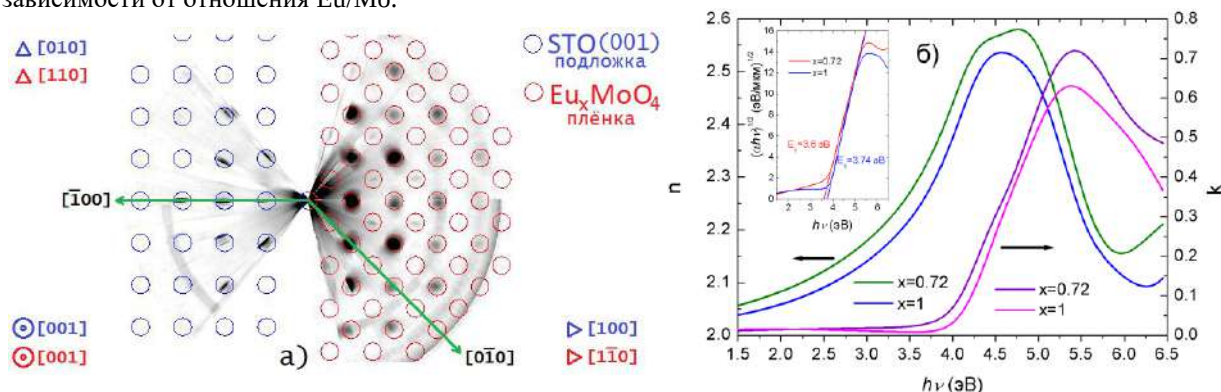


Рисунок. а) картина 3D-RHEED от гетероструктуры Eu_xMoO_4 , б) спектральные зависимости n и k для образцов с различной величиной x , на вставке диаграмма Тауца для непрямых разрешенных переходов

[1] Sutorin S.M., Korovin A.M., Fedorov V.V., Valkovsky G.A., Tabuchi M., Sokolov N.S., *J. Appl. Crystallogr.*, **49**, 1532-1543, (2016).

[2] Соколов Н.С., Коровин А.М., Кузин Д.С., Кулинкин А.Б., Смирнов А.Н., Сахаров В.И., Заморянская М.В., Бурковский Р.Г., Наумов С.В., Чернышев В.А., *Невская фотоника-2023, Всероссийская научная конференция с международным участием, сборник научных трудов (9-13 октября 2023 г.), Санкт-Петербург*, 39, (2023).

СВЕРХБЫСТРАЯ ФОТОНИКА И КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИКА

АКСИАЛЬНЫЕ СОЛИТОНЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ Колесникова А.Ю.¹, Апрелов Н.А.¹, Ватник И.Д.¹, Стурман Б.И.², Подивиллов Е.В.²

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

²Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия
a.kolesnikova@g.nsu.ru

Мы показываем, что в цилиндрическом микрорезонаторе с вариацией радиуса возможна генерация оптической частотной гребенки на основе аксиальных мод, при этом параметры соответствующего солитона не зависят от формы вариации радиуса.

Ключевые слова: микрорезонатор, диссипативный солитон, оптическая частотная гребенка.

В цилиндрическом микрорезонаторе с вариацией радиуса существует набор аксиальных мод с различным пространственным распределением вдоль оси волокна, при этом спектральное расстояние между ними может достигать 100 МГц [1]. Наше исследование раскрывает контринтуитивный факт: ширина аксиального солитона слабо зависит от дисперсии мод и может наблюдаться, в принципе, в системе с любой формой вариации радиуса. Это значительно упрощает изготовление системы для генерации оптической частотной гребенки с низкой частотой повторения. Таким образом, любой кусок оптического волокна, независимо от его формы и шероховатости поверхности, может быть использован для генерации гребенок.

Для анализа солитонных решений в цилиндрическом микрорезонаторе с вариацией радиуса $\Delta r(z)$ использовалось нелинейное уравнение Шредингера с потенциалом для амплитуды поля $A(z, t)$ [2]:

$$i \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{D_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + \omega_m \frac{\Delta r(z)}{r_0} A + \gamma |A|^2 A + i f(z) A = i f_p(z). \quad (1)$$

Здесь, ω_m – резонансная частота азимутальной моды m бесконечного цилиндра, $f(z)$ – функция распределения потерь, $f_p(z)$ – источник излучения, γ – коэффициент нелинейности Керра, r_0 – радиус волокна. Условием распространения солитона является баланс между дисперсией и нелинейностью $\Delta z^2/D_2 = 1/\gamma|A|^2$, где Δz – ширина солитона. Это условие может быть выполнено только в случае положительной дисперсии D_2 . В отличие от схожего условия на существование солитонного решения уравнения Лужиато-Лефевра, которое описывает динамику азимутальных мод микрорезонатора [3], коэффициент D_2 в данном случае не пропорционален модовой дисперсии, а является коэффициентом дифракции аксиальных $D_2 = c^2/(n^2\omega_m)$.

Важно подчеркнуть, что дифракция аксиальных мод является положительной константой, которая одинакова для цилиндрического микрорезонатора с любой формой вариации радиуса $\Delta r(z)$. Из этого следует, что генерация аксиальных солитонов возможна в цилиндрическом микрорезонаторе с любой формой вариации радиуса, а их ширины, при прочих равных параметрах, должны быть приблизительно равны.

Для подтверждения этого предположения мы промоделировали нелинейную динамику поля для двух форм вариации радиуса: прямоугольной и параболической с положительной ангармонической добавкой. При прочих равных параметрах в обоих случаях были получены солитоны со схожими характеристиками (см. рисунок). То есть для генерации солитона не обязательно добиваться точной параболической формы вариации радиуса, в то время как прямоугольную форму можно легко создать, сделав две выемки на поверхности волокна.

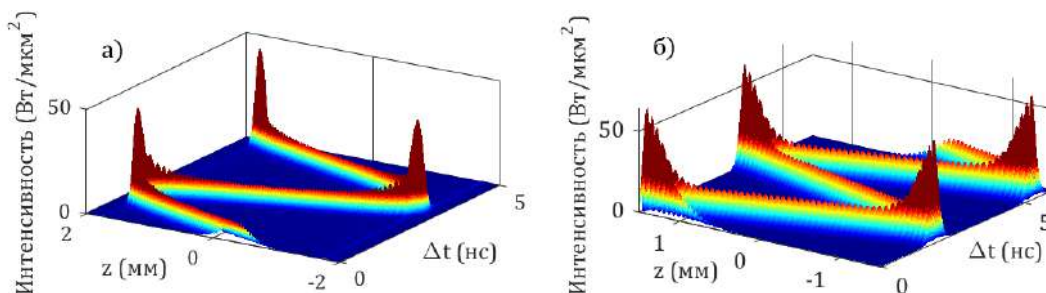


Рисунок. Солитоны в цилиндрическом микрорезонаторе с
а) параболической и б) прямоугольной формой вариации радиуса

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-12-20020 (<https://rscf.ru/project/25-12-20020/>) и Правительства Новосибирской области.

[1] Dvoyrin V. and Sumetsky M., *Opt. Lett.*, **41**, 23, 5547, (2016).

[2] Kolesnikova A.Y. and Vatik I.D., *Phys. Rev. A*, **108**, 033506, (2023).

[3] Herr T., et al., *Nature Photon.*, **8**, 2, 145, (2014).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВОЙ
СРЕДЕ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ НЕСКОЛЬКИХ ПРОДОЛЬНЫХ
И ПОПЕРЕЧНЫХ МОД ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА**

Кузьмин И.В.

ФИЦ ИПФ РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород, Россия
kuzminiv@ipfran.ru

В работе рассмотрена модельная задача (3D+t) о генерации импульса-пучка суперлюминесценции в четырехуровневой среде при условии неоднородно-уширенной линии рабочего перехода и низкой добротности плоскопараллельного резонатора.

Ключевые слова: суперлюминесценция, низкодобротный резонатор, четырехуровневая среда.

Исследование динамики систем, близким к лазерам класса D [1], работающих в режиме суперлюминесценции, в настоящее время остается актуальным [2]. В работе с использованием численных методов рассмотрена модельная задача о генерации инфракрасного импульса-пучка суперлюминесценции в твердотельной четырехуровневой среде [3] при учете пространственных эффектов. Моделирование выполнялось при помощи полуклассических уравнений Максвелла-Блоха в трехмерной (3D+t) постановке задачи в случае линейно-поляризованного излучения. В модели учитывались неоднородное уширение линии рабочего перехода и нерезонансные дисперсионные свойства активной среды. Характерные параметры (продольные и поперечные времена релаксации, спектральная ширина моды резонатора) выбирались таким образом, чтобы удовлетворять условиям, необходимым для реализации режима суперлюминесценции.

При проведении моделирования реализовывался пограничный режим генерации между классами C и D. В таком режиме поляризация среды (P) не следует точно за полем (E), при этом в фазовом пространстве ($\text{Re}E$, $\text{Im}P$, ΔN) присутствует выделенная плоскость (ΔN – инверсия населенностей на рабочем переходе). Рабочий переход в начальный момент времени был не инвертирован и исследовалась динамика системы как при непрерывной, так и при импульсной продольной накачке при учете пространственной решетки инверсии населенности на рабочем переходе.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (проект № FFUF-2024-0038).

[1] Ханин Я.И. Основы динамики лазеров. – М.: Наука. Физматлит, 368 с., (1999).

[2] Кочаровский В.В. и др., *УФН*, **187**, 367-410, (2017).

[3] Chang S.-H. and Taflove A., *Optics Express*, **12**, №16, 3827, (2004).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА НА СМЕЩЕНИЕ ЕГО ЧАСТОТЫ В ПРОЦЕССЕ ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО САМОРАССЕЯНИЯ

Халяпин В.А.

ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический
университет», БФУ им. И. Канта, Калининград, Россия
slavasxi@gmail.com

На основе метода моментов аналитически исследовано влияние длительности импульса на величину смещения центральной частоты сигнала в процессе вынужденного комбинационного саморассеяния. Показано, что при определенной длительности сигнала наблюдается максимум смещения частоты.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное саморассеяние, метод моментов.

Одномерное распространение импульса в дисперсионной, комбинационно-активной среде можно описать уравнением

$$\frac{\partial \psi(z, \tau)}{\partial z} = -\frac{2\pi}{c} \int_0^\infty \frac{\partial \chi(\tau')}{\partial \tau'} \psi(z, \tau - \tau') e^{i\omega_0 \tau'} d\tau' +$$

$$+ i\gamma \psi(z, \tau) \left((1 - f_R) |\psi(z, \tau)|^2 + f_R \int_0^\infty h(\tau') |\psi(z, \tau - \tau')|^2 d\tau' \right). \quad (1)$$

Здесь ψ – медленно меняющаяся огибающая, $\chi(\tau) = 2e^2 \sum_{l,j} N_l A_{lj} \exp(-\gamma_{lj} \tau) \sin \Omega_{lj} \tau / m \Omega_{lj}$ – диэлектрическая восприимчивость среды, $R(\tau) = (1 - f_R) \delta(\tau) + 3f_R h(\tau) / 2$, $h(t) = A \exp(-t/t_2) \sin(t/t_1)$, $A = (t_1^2 + t_2^2) / t_1 t_2$, t_1, t_2 – характерные времена отклика среды, f_R – параметр ВКР отклика, e, m – заряд и масса электрона, N_l – концентрация атомов или молекул сорта l , A_{lj} – величина, пропорциональная силе осциллятора j -го резонанса, ω_{lj} – частота соответствующего резонанса, γ_{lj} – спектральная ширина соответствующей линии, $\Omega_{lj} = \sqrt{\omega_{lj}^2 - \gamma_{lj}^2}$, z – координата, вдоль которой распространяется сигнал, τ – время в сопутствующей системе координат, γ – коэффициент кубической нелинейности. Если разложить в ряд дисперсионное и ВКР слагаемые под интегралом, то получаем стандартное уравнение

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = i \left(k - \frac{\omega_0}{c} \right) \psi - \sum_{n=1}^{n-1} \frac{(i)^{n-1}}{n!} \beta_n \frac{\partial^n \psi}{\partial \tau^n} + i\gamma \psi |\psi|^2 + i\gamma \psi \sum_{m=1}^m \frac{(-1)^m}{m!} T_{Rm} \frac{\partial^m |\psi|^2}{\partial \tau^m}. \quad (2)$$

Здесь $\beta_1 = \partial k / \partial \omega_0 - 1/c$, $\beta_n = \partial^n k / \partial \omega_0^n$ ($n \geq 2$), $k = n_0 \omega_0 / c$ – волновое число в вакууме c – скорость света, n_0 – показатель преломления на частоте ω_0 , $T_{Rm} = f_R \int_{-\infty}^\infty h(t) t^m dt$.

Анализ динамики параметров импульса проводился на основе метода моментов [1] для уравнения (1). Пробное решение выбиралось в виде

$$\psi = B \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - T}{\tau_p} \right)^2 + i \left(\phi + \Omega(\tau - T) - C \frac{(\tau - T)^2}{2\tau_p^2} \right) \right], \quad (3)$$

где B – амплитуда сигнала, τ_p – его длительность, C – параметр, определяющий частотную модуляцию, ϕ – фаза, T – временное запаздывание. Все параметры зависят от координаты z . Используя метод моментов, получаем систему уравнений для параметров сигнала. Отсюда получаем зависимость смещения частоты от длительности сигнала на начальных этапах его динамики.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта *Министерства науки и высшего образования РФ* № 075-02-2025-1789.

[1] Santhanam J., Agraval G., *Opt. Commun. A.*, **222**, 413-420, (2001).

АТТОСЕКУНДНОЕ СВЕРХИЗЛУЧЕНИЕ ТРЁХУРОВНЕВЫХ ИОНОВ Tm^{3+} СИНТЕЗИРУЕМЫЕ КАК МАКСИМАЛЬНО РАЗМЕРНЫЕ В ПЕРОВСКИТОВЫЕ СВЕРХТОНКИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ОБРАЗОВАНИЯ

Рыжов И.В., Воронов Я.В., Иванов Г.А., Буршанова А.А.

РГПУ им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

igoryzhov@yandex.ru

В полуклассическом приближении исследован максимально реальный акт сверхизлучения ионов Tm^{3+} синтезируемых как максимально размерные ионы в перовскитовый ультратонкий слой, который находится при сверхнизкой температуре в криогенной камере без атмосферы. При этом излучатели активированы в верхнее возбуждённое состояние и находятся в когерентном состоянии. Задействованы оптические каналы ионов Tm^{3+} в виде Λ -схемы оптических переходов: 628.5 THz (477 nm – синий свет) и 464.8 THz (645 nm – красный свет). В расчётах присутствует однородное уширение спектральной линии сверхизлучения. Показан первичный импульс сверхизлучения и последующая нелинейная пиковая структура комбинационных переходов между указанными высокочастотными каналами.

Ключевые слова: аттосекундное сверхизлучение, ультратонкие плёнки, оптические частоты.

В настоящее время двумерные объекты (кристаллы и подобные им полиморфные сверхтонкие образования) стали доминировать при исследовании их электрофизических и оптических свойств [1]. В настоящее время интенсивные исследования в этой области стали особенно актуальными на фоне прогресса в технологиях синтеза двумерных и квазидвумерных материалов [2] с известными своими и необычными электромагнитными характеристиками, среди которых можно выделить перовскитовые метаматериалы допированные редкоземельными ионами лантаноидов Er^{3+} , Tm^{3+} , Ho^{3+} , Nd^{3+} , Pr^{3+} и другими люминесцентными ионами [3] с мультиплетной структурой основного состояния.

Исследование выполнялось в полуклассическом электродипольном приближении, когда излучатели описывались квантово-механически, а поле определялось классически уравнениями Максвелла (рисунок).

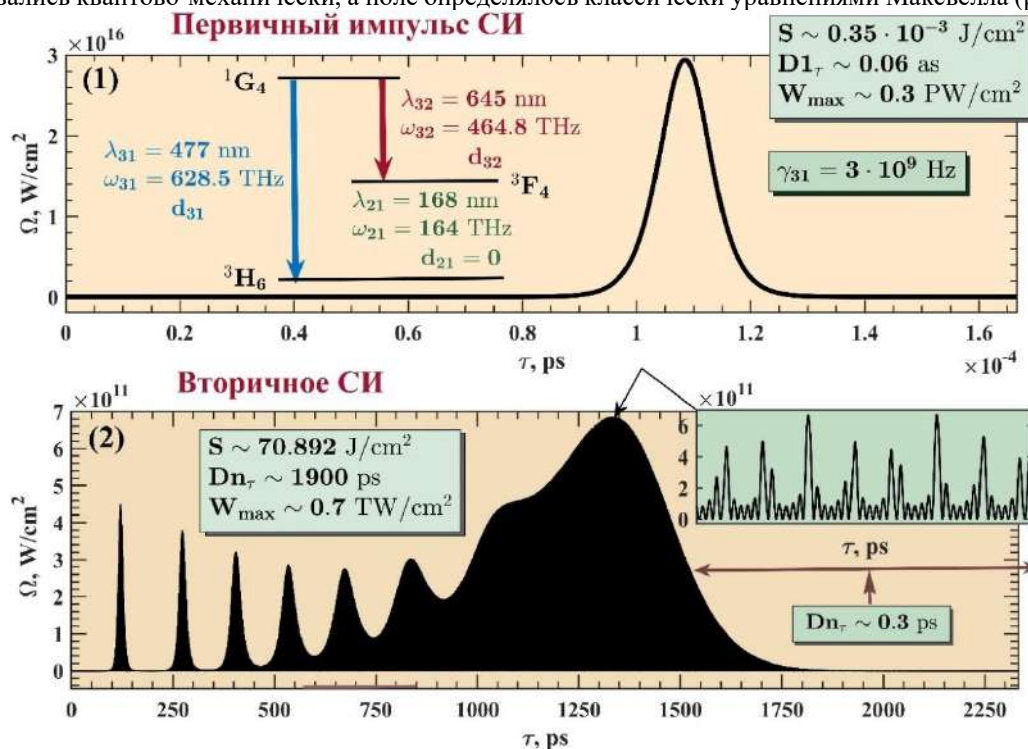


Рисунок. (1) – первичный импульс сверхизлучения (СИ). Рисунок вставка – схема энергетических состояний ионов Tm^{3+} . С права характеристики импульса СИ: S – площадь импульса или внутреннее ударное воздействие, испытываемое сверхтонким веществом от первичного импульса, $D1\tau$ – длительность импульса, W_{max} – пиковая мощность. **(2)** – вторичное СИ вещества. Справа – аттосекундная пиковая структура в максимуме его излучения, S – суммарная энергия на cm^2 пиковой структуры СИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РГПУ им. А.И. Герцена (Паспорт №ВН-84).

[1] Ryzhov I.V., Malikov R.F., Malyshev A.V., Malyshev V.A., *J. Opt.*, **23**, 115102, (2021).

[2] Scuri G. et al., *Physical Review Letters*, **120**, 037402, (2018).

[3] He Y., Rao H. et al., *BMC Part of Springer Nature, Cancer Nanotechnology*, **14**, 52, (2023).

ДИНАМИКА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ОТКЛИКА КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ПРИРОДЫ В ПОЛЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Казаков И.И., Гордеев Д.М., Гусельников М.С., Козлов С.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
ikazzzakov@yandex.ru

В настоящей работе показано, что временная задержка между терагерцовым импульсом и индуцированным им нелинейным поляризационным откликом колебательной природы отличается от известных параметров инерционности нелинейного отклика в несколько раз; в некоторых случаях - на порядок.

Ключевые слова: колебательная нелинейность, время инерционности, терагерцовый диапазон.

Время установления (инерционности) нелинейного отклика наряду с коэффициентом нелинейного показателя преломления (КНПП) является ключевой характеристикой механизма нелинейности. Этот параметр определяет скорость возникновения нелинейных эффектов при взаимодействии излучения с веществом, а, значит, характеризует быстродействие устройств на основе соответствующего механизма нелинейности. Все известные механизмы нелинейности в оптическом и ИК диапазонах характеризуются либо большим КНПП и большим временем инерционности, либо малым КНПП и малым временем инерционности. Недавно обнаружилось, что нелинейность показателя преломления колебательной природы ряда сред в терагерцовом (ТГц) диапазоне характеризуется одновременно большим КНПП (в миллион раз больше, чем в видимом диапазоне) и малым временем инерционности (по экспериментальным оценкам – менее 1 пс) [1]. В связи с этим встал вопрос о точном определении времени инерционности колебательного механизма нелинейности. В нелинейной оптике принято считать, что время установления нелинейного отклика имеет порядок обратной частоты ближайшего резонансного перехода [2]. Однако такое определение носит скорее феноменологический характер и не отражает сути физических процессов, протекающих при возбуждении нелинейного отклика. Поскольку нелинейный отклик колебательной природы может быть описан аналитически с помощью модели ангармонического осциллятора, то представляется возможным сопоставить феноменологическое определение времени инерционности с реальной динамикой поляризации вещества в поле ТГц излучения. Решению настоящей задачи посвящена данная работа.

Поляризационный отклик колебательной природы в приближении однородной и изотропной среды описывается системой скалярных уравнений

$$\begin{cases} \partial_t^2 P_1 + \gamma \partial_t P_1 + \omega_0^2 P_1 = q^2 NE/m \\ \partial_t^2 R + \gamma \partial_t R + \omega_0^2 R = 2a^2 P_1^2/q^2 N^2, \\ \partial_t^2 P_3 + \gamma \partial_t P_3 + \omega_0^2 P_3 = RP_1 - bP_1^3/q^2 N^2 \end{cases}, \quad (1)$$

где γ – коэффициент затухания молекулярного осциллятора, ω_0 – собственная частота его колебаний, q – эффективный заряд осциллятора, N – концентрация осцилляторов, m – эффективная масса осциллятора, R – квадратичный функционал, описывающий вклад квадратичного ангармонизма локальных молекулярных колебаний в кубический макроскопический поляризационный отклик среды, a, b – коэффициенты, характеризующие силу квадратичного и кубического ангармонизма локальных молекулярных колебаний, соответственно. В первом приближении можно пренебречь влиянием среды на поле (предел бесконечно тонкой среды) и рассмотреть только динамику поляризационного отклика в поле ТГц импульса. На рисунке представлена динамика кубической поляризации на фоне ТГц импульса с центральной частотой 0.5 ТГц, индуцирующего эту динамику в кристалле ниобата лития. Задержка между поляризационным откликом и полем составляет порядка 15 фс, в то время как $1/\omega_0 \approx 40$ фс.

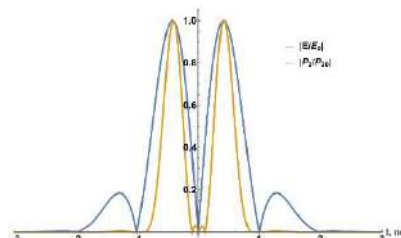


Рисунок. Динамика кубической поляризации колебательной природы (оранжевая кривая) при возбуждении среды ТГц импульсом (синяя кривая)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках гранта № 24-22-00084.

[1] Tsyurkin A., *Opt. Express*, **10**, 10419, (2019).

[2] Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. - М: Наука, 1988 - 310 с.

ДИНАМИЧЕСКИЕ МИКРОРЕЗОНАТОРЫ, НАВОДИМЫЕ В СРЕДЕ
ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИМИ ИМПУЛЬСАМИ

Дьячкова О.О.^{1,2}, Архипов Р.М.¹, Архипов М.В.¹, Пахомов А.В.², Розанов Н.Н.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

o.o.dyachkova@gmail.com

Приведены последние результаты в области создания динамических микрорезонаторов (ДМ), наводимых столкновениями предельно коротких полупериодических импульсов в среде. Рассмотрена динамика ДМ при несимметричном столкновении импульсов, обсуждается применение таких структур.

Ключевые слова: предельно короткие импульсы, аттосекундные импульсы, динамические микрорезонаторы.

Сверхкороткие униполярные электромагнитные импульсы имеют ненулевую электрическую площадь, сверхширокий спектр и не имеют несущей частоты; из-за их однонаправленного воздействия на заряды они могут эффективно использоваться для управления характеристиками квантовых систем [1]. При их когерентном взаимодействии со средой [2], т.е. когда время взаимодействия намного короче времени релаксации разности населенностей T_1 и поляризации T_2 , одним из потенциальных применений становится создание и управление решетками разности населенностей. Особый интерес представляют структуры, созданные путем перекрытия аттосекундных импульсов, состоящих из небольших зон постоянной разности населенностей с резкими фронтами - динамические микрорезонаторы [3]. Предыдущие исследования [4, 5] продемонстрировали возможность быстрого создания, "стирания" и манипулирования геометрией индуцированных ДМ в резонансной среде при использовании униполярных импульсов разной формы.

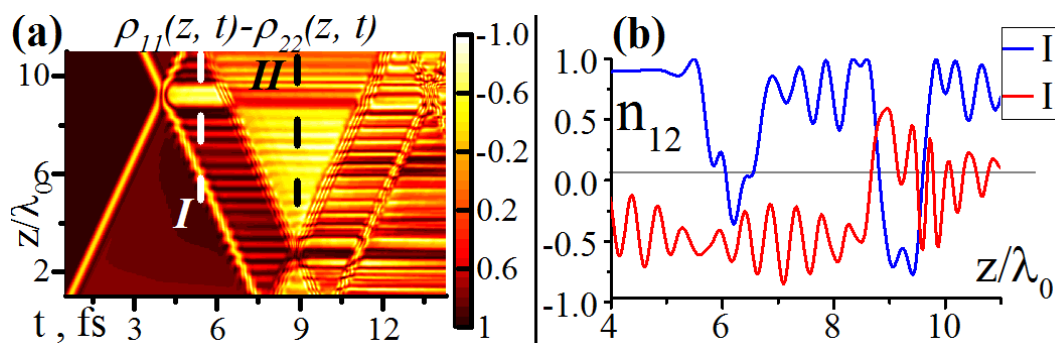


Рисунок. (а) Пространственно-временная динамика резонансной среды для перехода 1-2, $n_{12}(z, t) = \rho_{11}(z, t) - \rho_{22}(z, t)$; **(б)** мгновенное значение инверсии населенности n_{12} как функция координаты в фиксированный момент времени, после прохождения второго (синяя линия) и третьего (красная линия) импульса, соответствующее сечениям I и II на (а)

Однако в них контроль ДМ был возможен только при помощи еще одного столкновения. В последних работах, на основе асимметричного столкновения импульсов был предложен другой способ изменения структур [6]. На рисунке (а) представлена динамика разности населенностей в асимметричном режиме; на рисунке (б), представлено мгновенное значение разности населенностей. Как видно на рисунке, в таком режиме возможно как создание, так и "стирание" ДМ, а также формирование больших участков постоянной разности населенности. Таким образом, используя несколько импульсов, сталкивающихся в разных точках, возможно разделить среду на различные участки, создав контролируемую «маску» среды, существующую на масштабе времени T_1 . Этот подход имеет потенциал для точного изменения характеристик среды в определенные моменты времени, аналогично идеям, описанным в [7].

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-12-00012 и Государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 0040-2019-0017.

[1] Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Rosanov N.N., *Quantum Electronics*, **50**, 801, (2020).

[2] Shtyrkov E.I., *Optics and Spectroscopy*, **114**, 96, (2013).

[3] Архипов Р.М., Архипов М.В., Пахомов А.В., Дьячкова О.О., Розанов Н.Н., *Опт. и спектр.*, **130**, №11, 1707, (2022).

[4] Архипов Р.М., Дьячкова О.О., Архипов М.В., Пахомов А.В., Розанов Н.Н., *Письма в ЖЭТФ*, **121**, №7, 544, (2025).

[5] Arkhipov R.M., Pakhomov A.V., Diachkova O.O., Arkhipov M.V., Rosanov N.N., *J. Opt. Soc. Am. B*, **41**, 1721, (2024).

[6] Diachkova, O., Arkhipov, M., Rosanov, N., Arkhipov, R., *J. Opt. Soc. Am. B*, **42**, 1407-1414, (2025).

[7] Hassan, M.T., *ACS Photonics*, **11**, 334, (2024).

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ФАЗОВЫХ СИНГУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКИ ФРЕНЕЛЯ

Пантелеева Е.П.¹, Мельникова Е.А.¹, Горбач Д.В.¹, Толстик А.Л.¹,
Слюсаренко С.С.², Карабчевская А.^{3,4}

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

²Университет Гриффита, Брисбен, Австралия

³Университет имени Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль

⁴Университет Ланкастера, Ланкастер, Великобритания

pantsialevevakate@gmail.com

В работе представлен простой и эффективный метод определения устойчивости оптических вихрей, основанный на Фурье преобразовании поля с помощью электрически переключаемой ахроматической нематической жидкокристаллической линзы Френеля.

Ключевые слова: сингулярный пучок, топологический заряд, нематический жидкий кристалл.

С момента своего открытия фазовые сингулярные пучки (оптические вихри, вихревые) нашли широкое применение в различных областях науки и техники [1]. С одной стороны, интерес исследователей обусловлен наличием точки фазовой сингулярности в структуре волнового фронта оптического вихря, которая характеризуется неопределённостью фазы. При этом вокруг этой точки фаза изменяется на $2\pi\ell$, где ℓ – топологический заряд (ТЗ) вихря. С другой стороны – отсутствием интенсивности на оси пучка.

В настоящее время разработано множество методов формирования оптических вихрей с помощью управляемого внесения фазового набег. Однако вследствие неидеальности используемых оптических элементов неизбежно присутствует рассеяние, что становится источником сопутствующего когерентного поля и является причиной неустойчивости фазовых сингулярных пучков с $|\ell| > 1$ [2]. В дальнейшем поле такие оптические пучки разбиваются на отдельные вихри с единичными зарядами. На расстояниях порядка рэлеевской длины провалы интенсивности, соответствующие точкам сингулярности фазы, формируют общую темную сердцевину [3]. Однако в дальнейшем поле при наличии когерентного поля даже малой интенсивности происходит разделение точек сингулярности, что сопровождается изменением распределения интенсивности светового поля в фокальной плоскости линзы – наблюдается появление отдельных областей нулевой интенсивности в количестве, равным значению ТЗ фазового сингулярного пучка до расщепления.

Мы предлагаем метод простого и удобного анализа устойчивости фазовой топологии оптических вихрей, заключающийся в осуществлении Фурье преобразования светового поля с помощью жидкокристаллической линзы Френеля, что позволяет значительно упростить оптическую схему эксперимента.

Теоретически и экспериментально продемонстрировано формирование $|\ell|$ изолированных нулей интенсивности в фокальной плоскости линзы при прохождении через неё фазового сингулярного пучка с ТЗ ℓ (рисунок, а). Внесение астигматизма в пучок посредством поворота жидкокристаллической линзы приводит к выстраиванию сформированных нулей интенсивности вдоль прямой под углом к плоскости внесённого астигматизма. При $\ell < 0$ поворот против часовой стрелки, а при $\ell > 0$ – по часовой стрелке (рисунок, б). Достоинством использования разработанной жидкокристаллической линзы Френеля является ее ахроматизм и возможность электрического управления [4], что расширяет область практического применения предложенного метода: определение величины и знака ТЗ светового пучка без необходимости изменения оптической схемы.



а



б

Рисунок. Результаты исследования фазовой топологии оптического вихря с ТЗ $\ell = +5$: а – распределение интенсивности в сечении светового пучка в фокальной плоскости линзы Френеля при нормальном падении излучения на линзу, б – при падении излучения под углом 16° к нормали линзы

[1] Padgett M.J., *Optics Express*, **25**, №10, 11265-11274, (2017).

[2] Berry M.V., Dennis M.R., *Proc. R. Soc. Lond. A*, **457**, №2013, 2251-2263, (2001).

[3] Basistiy I.V., Bazhenov V.Yu., Soskin M.S., Vasnetsov M.V., *Opt. Commun.*, **103**, 422-428, (1993).

[4] Melnikova E.A., et al., *J. Appl. Spectrosc.*, **91**, №23, 1-6, (2024).

СПЕКТРАЛЬНАЯ И ПОЛЕВАЯ СТРУКТУРА ВИДЕОИМПУЛЬСОВ

Бубенчиков И.В., Титяпкин А.А., Залипаев В.В., Киселев А.Д., Козлов С.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

jad.crandall@mail.ru

Исследована спектральная и полевая структура видеоимпульсов, выявлено разделение на бегущие и эванесцентные волны. Продольная компонента поля сопоставима с поперечной, что подчёркивает непараксиальный характер излучения.

Ключевые слова: видеоимпульс, бегущая волна, эванесцентная волна.

В настоящей работе проведено детальное теоретическое исследование спектральной и полевой структур пространственно ограниченных видеоимпульсов. В частности, пространственное ограничение вызывает разделение спектральных компонент импульса на две принципиально разные группы: бегущие и эванесцентные волны. Для видеоимпульса с гауссовой временной формой и гауссовым поперечным распределением поля бегущая волна поперечной компоненты формирует полуторапериодную волновую структуру (рисунок).

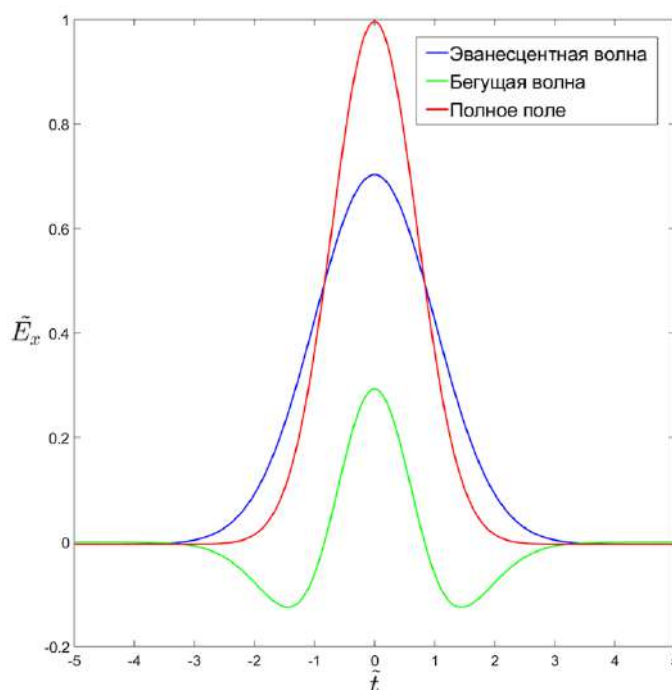


Рисунок. Зависимость от времени поперечной компоненты видеоимпульса на оси пучка

Длительность бегущей волны поперечной компоненты гауссова видеоимпульса определяется отношением поперечного и продольного размеров видеоимпульса. Этим отношением определяется и расстояние, на котором затухает эванесцентная составляющая поперечной компоненты гауссова видеоимпульса. При поперечном размере, значительно превышающем продольный, длина затухания эванесцентной волны становится порядка поперечного размера видеоимпульса. Бегущие волны продольной компоненты поля гауссова видеоимпульса формируют волну из малого числа колебаний. Важным результатом является выявление существенной роли продольной компоненты поля, которая может достигать величин, сопоставимых с поперечной [1], но при этом демонстрирует иную временную динамику. Вектор напряжённости электрического поля импульса не сохраняет постоянного направления, а меняет ориентацию по сложному закону, что подчёркивает непараксиальный характер излучения.

[1] Plachenov A.B., So I.A., Kiselev A.P., *J. Opt. Soc. Am.*, **41**(11), 2606-2612, (2024).

ГЕНЕРАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ ГРЕБЕНКИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ

Новиков А.Д., Ватник И.Д.

Новосибирский Государственный Университет, г. Новосибирск, Россия

a.novikov6@g.nsu.ru

Для генерации оптической частотной гребенки в цилиндрическом микрорезонаторе мод шепчущей галереи с малой вариацией радиуса были оптимизированы добротность и эффективный объем моды, что уменьшило порог генерации. Нагруженная добротность цилиндрического микрорезонатора составила $Q = 10^8$, а длина распределения моды вдоль оси цилиндрического резонатора составила 50 мкм. С такими параметрами удалось добиться генерации ОЧГ.

Ключевые слова: цилиндрический микрорезонатор, оптическая частотная гребенка, моды шепчущей галереи.

Создание дешевых и компактных источников оптических частотных гребенок (ОЧГ) для высокоточных измерений [1] является актуальной задачей. В качестве устройств генерации ОЧГ используются оптические микрорезонаторы, изготовленные на чипе, преимущество которых является удобная интеграция в оптические схемы [2]. Демонстрируемая ширина линии составляет около 10 МГц, $Q = 10^7$. Однако, такие системы достаточно дорогие. В этой работе мы демонстрируем генерацию ОЧГ на резонаторах, созданных на основе доступного и дешевого оптоволокна – цилиндрических микрорезонаторах с малой вариацией радиуса.

Объем мод в таких микрорезонаторах заметно больше из-за широкого распределения вдоль оси цилиндра. Также, добротность, продемонстрированная ранее, в таких микрорезонаторах не превышала $Q = 10^6$. Тем не менее, цилиндрический резонатор имеет свои преимущества, например, возможность управления аксиальным распределением поля мод с помощью внесения вариации эффективного радиуса на поверхности резонатора. Также, малая область свободной дисперсии аксиальных мод может быть использована для создания низкочастотной ОЧГ с расстоянием между линиями от десятков до сотен МГц [3]. Чтобы уменьшить порог генерации, необходимо создать резонатор с малым эффективным объемом моды и увеличить добротность резонатора.

Мы разработали метод создания резонатора, позволяющий получать малый эффективный объем: оптоволокно равномерно отжигается CO₂ лазером мощностью 5,6 Вт со скоростью 0,5 мм/с. Затем волокно локально нагревается лазерным излучением мощностью 10,5 Вт длительностью 100 мс с интервалом 2,5 с в двух точках на расстоянии 200 мкм друг от друга, создавая широкую отрицательную вариацию эффективного радиуса. Между этими двумя точками образуется узкая положительная вариация эффективного радиуса, что и позволяет уменьшить эффективный объем моды.

Для связи с резонатором мы создали вытянутое оптоволокно с диаметром около 1,5 мкм и малыми потерями. Был установлен зазор между вытянутым оптоволокном и резонатором для уменьшения рассеяния, оптимизировано положение точки контакта вдоль перетяжки вытянутого оптоволокна для достижения околокритической связи. Результат оптимизации параметров приведен на рисунке (а). Нагруженная добротность составила 10^8 . Для генерации ОЧГ использовалась модуляция частоты лазера накачки с частотой 100 кГц и диапазоном перестройки 250 МГц, чтобы уменьшить влияние тепловых эффектов. В результате была получена гребенка с четырьмя боковыми линиями. Спектр генерации приведен на рисунке (б) при мощности накачки 100 мВт.

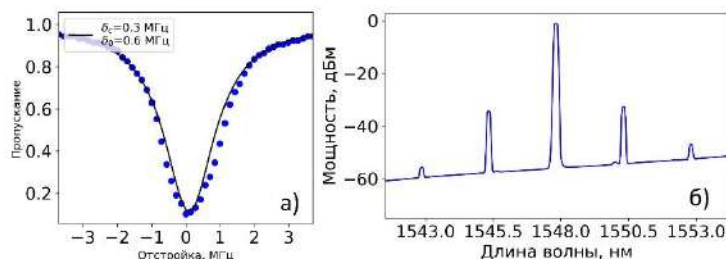


Рисунок. а) Спектр пропускания оптимизированной системы.

б) Спектр генерации ОЧГ, разрешение 0.2 нм

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (FSUS-2025-0010).

[1] Suh M.G. et al., *Science.*, **354**, №6, 600-603, (2016).

[2] Del'Haye P. et al., *Quantum Sens. Nanophotonic Devices VI.*, **7222**, 722209, (2009).

[3] Kolesnikova A.Y., Vatik I.D., *Physical Review A*, **109**, №5, 053520, (2024).

ДИСПЕРСИОННЫЙ ВКЛАД В РАСПРОСТРАНЕНИЕ МАЛОПЕРИОДНЫХ СИНУСОПОДОБНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Арцер И.Р., Мельник М.В., Цыпкин А.Н., Козлов С.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

artser_ilia@mail.ru

Влияние дисперсии на распространение импульсного терагерцового излучения может быть задано с помощью различных методов. В настоящей работе продемонстрировано, что добавление величины начальной фазы позволяет задавать дисперсию такого импульса.

Ключевые слова: терагерцовая нелинейная оптика.

Существуют среды, для которых нелинейная рефракция оказывает более значимый вклад в эволюцию высокоинтенсивных терагерцовых (ТГц) импульсов при их распространении в нелинейных средах, чем дифракция и дисперсия [1]. Однако, учёт дисперсионного влияния позволяет улучшить соответствие между теоретической моделью и экспериментальным результатом.

Нормированное линейаризованное полевое уравнение описывается выражением [2]:

$$\frac{\partial E'}{\partial z'} + \frac{\partial E'}{\partial t'} - \mu_{disp} \frac{\partial^3 E'}{\partial t'^3} = 0, \quad (1)$$

где E – поле ТГц импульса, $E' = E/E_0$, E_0 – амплитуда ТГц импульса, z – пространственная координата, $z' = \frac{z}{c\tau_p}$, t – время, τ_p – длительность импульса, $t' = \omega_0 t$, ω_0 – частота импульса, c – скорость света в вакууме, N_0 и a – параметры дисперсии, описывающие её с помощью уравнения Коши: $n(\omega) = N_0 + a\omega$, $\mu_{disp} = \frac{ca}{N_0\tau_p^2}$.

Решение такого уравнения находится в виде разложения в ряд по малому параметру: $E' = E^{(0)} + \mu_{disp} E^{(1)}$, где можно ограничиться первыми двумя слагаемыми. Тогда соответствующие выражения имеют следующую форму:

$$E^{(0)} = \sin(t') \exp\left(-\left(\frac{t'}{\tau_N}\right)^2\right), \quad (2)$$

$$E^{(1)} = \exp\left(-\left(\frac{t'}{\tau_N}\right)^2\right) \frac{z'}{\tau_N^6} \left(\left(1 + \frac{\mu_{disp} z' t'}{\tau_N^6} X\right) \sin(t) - \frac{\mu_{disp} z'}{\tau_N^4} Y \cos(t) \right), \quad (3)$$

где $X = 6\tau_N^4 + 12\tau_N^2 - 8t'^2$, $Y = \tau_N^4 + 6\tau_N^2 - 12t'^2$.

Необходимо преобразовать сумму выражений (2) и (3) к виду: $E = \sin((1 + \alpha t')t' + \varphi) \exp\left(-\left(\frac{t'}{\tau_p + \Delta\tau}\right)^2\right)$. Полагая величину μ_{disp} малой, можно получить выражение для импульса с учётом дисперсии в виде:

$$E \approx \exp\left(-\frac{t'^2}{\left(\tau_N + \frac{\mu_{disp} z'}{\tau_N^3}(3\tau_N^2 + 2)\right)^2}\right) \sin\left(t\left(1 + \frac{12\mu_{disp} z' t'}{\tau_N^4}\right) - \frac{\mu_{disp} z'}{\tau_N^4}(\tau_N^4 + 6\tau_N^2)\right). \quad (4)$$

На рисунке показано сопоставление кривых, представленных в виде суммы выражений (2) и (3) (на графике – кривая с меткой 1) и выражением (4) (метка 2). Результат получен при величине $\tau_N = 5$ и $\mu_{disp} \cdot z = 0.022$.

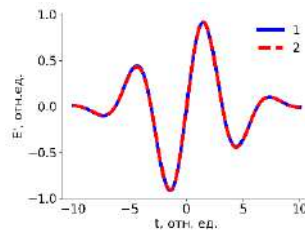


Рисунок. Сумма исходного и дисперсионного выражений (кривая 1) и преобразованное выражение (кривая 2). Параметры выражений: $\tau_N = 5$ и $\mu_{disp} \cdot z = 0.022$

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант 24-22-00084).

[1] Арцер И.Р., Мельник М.В., Цыпкин А.Н., Козлов С.А., *Компьютерная Оптика*, **48**, 61-68, (2024).

[2] Artser I., Melnik M., Tsyarkin A., Gurov I., Kozlov S., *Chinese Optics Letters*, **23**, 021901, (2025).

ОПТИМИЗИЦИЯ ПРОТЯЖЁННОЙ СОЛИТОННОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ ПУТЁМ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА

Патрин Г.А.*, Чеховской И.С., Штырина О.В., Сидельников О.С., Федорук М.П.

Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

g.a.patin.pdl@gmail.com

Разработан квазианалитический алгоритм обработки сигнала на приёмнике солитонной волоконно-оптической линии связи для компенсации искажений фазы. Оценён прирост дальности и скорости передачи информации за счёт использования предложенного метода.

Ключевые слова: солитонные линии связи, компенсация нелинейных искажений, оптимизация линии связи.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) в настоящее время являются наиболее востребованным способом передачи данных, эта технология лидирует на рынке телекоммуникаций [1]. Однако, несмотря на высокий уровень её развития в настоящее время, из-за стремительных темпов роста объёма мирового трафика линии связи требуют дальнейшего увеличения пропускной способности. Известно, что солитонные импульсы, являющиеся когерентной устойчивой структурой, слабо подвержены нелинейным искажениям [2], что особенно актуально для передачи данных на большие расстояния, где требуется высокая мощность сигнала. Данное исследование посвящено разработке и анализу эффективности квазианалитического алгоритма компенсации оптических искажений фазы в солитонной линии связи для повышения её пропускной способности и дальности передачи.

Динамику оптического излучения в канале линии связи можно описать с помощью неконсервативного нелинейного уравнения Шрёдингера (НУШ) [2]. Предложенный алгоритм является квазианалитическим, он построен на основе неконсервативного НУШ и предположения о том, что форма импульсов, их ширина на полувысоте, сохраняется при распространении в пассивном волокне.

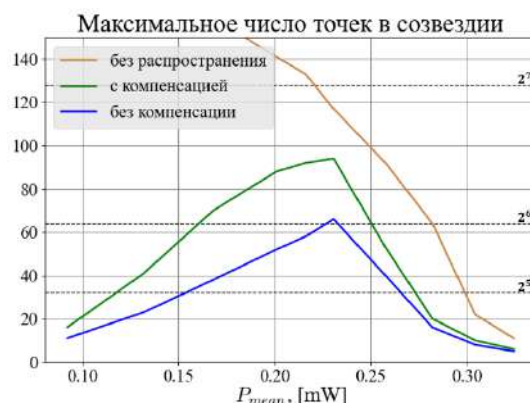


Рисунок. Графики зависимости максимально количества кодирующих фаз в линии связи, состоящей из 40 секций, от средней мощности сигнала при допустимом уровне битовой ошибки. Горизонтальными линиями отмечены ближайшие степени двойки

Рисунок иллюстрирует уплотнение сигнальных созвездий, синяя линия обозначает максимальное число кодирующих фаз без применения метода компенсации искажений, зелёная – результат применения разработанного метода, а охровая – предельный случай компенсации, когда искажения обусловлены исключительно шумом усилителей, а не оптическими эффектами. Видно, что предложенный подход позволил существенно приблизиться к случаю полной компенсации в области высоких средних мощностей. В работе также будут представлены результаты анализа прироста дальности передачи информации для линии связи с заданными параметрами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-61-00010, <https://rscf.ru/project/25-61-00010/>.

[1] Richardson D.J., *Science*, **330**, 327-328, (2010).

[2] Agrawal G., *Nonlinear fiber optics*, Academic Press, (2012).

**АНИЗОТРОПИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В КРИСТАЛЛАХ
ФТОРИДА МАГНИЯ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ**

Кузьмин В.С., Мартынович Е.Ф., Мурзин С.В., Дресвянский В.П.

Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

valentin.kuzmin.2000@mail.ru

Показано, что глубина модуляции пространственно-периодического распределения концентрации центров окраски в единичном треке филамента, индуцированном в анизотропном кристалле фторида магния при нелинейном взаимодействии фемтосекундного лазерного излучения, может служить критерием эффективности образования дефектов отдельных ориентационных групп.

Ключевые слова: лазер, кристалл, дефект.

Аксиальная пространственная зависимость интенсивности люминесценции центров окраски в единичном треке филамента, индуцированном в анизотропном кристалле фторида магния при нелинейном взаимодействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения имеет пространственно-периодический характер [1, 3]. Образование периодической модуляции концентрации индуцированных центров окраски обусловлено двумя причинами. Во-первых, излучение фемтосекундного лазера при прохождении в двулучепреломляющем кристалле последовательно меняет состояние поляризации от линейной к эллиптической, циркулярной и т.д. Во-вторых, вероятность за единицу времени фотоионизации электрона (перехода из валентной зоны в зону проводимости) при циркулярной поляризации меньше, чем при линейной при данной амплитуде напряженности поля E и параметре Келдыша γ . Применительно к кристаллам фторида магния достоверно установлено образование F_2 центров окраски, которые могут существовать в четырех пространственных конфигурациях C_1 , C_{2h} , D_{2h} и C_{2v} , обусловленных симметрией кристаллической решетки [2]. Цель данного исследования состоит в том, чтобы методами лазерной конфокальной сканирующей люминесцентной микроскопии определить вклад каждой отдельной ориентационной группы центров окраски в образование общей структуры пространственно-периодического распределения концентрации дефектов.

Исследования топологии дефектообразования и фотолюминесценции облученных лазерным излучением образцов проводились на высокочувствительном сканирующем конфокальном люминесцентном микроскопе с пикосекундным временным разрешением MicroTime 200 фирмы PicoQuant GmbH. Спектры фотолюминесценции при возбуждении фотолюминесценции пикосекундными лазерными импульсами в спектральной области поглощения наведенных центров окраски 375 нм записывались спектрометром Ocean Optics 6500, совмещенным с люминесцентным микроскопом. В полученных спектрах люминесценции наблюдаются характерные при радиационном окрашивании кристаллов фторида магния полосы свечения F_2 -центров окраски с максимумами длин волны излучения $\lambda=423$ нм (ориентационная группа C_{2h}) и $\lambda=580$ нм (ориентационная группа C_1). Измеренные значения постоянных времени затухания люминесценции 3 и 8 нс в облученных лазерным излучением образцах фторида магния также близки к характерным значениям времен затухания F_2 -центров для соответствующих ориентационных групп.

Для выделения люминесценции центров отдельных ориентационных групп C_{2h} и C_1 при регистрации аксиального пространственного распределения дефектов на микроскопе были использованы перестраиваемые оптические полосовые фильтры с центральными длинами волн 430 ± 20 нм и 530 ± 20 , 580 ± 20 нм, соответственно. Для каждой ориентационной группы центров окраски с помощью программного обеспечения микроскопа было определено значение глубины модуляции аксиального пространственного распределения. Были получены значения: 0,24 – для центров с максимумом полосы свечения 430 ± 20 нм (ориентационная группа C_{2h}); 0,33 – для центров с максимумом полосы свечения 580 ± 20 нм (ориентационная группа C_1); 0,42 – для центров с максимумом полосы свечения 530 ± 20 нм (ориентационная группа C_1).

Эффективность процесса образования центров окраски существенным образом зависит от эффективности генерации первичных дефектов (электронов и дырок) в ходе нелинейной фотоионизации вещества. Полученные в результате проведенных исследований данные о глубине модуляции периодического пространственного распределения концентрации центров окраски для отдельных ориентационных групп свидетельствуют о том, что эффективность образования дефектов пространственной группы симметрии C_1 выше, чем группы C_{2h} .

Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 года (№ проекта 0243-2021-0004).

[1] Martynovich E.F., Lazareva N.L., Zilov S.A., *Journal of Luminescence*, **234**, 117989, (2021).

[2] Лисицын В.М., Радиационная физика твердого тела, *Томск: Изд-во Томского политехнического университета*, 2008. – 172 с.

[3] Дресвянский В.П., *диссертация ... доктора физико-математических наук: 01.04.07, Иркутск*, (2020).

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СЛАБЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Циплакова Е.Г., Петров Н.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

e.tsiplakova@itmo.ru

Численно исследован усовершенствованный метод сканирования слабых терагерцовых полей в импульсной терагерцовой голографии. Система сканирования «диафрагма-линза» обеспечила 2,5-кратный прирост сигнала, что позволило повысить пространственное разрешение за счет использования уменьшенной апертуры при одновременной компенсации потерь.

Ключевые слова: импульсная терагерцовая голография, растровое сканирование

Метод терагерцовой (ТГц) спектроскопии с временным разрешением (THz-TDS – Terahertz Time-Domain Spectroscopy) позволяет проводить широкополосное исследование объектов и материалов в ТГц диапазоне, обеспечивая одновременный анализ их временного отклика и спектральных характеристик. Особый интерес представляют возможности TDS в области визуализации.

Традиционные системы визуализации основаны на сканировании объекта сфокусированным ТГц пучком, что приводит к ограниченному пространственному разрешению [1]. Более перспективным подходом является размещение объекта в расширенном ТГц поле с последующим сканированием с помощью диафрагмы (метод импульсной терагерцовой голографии, PTDH – Pulse Time-Domain Holography) [2]. Благодаря использованию субволновых апертур этот метод потенциально позволяет достигать более высокого пространственного разрешения. Однако применение диафрагмы с малой апертурой, необходимое для повышения разрешающей способности, приводит к значительному снижению соотношения сигнал/шум. Это требует использования более мощных источников ТГц излучения, что ограничивает практическую применимость PTDH.

В работе с помощью численного моделирования исследуется новый подход к растровому сканированию слабых ТГц импульсов, основанный на использовании схемы детектирования с синхронно перемещаемыми диафрагмой и сопряженной с ней линзой (рисунок а). В качестве тестового объекта использовались широкополосные пучки Бесселя-Гаусса, формируемые при прохождении ТГц гауссовым импульсом конической линзы ($\alpha = 20^\circ$; $n = 1,46$ (0,1–1,5 ТГц)). Моделирование включало два этапа: (i) расчет формирования широкополосных ТГц полей Бесселя-Гаусса на различных расстояниях от аксикона (в соответствии с методикой [3]); (ii) расчет процессов сканирования и регистрации с использованием двух конфигураций: одиночной диафрагмы и системы диафрагма-линза.

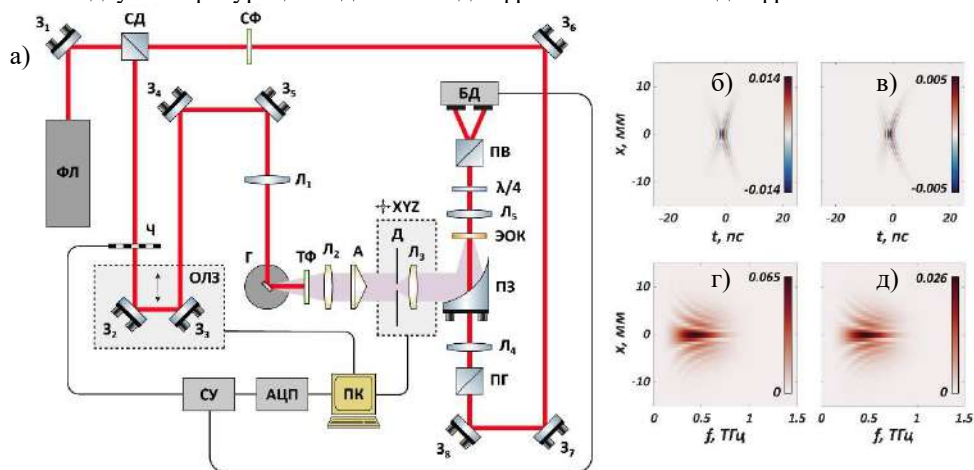


Рисунок. Схема установки для генерации и детектирования широкополосных ТГц полей Бесселя-Гаусса с системой сканирования «диафрагма-линза» (а). Пространственно-временные (б,в) и пространственно-спектральные (в,г) распределения поля Бесселя-Гаусса, полученные в моделировании для случаев сканирования: системой «диафрагма-линза» (б,г) и одиночной диафрагмой (в,д)

В результате были получены пространственно-временные и спектральные распределения поля Бесселя-Гаусса с помощью двух систем сканирования (рисунок б-д). Система «диафрагма-линза» обеспечивает увеличение сигнала в 2,5 раза по сравнению с базовой конфигурацией, повышая чувствительность при работе с маломощными источниками импульсного ТГц излучения [4].

- [1] Guerboukha H., Nallappan K., Skorobogatiy M., *Adv. Opt. Photonics.*, **10**(4), 843-938, (2018).
- [2] Petrov N.V., et al., *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **6**(3), 464-472, (2016).
- [3] Kulya M.S. et al., *Sci. Rep.*, **8**(1), 1390, (2018).
- [4] Tsiplovakova E.G., Grachev Y.V., Petrov N.V., *Appl. Phys. Lett.*, **125**(9), (2024).

МЕТОД РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОСТЕЙ СО СТРУКТУРНО СЛОЖНЫМИ МОЛЕКУЛАМИ В ТГц ДИАПАЗОНЕ

Набилкова А.О., Гусельников М.С., Исмагилов А.О.,
Мельник М.В., Козлов С.А., Цыпкин А.Н.

Университет ИТМО, НОЦ Фотоники и оптоинформатики, Санкт-Петербург, Россия

aonabilkova@itmo.ru

В этом исследовании представлена теоретическая модель для оценки коэффициента нелинейного показателя преломления n_2 жидкостей со структурно сложными молекулами в терагерцовом диапазоне. Коэффициент нелинейного показателя преломления жидкости определяется путем разложения колебательного нелинейного отклика на вклады отдельных химических связей. Представленным методом произведена оценка n_2 сложной молекулы изопропанола с доминирующими резонансами в спектре от О-Н, С-О, и С-Н связей. Теоретическая оценка в $n_2^{\text{th}}=4.7 \times 10^{-9} \text{ см}^2/\text{Вт}$ подтверждена экспериментальным значением в $n_2^{\text{exp}}=4.7 \times 10^{-9} \text{ см}^2/\text{Вт}$, полученным на установке Z-сканирования.

Ключевые слова: ТГц диапазон, колебательный нелинейный отклик, метод Z-сканирования.

Теоретическая модель для оценки коэффициента нелинейного показателя преломления n_2 жидкостей с многокомпонентным составом в терагерцовом (ТГц) диапазоне представляет собой разложение колебательного нелинейного отклика жидкости на вклады от её отдельных химических связей. Для оценки n_2 изопропанола использовались эталонные материалы со связями, аналогичными доминирующим связям в молекуле изопропанол — вода (связи О-Н) [1], α -пинен (связи С-Н), жидкий CO_2 (связи С-О). Мы предполагаем, что вклад конкретного осциллятора (связанный с определенной химической связью в сложной молекуле) может быть получен из n_2 эталонного материала с более простой структурой. Нелинейные параметры, описывающие поведение ангармонического осциллятора [2], зависят исключительно от свойств отдельного осциллятора. Для систем со слабыми межсвязными взаимодействиями поляризационный отклик на электрическое поле от одного и того же типа осциллятора в разных веществах можно считать одинаковым. Основываясь на этом предположении и теории колебательной нелинейности в ТГц диапазоне [2], вклад от связи О-Н (n_2^{O-H}) изопропанола можно оценить через нелинейный отклик $n_2^{H_2O}$ воды [1], нормированный на концентрацию связей О-Н в соответствующих материалах:

$$n_2^{O-H} = \frac{n_2^{H_2O} n_0^{H_2O} N_{O-H}^{2prop}}{n_0^{2prop} N_{O-H}^{H_2O}}. \quad (1)$$

Здесь $n_2^{H_2O}$ — измеренный нелинейный коэффициент показателя преломления для воды, N_{O-H}^{2prop} — концентрация связей ОН в изопропанол, $n_0^{H_2O}$ — линейный показатель преломления воды, $N_{O-H}^{H_2O}$ — концентрация связей ОН в воде, n_0^{2prop} — линейный показатель преломления изопропанола. Оценка n_2^{C-O} вклада с использованием той же методологии затруднена из-за отсутствия экспериментальных данных для жидкостей, состоящих исключительно из связей С-О, например, для диоксида углерода CO_2 в жидкой форме. Поэтому было использовано выражение для оценки n_2 из вышеупомянутой теории [2]. Ключевые параметры включают концентрацию связей, линейные показатели преломления колебательной и электронной природы (в ТГц и видимом диапазонах) и основные колебательные резонансные частоты [3, 4]. Теоретическая оценка согласно представленному методу дает $n_2^{\text{th}}=4.7 \times 10^{-9} \text{ см}^2/\text{Вт}$. Экспериментальная проверка с помощью метода Z-сканирования с импульсным ТГц излучением (центральная частота 0,75 ТГц, длительность импульса 1 пс) подтверждает полученное с помощью теории значение — $n_2^{\text{exp}}=4.7 \times 10^{-9} \text{ см}^2/\text{Вт}$. Полученный результат соединяет колебательную динамику на молекулярном уровне и макроскопические оптические свойства, что предоставляет инструмент «прогноза» нелинейности для проектирования нелинейных материалов ТГц диапазона без прямых измерений.

Дополнительно показано, что с помощью теории [2] можно отдельно рассчитать вклад каждой химической связи, основываясь только на оптических и физических свойствах этой связи, таких как длина, масса связи, а также описанные выше параметры. Сложение вкладов сходится по порядку с полученными с помощью эксперимента значениями, однако для такой оценки необходимо также разделять вклад в линейный показатель преломления от отдельных связей, что является сложной задачей, а результат не может считаться точным.

Все авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за поддержку (грант № 24-22-00084).

[1] Tsyupkin A., Zhukova M., Melnik M., Vorontsova I., Kulya M., Putilin S., Kozlov S., Choudhary S., Boyd R.W., *Physical Review Applied*, **15**(5), 054009, (2021).

[2] Dolgaleva K., Materikina D.V., Boyd R.W., Kozlov S.A., *Physical Review A*, **92**(2), 023809, (2015).

[3] Marin T.W. and Janik I., *Communications Chemistry*, **4**(1), 77, (2021).

[4] Khonakdar D.R. and Raveshi M.R., *The Journal of Supercritical Fluids*, **107**, 549-559, (2016).

ДИФРАКЦИЯ ВИДЕОИМПУЛЬСОВ

Титяпкин А.А., Бубенщиков И.В., Залипаев В.В., Киселев А.Д., Козлов С.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

tityapkin.artem@mail.ru

В настоящей работе исследуется непараксиальная дифракция гауссовых видеоимпульсов. Получены асимптотические выражения, проанализирован вклад эванесцентных волн и показаны отличия от параксиального приближения в дальней зоне.

Ключевые слова: непараксиальная дифракция, видеоимпульс, эванесцентные волны.

В работе исследуется непараксиальная дифракция видеоимпульса с гауссовым пространственным и временным профилем. Показано, что такие импульсы по своей природе являются существенно непараксиальными: они обладают выраженной продольной компонентой поля, а их пространственный спектр включает значительный вклад эванесцентных волн. В недавно опубликованной работе [1] показано, что при гауссовой временной структуре видеоимпульса бегущая волна на границе раздела имеет полупериодную форму, тогда как эванесцентная компонента имеет форму гауссова колокола. В дальней зоне дифракции эванесцентная компонента исчезает, а поперечная и продольная компоненты трансформируются в однопериодные волны (рисунок).

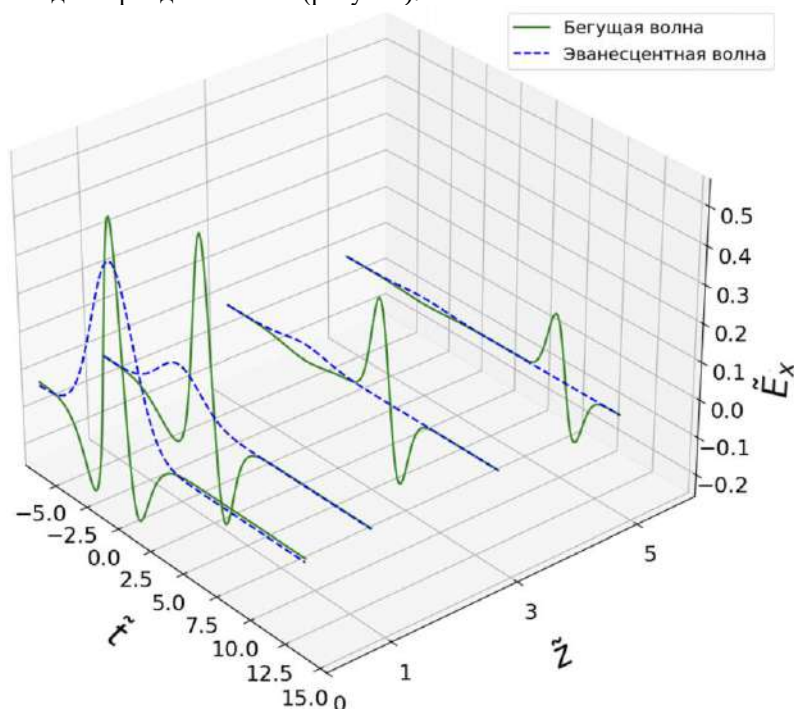


Рисунок. Динамика бегущей и эванесцентной составляющих поперечной компоненты видеоимпульса на оси с расстоянием $\tilde{z}$

Установлено, что с увеличением отношения поперечного размера видеоимпульса к продольному расстояние, на котором формируется однопериодная структура, сокращается. На основе метода стационарной фазы получены аналитические выражения для описания дифракции в дальней зоне. Показано, что эванесцентная составляющая в поперечной компоненте убывает с расстоянием быстрее, чем в продольной. Сравнение строгого численного расчёта непараксиальной дифракции с результатами, полученными в параксиальном приближении, показало, что в случае распространения гауссовых видеоимпульсов результаты расчетов отличаются не только отсутствием в параксиальном приближении эванесцентной волны, но и расстоянием, на котором видеоимпульс становится однопериодной волной.

[1] Бубенщиков И.В., Титяпкин А.А., Залипаев В.В., Киселев А.Д., Козлов С.А., *Письма в ЖЭТФ*, **121**, №5, 352-357, (2025).

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**ПОДАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
МЕТОДАМИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ
ПРИ СОПРЯЖЕНИИ ВОЛОКНА
В АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ**
Топоровский В.В.^{1,2}, Галактионов И.В.^{1,2}, Казанцев С.Ю.¹

¹МТУСИ, Москва, Россия

²Московский политехнический университет, Москва, Россия
toporovskii_v@mail.ru

В работе представлен анализ характеристик лазерного излучения вдоль атмосферного оптического канала связи с подавлением искусственно-генерируемой атмосферной турбулентности методами адаптивной оптики. Анализ качества компенсации aberrаций волнового фронта лазерного излучения оценивалось по значению уровня сигнала на измерителе мощности, сопряженным с волокном.

Ключевые слова: адаптивная оптика, атмосферная турбулентность, беспроводные оптические линии связи.

Существование перспективной задачи передачи лазерного излучения через атмосферу сталкивается с проблемой возникновения нерегулярных оптических искажений, которые приводят к появлению искажений фазы, перераспределению интенсивности. Основная причина данного эффекта наличие эффекта атмосферной турбулентности, возникающего по причине локальных флуктуаций показателя преломления из-за неравномерного нагрева подстилающей поверхности [1].

Для уменьшения эффектов турбулентности применяются различные методики: пространственное разнесение, кодирование, алгоритмизация, когерентное фазирование пучков, адаптивная оптика. Несмотря на эффективность всех вышеперечисленных методов последнее время средства адаптивной оптики обладают наибольшей популярностью для решения подобных задач при передаче лазерного излучения через атмосферный тракт [2-4].

В работе была разработана адаптивная оптическая система с биморфным деформируемым зеркалом в качестве корректора волнового фронта. В качестве лазерного излучения, используемого для анализа aberrаций волнового фронта, использовалось излучение длиной волны 830 нм, основное излучение использовалось с длиной волны 1550 нм. Работа системы была исследована в трёх режимах: без коррекции, с внесением возмущений, с коррекцией биморфным деформируемым зеркалом (рисунок). Была продемонстрирована эффективность коррекции в среднем на 20% по усреднённой величине уровня мощности с анализатора, также был проанализирован спектр aberrаций волнового фронта по коэффициентам полиномов Цернике.

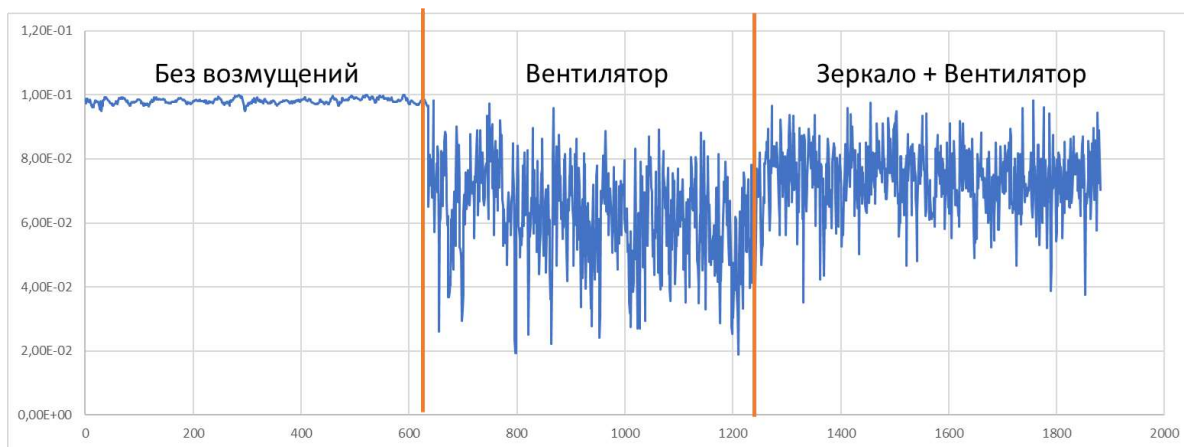


Рисунок. Динамика изменения уровня мощности на лабораторном стенде

- [1] Galaktionov I, Sheldakova J, Samarkin V, Toporovsky V, Kudryashov A., *Photonics*, **10**, 1147, (2023).
- [2] Wang Y., Xu H., Li D., *Sci Rep*, **8**, 1124, (2018).
- [3] Vorontsov M., Weyrauch T., Carhart G., Beresnev L., *OSA Technical Digest Series (CD) (Optica Publishing Group, 2010)*, paper LSMA1.
- [4] Nery V., Nakasuka S., *Proc. SPIE 12777, International Conference on Space Optics — ICSO 2022*, 1277755, (2023).

ДЕФОРМИРУЕМОЕ ЗЕРКАЛО С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПЬЕЗОАКТЮАТОРОВ

Кузьмицкий П.М., Федорино Д.А.

ФГБУН ИДГ РАН им. М.А. Садовского, Москва, Россия

kuzmitsky@activeoptics.ru

Разработано 50 мм деформируемое зеркало на 61 пьезоактюаторе с симметричным ходом ± 2 мкм. Реализована возможность замены повреждённых пьезопакетов.

Ключевые слова: деформируемое зеркало, адаптивная оптика.

Деформируемое зеркало (ДЗ) является ключевым элементом адаптивной оптической системы. Оно компенсирует искажения, вызванные атмосферными турбулентностями и оптическими аберрациями за счет искривления отражающей поверхности. Повышение плотности размещения актюаторов на поверхности ДЗ позволяет осуществлять более точное управление его формой, что напрямую увеличивает пространственное разрешение коррекции [1]. Данное преимущество критически важно для приложений, требующих высокой точности, таких как астрономические наблюдения [2] или высокоточные лазерные системы [3].

Разработанная конструкция деформируемого зеркала включает массив из 61 пьезоэлектрического актюатора, образующий гексагональную решетку с шагом 6 мм между центрами элементов (рисунок). Такая конфигурация обеспечивает высокую плотность управляющих элементов. Конструкция позволяет достигнуть симметричного хода актюаторов на ± 2 мкм, а также заложена возможность замены поврежденных пьезопакетов на новые.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ №25-19-00701.

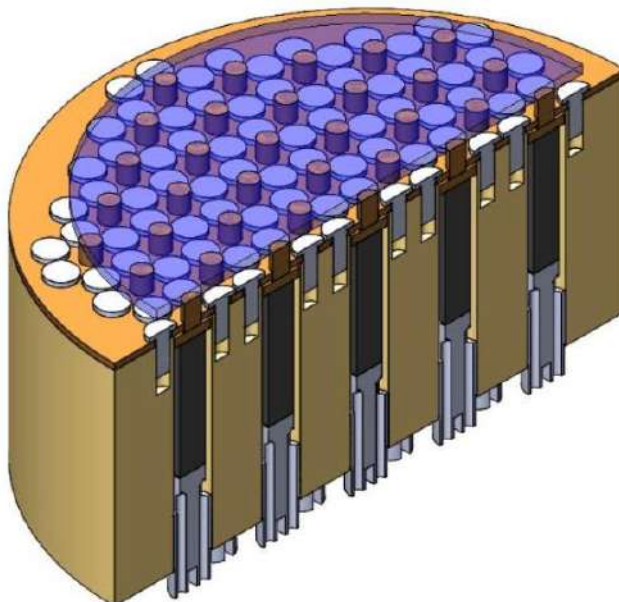


Рисунок. Конструкция деформируемого зеркала

[1] Hamelinck R., *Adaptive deformable mirror: based on electromagnetic actuators*, (2010).

[2] Neichel B., *Handbook of Adaptive Optics*, №1, 137-160, (2024).

[3] Holmes R.B., *AIAA Journal*, **60**, №10, 5633-5644, (2022).

ГЕНЕРАЦИЯ ИГОЛЬЧАТОГО ПУЧКА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ КОНИЧЕСКИ РЕФРАГИРОВАВШЕГО ПУЧКА ЧЕРЕЗ АКСИКОН

Абдулразак С.Х., Дерягин Н.Г., Соколовский Г.С.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

sausana95@mail.ru

В данной работе предложен метод генерации игольчатых пучков с подавленными боковыми кольцами на основе сочетания конической рефракции и фокусировки аксиконом, обеспечивающий улучшенные характеристики для акустооптической визуализации.

Ключевые слова: пучок Бесселя, полупроводниковые лазеры, коническая рефракция.

Пучки Бесселя, известные своей способностью сохранять фокусировку на больших осевых расстояниях, решают одну из фундаментальных проблем акустооптической визуализации - ограниченный при воздействии гауссовым пучком [1, 2]. Несмотря на это преимущество, их использование часто ограничено наличием боковых лепестков, которые ухудшают пространственное разрешение. В настоящей работе мы демонстрируем подход, который эффективно подавляет эти боковые лепестки, позволяя генерировать узкие, игольчатые лучи с улучшенной осевой фиксацией и сниженной периферической интенсивностью.

Коническая рефракция возникает, когда световой луч распространяется вдоль одной из оптических осей двухосного кристалла. Вблизи так называемой плоскости Ллойда - области перетяжки конического поля — возникающий волновой, состоящую из двух ярких концентрических колец, разделенных темным кольцом Поггендорфа.

В нашей экспериментальной установке луч полупроводникового лазера длиной волны 635 нм направлялся через двухосный кристалл, ориентированный вдоль одной из его оптических осей, за которым следовал аксикон с углом при вершине 160°, расположенный в плоскости Ллойда. Интерференция конически преломленных колец на поверхности аксикона привела к значительному подавлению боковых лепестков в проходящем пучке. Система также включала моторизованный пространственный сканер с шагом 50 мкм вдоль оси распространения для регистрации трехмерного распределения интенсивности [3].

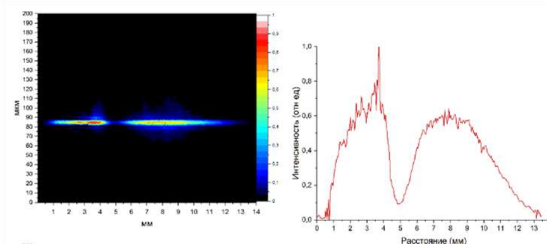


Рисунок. Продольное распределение интенсивности и график распределения максимальной интенсивности по оси распространения. Длина распространения составила 12 мм, шаг съемки 50 мкм

В ходе экспериментов были сформированы игольчатые пучки с различными пространственными характеристиками, зависящими от толщины аксикона. При толщине аксикона 8 мм наблюдался пучок с диаметром центрального пика около 4 мкм и длиной распространения порядка 12 мм (рисунок). При уменьшении толщины аксикона до 2 мм диаметр пучка сокращался примерно на 10%, а длина распространения уменьшалась до ~4 мм. Такая зависимость объясняется тем, что область перетяжки, соответствующая плоскости Ллойда, где волновой фронт становится близким к плоскому, имеет протяжённость значительно меньшую, чем толщина аксикона. В результате эффективный угол преломления на поверхности аксикона определяется не только его геометрией, но и углом конической рефракции.

В работе также представлены аналитические выражения, описывающие зависимость длины распространения пучка и диаметра его центрального пика от толщины аксикона. Полученные теоретические результаты хорошо согласуются с данными численного моделирования и экспериментальными измерениями.

Предложенная конфигурация обеспечивает практичный способ генерации узких, удлиненных оптических пучков с увеличенной дальностью распространения и подавленными боковыми лепестками. По сравнению с обычными пучками Бесселя, полученные структуры обладают улучшенной локализацией интенсивности в осевом направлении и повышенной продольной стабильностью. Эти особенности делают этот метод весьма перспективным для применения в акустооптической визуализации, где необходимы повышенное разрешение, более глубокое проникновение и стабильная 3D-визуализация.

[1] Shi J. et al., *Journal of biomedical optics*, **20**, №11, 116002-116002, (2015).

[2] Zhou Y., Sun N., Hu S., *IEEE transactions on medical imaging*, **41**, №12, 3544-3551, (2022).

[3] Абдулразак С.Х. и др., *Тезисы докладов Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники «Фотоника 2025»*, 8-12 сентября 2025 г., Новосибирск, с. 111, (2025).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АППРОКСИМАЦИИ ГРАДИЕНТОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПОЛИНОМАМИ ЦЕРНИКЕ И БИ-СПЛАЙНАМИ

Галактионов И.В.^{1,2}, Топоровский В.В.^{1,2}

¹Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия

²Московский политехнический университет, Москва, Россия

ilya.galaktionoff@gmail.com

В работе представлены результаты реализации алгоритмов аппроксимации поверхности волнового фронта. Проведён сравнительный анализ эффективности восстановления модельных волновых фронтов простых аберраций (астигматизмы, комы, дефокусировка). Также исследованы возможности восстановления сложных поверхностей, в частности, поверхности Франке. СКО исходной и восстановленной поверхности составляло 0.38 и 0.39 мкм, соответственно.

Ключевые слова: В-сплайн, Цернике, методы аппроксимации.

Методика аппроксимация поверхности волнового фронта с использованием полиномов Цернике [1, 2] хорошо известна и широко используется в оптике. В большинстве практических случаев качество аппроксимации волнового фронта с использованием полиномов Цернике достаточно, особенно в случае круглой апертуры оптического пучка. Однако, в случае прямоугольной или кольцевой апертуры оптического пучка [3-5] (например, если нужно измерить плоскостность поверхности детали, имеющей кольцевую форму), полиномы Цернике не обеспечивают должной точности. Аналогичная ситуация наблюдается в случае наличия неоднородностей поверхности, больших по амплитуде, но занимаемых малую площадь в сравнение с размером пучка. Это связано с модальным характером полиномов Цернике.

В настоящей работе мы реализовали подход аппроксимации волнового фронта с использованием В-сплайнов [6]. В исследовании приводятся результаты аппроксимации волнового фронта классических аберраций (астигматизмы, комы, дефокусировка, сферическая аберрация), сложного смоделированного волнового фронта (поверхности Франке), а также результаты аппроксимации локальных мелкомасштабных неоднородностей (рисунок) с применением полиномов Цернике и В-сплайнов.

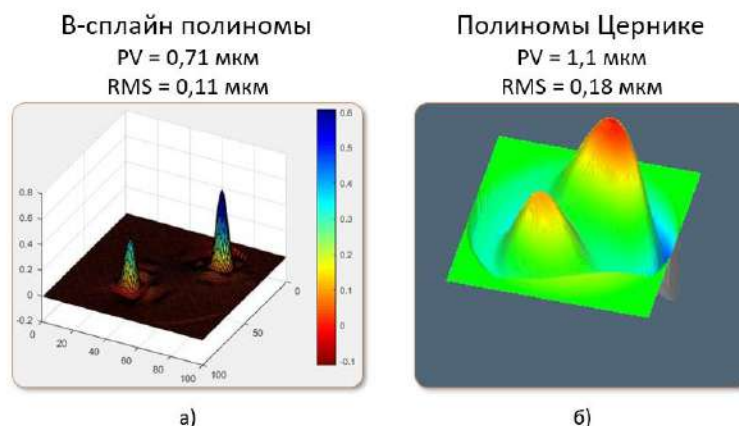


Рисунок. Результаты аппроксимации волнового фронта, плоского по всей апертуре пучка, но имеющего 2 локальных пика площадью ~1.5% каждый от общей площади апертуры пучка: а) с использованием В-сплайнов, б) с использованием полиномов Цернике

- [1] Wyant J.C., Creath K., *Proc. of Applied optics and optical engineering*, **1**, 27-39, (1992).
- [2] Southwell W.H., *J. Opt. Soc. Am.*, **70**, 8, 998-1005, (1980).
- [3] Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A., *Photonics*, **9**, 5, 296, (2022).
- [4] Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A., *Proc. SPIE*, **10886**, 1088619, (2019).
- [5] Sheldakova J., Galaktionov I., Nikitin A., Rukosuev A., Kudryashov A., *Proc. SPIE*, **10774**, 107740S, (2018).
- [6] Sergievskaya I., Royo S., Ares M., *Proc. of 7th AOIM workshop*, (2009).

**ШЕСТИВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С УДВОЕННЫМ ОБРАЩЕНИЕМ
ВОЛНОВОГО ФРОНТА В МНОГОМОДОВЫХ ВОЛНОВОДАХ
С ТЕПЛОВОЙ И РЕЗОНАНСНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ**

Шмойлова С.С., Ивахник В.В.

Самарский университет им. Королева, г. Самара, Россия

shmoilovasvet@yandex.ru

Численными методами изучено поведение интеграла перекрытия и изменение температуры, определяющих зависимость качества удвоенного обращения волнового фронта, в длинных многомодовых волноводах как с резонансной, так и с тепловой нелинейностями.

Ключевые слова: удвоенное обращение волнового фронта, тепловая нелинейность, резонансная нелинейность.

Шестиволновые преобразователи излучения на основе тепловой нелинейности широко применяются для получения волны с удвоенным обращенным волновым фронтом. Это позволяет корректировать фазовые искажения, обрабатывать в реальном масштабе времени оптические изображения, сигналы и т.д. [1]. По сравнению с трёх- и четырёхволновыми преобразователями излучения, шестиволновые преобразователи обладают большими возможностями управления формой волнового фронта, пространственной селективностью, преобразованием изображения, передачи информации с одних пучков на другие и т.д. [2]. Чтобы повысить эффективность (коэффициент отражения), как и в случае четырёхволнового взаимодействия, целесообразно использовать шестиволновое взаимодействие в волноводах [3, 4]. Волоконные структуры позволяют концентрировать энергию в малых объёмах, усиливая эффекты тепловой нелинейности. Исследования показывают, что многоволновое взаимодействие в волноводах с кремниевыми сердечниками является перспективным направлением [5-8]. Такие волоконно-оптические системы обладают высокой мощностью (свыше 10 нВт) и значительной длиной когерентности (до 4 км), обеспечивая высокую контрастность и стабильность изображений. Эти свойства делают их полезными для усиления телекоммуникационных сигналов.

Настоящее исследование посвящено анализу качества удвоенного обращения волнового фронта при шестиволновом взаимодействии на основе тепловых и резонансных нелинейностей в различных типах волноводов. В качестве волноводов рассматриваются двумерный волновод с бесконечно проводящими поверхностями и неограниченный двумерный волновод с параболическим распределением показателя преломления (параболический волновод). Подробно изучается поведение интеграла перекрытия, вычисляются самые эффективные моды температурных решеток в указанных типах волноводов. Более того, анализируется поведение изменения температуры в зависимости от пространственных координат и получено аналитическое выражение для функции размытия точки (ФРТ).

- [1] Romanov O.G., Gorbach D.V., Tolstik A.L., *Optics and Spectroscopy*, **108**, №5, 768-773, (2010).
- [2] Ормачеа О., Толстик А.Л., *Вестник БГУ*, **1**, №2, 3-9, (2003).
- [3] Ivakhnik V.V., Kapizov D.R., Nikonov V.I., *Computer Optics*, **47**, №5, 702-709, (2023).
- [4] Ivakhnik V.V., Kapizov D.R., Nikonov V.I., *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, **27**, №2, 38-44, (2024).
- [5] Wu D., et al., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **27**, №2, 1-11, (2021).
- [6] Sun S., et al., *Optics Letters*, **47**, №7, 1626-1629, (2022).
- [7] Huang M., et al., *Photonics Research*, **11**, №2, 137-142, (2023).
- [8] Sun S., Goran Z., Peacock A., *Optics Express*, **32**, №6, 8715-8722, (2024).

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПОДВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТРАССАХ

Чижин Д.Д., Козлов Т.А., Захаров Э.А.

МТУСИ, Москва, Россия

qazwer.dd41@gmail.com

Представлены результаты анализа оптических неоднородностей, возникающих на трассах подводной лазерной связи, методом Тальбот-интерферометрии. Продемонстрирована возможность визуализации широкомасштабных градиентов: температуры, плотности и солёности воды.

Ключевые слова: подводная лазерная связь, оптические неоднородности, волновой фронт.

В настоящее время развиваются технологии подводной лазерной связи (ПЛС) [1]. Оптические неоднородности среды могут приводить к возмущениям волнового фронта (ВФ) лазерного пучка, вследствие чего возникают дополнительные потери мощности на беспроводных линиях связи. Данные эффекты обуславливаются наличием флуктуаций показателя преломления на оптической трассе, вызванных градиентом температур. Также при взаимодействии с веществом часть излучения рассеивается, что может быть связано с наличием в воде различных твердых частиц. Исследование таких возмущений возможно при помощи наблюдения за поверхностью ВФ лазерного излучения больших диаметров [2]. В ходе настоящей работы была разработана экспериментальная установка, моделирующая работу системы ПЛС, включающая в себя датчик волнового фронта на основе эффекта Тальбота [3]. Внешний вид установки представлен на рисунке 1.

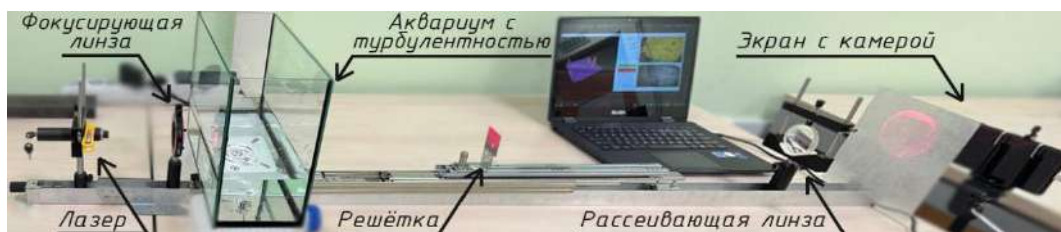


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

В ходе эксперимента лазерное излучение моделируемой ПЛС, диаметром 50 мм, по прохождении через аквариум, наполненный дистиллированной водой комнатной температуры, попадало на периодическую решётку датчика волнового фронта. Длина оптического пути через слой воды составляла 150 мм. Изменение давления обеспечивалось турбулентными потоками, со скоростью 0.5 м/с, создаваемыми при помощи гребного винта. Температурные градиенты обеспечивались добавлением в аквариум воды с температурой 80 °C, изменение плотности осуществлялось путём добавления в воду соли, порциями по 10 грамм. Видеокамера фиксировала изображение тальбограмм [2, 3]. Изменение положения некоторой точки тальбограммы сигнализировало о локальном наклоне ВФ. На рисунке 2 приведены тальбограммы в ходе экспериментов.



Рис. 2. Тальбограммы: без возмущений (а), спустя 5 секунд после добавления горячей воды (б), спустя 10 секунд после добавления горячей воды (в), спустя 5 секунд после добавления соли (г), спустя 10 секунд после добавления соли (д)

В результате эксперимента, удалось качественно сравнить различные оптические неоднородности по характеру их воздействия. Так, турбулентные потоки со скоростью 0.5 м/с не оказали заметного влияния на поверхность ВФ. Температурные градиенты сильнее всего возмущали ВФ, что позволяло визуализировать конвекционные потоки в аквариуме. Изменение плотности воды путём добавления соли также оказывало сильное влияние на ВФ лазерного излучения. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что наиболее существенное влияние на качество работы ПЛС оказывают температурные флуктуации среды распространения излучения.

[1] Kaushal H., Kaddoum G., *IEEE*, 4, 1518-1547, (2016).

[2] Казанцев С.Ю. и др., *Лазерно-информационные технологии*, 43-44, (2022).

[3] Касимов К.М., Рабенандрасана Ж., Чижин Д.Д., *Новые технологии. Наука, техника, педагогика*, 452-459, (2024).

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ
НЕМАТИКО-ХОЛЕСТЕРИЧЕСКОЙ СМЕСИ**
Нурмухаметов Д.И.^{1,2}, Гордеева А.И.¹, Паньков А.С.¹, Пономарёв Р.С.¹

¹ПГНИУ, г. Пермь, Россия

²ПНИПУ, г. Пермь, Россия
danur95@yandex.ru

В работе предложен и экспериментально протестирован волоконно-оптический датчик электромагнитного поля, изготовленный на основе полости микронного размера, заполненной нематико-холестерической смесью. Определена его чувствительность, предложены варианты практического применения в дистанционном мониторинге магнитного поля.

Ключевые слова: оптоволоконный датчик, магнитное поле, нематико-холестерическая смесь.

Измерение магнитных и электрических полей является одной из важных задач при разработке электромагнитных устройств. На сегодняшний день высокую популярность для детектирования данных полей получили микрорезонансные оптоволоконные датчики, в основе чувствительных элементов которых лежат жидкие кристаллы (ЖК). Смесь нематика и холестерика, также известная как нематико-холестерическая смесь (НХС), представляет собой раствор холестерических жидких кристаллов в нематическом жидком кристалле. Нематик, молекулы которого ориентированы в основном в одном направлении, но не имеют дальнего порядка в расположении центров масс. Холестерические жидкие кристаллы – это подкласс хиральных нематических жидких кристаллов, которые характеризуются спиральной структурой. В НХС молекулы холестерических жидких кристаллов встраиваются в нематическую матрицу, образуя спиральную структуру, период которой зависит от концентрации холестерика. НХС смеси находят применение в различных областях науки и техники благодаря своей чувствительности к температурным и электромагнитным полям.

В работе приведены результаты разработки и экспериментального исследования чувствительности оптоволоконного датчика электромагнитного поля, созданного на основе микронной полости, заполненной НХС. Изготовление полости на торце оптического волокна подробно описано в работах [1, 2], заполнение жидкостями приведено в работе [3]. В настоящей работе датчик выполнен на одномодовом волокне типа "Panda" (Китай), сохраняющим поляризацию.

Для определения чувствительности датчика и снятия АЧХ оптическое волокно помещалось в область однородного магнитного поля, создаваемого двумя обкладками электромагнита ($H_{\max}=600$ кА/м). В ходе эксперимента поляризованное лазерное излучение от узкополосного источника с длиной волны 1550 нм при помощи циркулятора направлялось в исследуемую полость. Оптический сигнал, прошедший через НХС и отраженный от границы раздела НХС-воздух, детектировался поляриметром.

В ходе эксперимента было зафиксировано, что при некоторых значениях напряженности магнитного поля наблюдалась смена ориентации угла вращения плоскости поляризации света. Проведен расчет эллиптичности, построена АЧХ.

Таким образом, в работе показано, что замена нематика [3] на НХС позволила получить компактный, высокочувствительный волоконно-оптический датчик магнитного поля, обладающего всеми плюсами измерительных элементов, выполненных на основе интерферометров Фабри-Перо.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт № FSNF-2024-0001).

[1] Нурмухаметов Д.И., и др., *Фотон-Экспресс*, 5, 189, (2023).

[2] Morozov O., et. al., *Photonics*, 11(1), 22, (2023).

[3] Гордеева А.И., Нурмухаметов Д.И., Пономарёв Р.С., *Электроника, фотоника и киберфизические системы*, 4, №3, 26-32, (2024).

АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ ФАНТОМНОГО И ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДОВ МИКРОСКОПИИ

Давлетшин Н.Н.^{1,2}, Вьюнышев А.М.^{1,2}, Чиркин А.С.³

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

²Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

k_davletshin@mail.ru

Продемонстрированы преимущества применения фантомной визуализации в оптической микроскопии в сравнении со стандартным методом получения изображения. Применение фантомного принципа в схеме оптического микроскопа позволило увеличить глубину резкости оптической системы на два порядка.

Ключевые слова: фантомная визуализация, оптическая микроскопия, глубина резкости.

За последние пять лет активно развиваются методы микроскопии на основе коррелированных световых полей [1, 2]. Одним из таких методов является метод фантомной визуализации, основным преимуществом которого является увеличенная глубина резкости визуализации оптической системы [3]. Данное преимущество обеспечивается тем, что проходящий через объект или отраженный свет регистрируется интегральным детектором. Восстановление изображения объекта происходит при помощи измерения функции корреляции по формуле

$$G(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N (B_r - \langle B \rangle) I_r(x, y), \quad (1)$$

где N – общее количество реализаций; r – текущая реализация; B_r – значение интегрального сигнала r реализации; $\langle B \rangle$ – среднее значение интегрального сигнала по N реализациям; $I_r(x, y)$ – изображение, полученное со вспомогательного канала для реализации r .

В настоящем докладе рассматривается вариант реализации фантомной микроскопии в проходящем свете. Разработанная нами схема позволяет осуществить два способа визуализации: оптическую (рисунок а) и фантомную (рисунок б). В оптической схеме в канале, включающем объект, используется система сопряженных объективов. Первый объектив формирует опорное световое поле в плоскости исследуемого объекта, в то время как второй объектив осуществляет перенос оптического изображения объекта в плоскость детектирования. Это даёт возможность проводить анализ полученных изображений методом фантомной микроскопии в сравнении со стандартной оптической микроскопией.

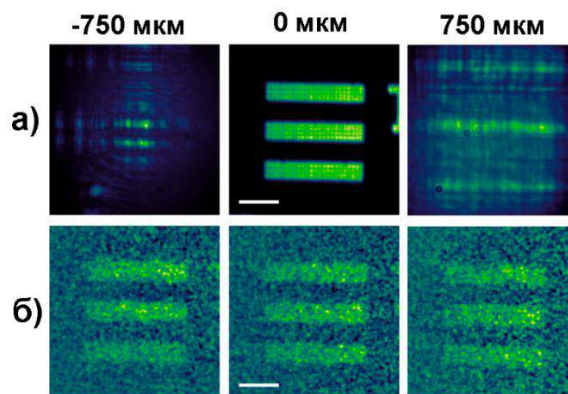


Рисунок. Изображения объекта, полученные методами оптической (а) и фантомной микроскопией (б) при изменении положения второго объектива относительно рабочей плоскости оптической системы

Сравнительный анализ изображений, полученных фантомной и оптической микроскопией, проводился по трём ключевым параметрам: индексу структурного подобия, линейным размерам и контрасту изображений. Экспериментально установлено, что при использовании фантомной микроскопии указанные параметры остаются неизменными при отклонении второго объектива от рабочего положения более чем на 1 мм, что на два порядка по величине превышает значение глубины резкости оптической системы стандартного оптического микроскопа.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН. А.С. Чиркин выполнил исследования в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

[1] Massaro G., Giannella D., Scagliola A. et al. *Scientific Reports*, **12**, 16823, (2022)

[2] Zhu X.H., Bai Y.F., Tan W. et al., *Phys. Rev. A*, **20**, 014028, (2023).

[3] Davletshin N.N., Vyunishev A.M., Chirkin A.S., *Opt. & Laser Tech.*, **184**, 112465, (2025).

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ
ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЗЕРКАЛ**

**Гончаров В.Д., Леонов Е.В., Ким Я.И., Соловьева А.В.,
Шанин Ю.И., Щипалкин В.И.**

АО «Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение «ЛУЧ»,
г. Подольск, Россия
SolovyovaAV@sialuch.ru

В работе рассматриваются методы контроля формы поверхности деформируемых зеркал в выбранном пространственно-частотном диапазоне. Применены различные способы получения топограмм поверхности. Применен Фурье-анализ для выявления периодических структур.

Ключевые слова: зеркало деформируемое.

Согласно исследованиям [1], прецизионные оптические компоненты должны удовлетворять строгим требованиям к обеспечению качественной оптической поверхности. Спецификации волнового фронта охватывают непрерывный диапазон пространственных длин от 10 мкм до 0,5 м, который подразделяется на группы [2]. В данной работе был рассмотрен так называемый второй пространственно-частотный диапазон, который дает подавляющую часть рассеяния светового пучка, падающего на ДЗ.

Фазовая карта (топограмма) поверхности ДЗ получается путем обработки интерференционной картины, получаемой на интерферометре с достаточно хорошим разрешением (интерферометр фазового сдвига), либо путем обработки гартманораммы, получаемой с помощью датчика волнового фронта Шака – Гармана [3].

Для получения информации о наличии периодических неровностей [4] в присутствии больших пространственных (высотных) шумов и для выделения регулярных неоднородностей, к топограмме применяется преобразование Фурье [5]. Оценены пределы разрешимых пространственных диапазонов и приведен процесс выделения наиболее значимых наблюдаемых регулярных неровностей.

В качестве дополнительного способа контроля формы поверхности ДЗ использовался, так называемый метода «теневого» контроля, позволяющий оценить влияние периодических неоднородностей на концентрацию излучения в ближней зоне.

[1] Walsh C.J., Leistner A.J., Oreb B.F., *Appl. Opt.*, **38**, №22, 4790-4801, (1999).

[2] Campbell J.H., Hawley-Fedder R.A., Stolz C.J. et al., *Proceedings of SPIE.*, **5341**, 84-101, (2004).

[3] Шанин О.И. Адаптивные оптические системы в импульсных мощных лазерных установках. М.: Техносфера, 2012 - 81 с.

[4] Elson J.M., Bennett J.M., *J. Opt. Soc. Am.*, **69**, №1, 31, (1979).

[5] Goodman J.W., Roberts and Company publishers, (2005).

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА ИНТЕРФЕРОГРАММ
ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ТАЛЬБОТА**

Епифанов А.Ю., Сойфер Ф.И., Чижин Д.Д.

МТУСИ, Москва, Россия
aleepifanoff@yandex.ru

Представлены результаты работы разработанного программного комплекса, позволяющего строить поверхность волнового фронта лазерного излучения на основе интерферограмм, получаемых при помощи датчика волнового фронта на основе эффекта Тальбота.

Ключевые слова: датчик волнового фронта, эффект Тальбота, анализ интерферограмм.

В системах адаптивной оптики одним из ключевых элементов является датчик волнового фронта (ДВФ) для анализа характеристик оптического излучения. На сегодняшний день известно множество способов реализации ДВФ, в том числе, на основе эффекта Тальбота [1, 2]. Одной из особенностей такой схемы ДВФ является отсутствие оптики в его схеме, что обуславливает возможность исследования широкоапертурных пучков и обеспечивает высокую чувствительность измерительной системы. Ранее, была продемонстрирована эффективность контроля оптических неоднородностей при помощи Тальбот-интерферометрии [3]. В данной работе представлен программный комплекс, позволяющий анализировать получаемые при помощи ДВФ интерферограммы (тальбограммы). В связи с практическими применениями ДВФ в области атмосферной оптической связи [4], возникают следующие требования к разрабатываемому программному комплексу:

- 1) Обработка тальбограмм в режиме реального времени, со скоростью не менее 60 кадров в секунду.
- 2) Корректное определение координат точек при условиях неравномерной фоновой засветки.

Программный комплекс разработан на языке программирования Python. Анализ интерферограмм в реальном времени, происходит при помощи компьютерного зрения. В программном комплексе поддерживается загрузка видеофайла или захват видеопотока с камеры. Пользователь может применить фильтры, после чего запускается обработка. По умолчанию применяется гауссов фильтр, обеспечивающий корректное определение координат точек. Алгоритм строит бинарную маску изображения, определяет координаты точек, затем по методу Хафа находит квадратную выборку с максимальным числом точек; процедура повторяется 5 раз, за опорную сетку точек берется лучший по количеству найденных точек результат. Координаты исходного положения точек фиксируются. В процессе работы, на кадрах выполняется отслеживание перемещения точек. При потере точки её координаты аппроксимируются случайным образом в пределах допустимого диапазона. Далее данные фильтруются и по ним строится волновой фронт (ВФ) лазерного пучка. Для повышения производительности предусмотрена возможность ускорения обработки за счёт использования ресурсов Graphics Processing Unit (GPU). Пример построения ВФ на основе регистрируемых тальбограмм показан на рисунке.

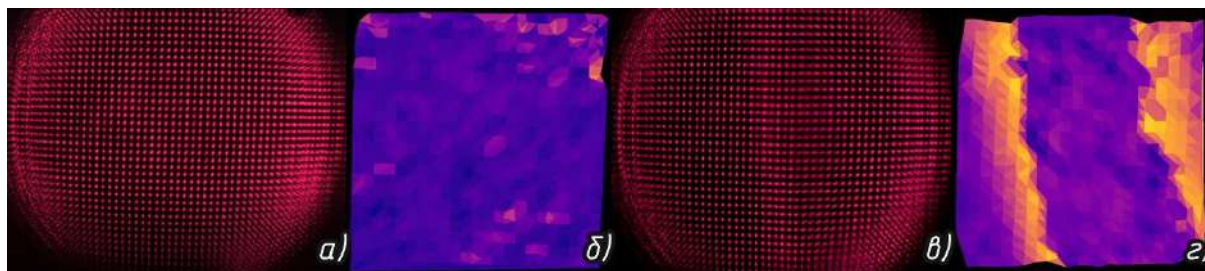


Рисунок. Пример работы программного комплекса: а) неискажённая тальбограмма, б) ВФ на основе тальбограммы (а), в) искажённая тальбограмма; г) искажённый ВФ на основе тальбограммы (г)

В результате, разработанный программный комплекс позволяет в режиме реального времени строить поверхность постоянной фазы широкоапертурного лазерного пучка. Скорость обработки тальбограмм составила 60 кадров в секунду.

- [1] Volkova L.V., Kazantsev S.Y., Muzychka A.Y., Skobeleva V.S., *Technical Physics*, **69**, 437-441, (2024).
- [2] Игнатьев А.Б., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Марченко В.М., Феофилактов В.А., Фирсов К.Н., *Квантовая электроника*, **38**, 69-72, (2008).
- [3] Kazantsev S.Y., Pchelkina N.V., Smolsky A.A., *High Energy Chemistry*, **57**, 91-94, (2023).
- [4] Казанцев С.Ю., Пчелкина Н.В., Смольский А.А., *REDS: Телекоммуникационные устройства и системы*, **13**(4), 4-9, (2023).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО
К АКУСТИЧЕСКИМ КОЛЕБАНИЯМ**

Макарин С.С., Гацко Д.А., Прохорова У.В., Погода А.П.

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия
savvmakarin1@gmail.com

Было произведено исследование влияния акустических колебаний на интерферометр Фабри-Перо. В результате измерения колебаний интерферограммы были выявлены зависимости чувствительности прибора в зависимости от его базы и частоты акустических колебаний.

Ключевые слова: акустические колебания, интерферометр Фабри-Перо.

Интерес к интерферометрам Фабри-Перо, как к регистраторам акустических колебаний, вызван их чувствительностью к малейшим изменениям оптической длины базы [1]. Принцип регистрации и измерения заключается в наблюдении за поведением интерференционной картины под воздействием акустических колебаний на интерферометр. Акустические волны вызывают изменение расстояния и показателя преломления между зеркалами, что приводит к смещению интерференционных полос. На чувствительность данного метода влияют такие факторы, как: качество изготовления оптических поверхностей, способ закрепления зеркал, частота акустических колебаний, источник лазерного излучения, приборы для регистрации изменения интерферограммы и методы обработки полученных данных. В ходе исследования выявлены следующие зависимости:

1. Чем выше добротность резонатора интерферометра, тем более узкими и интенсивными являются интерференционные полосы, что позволяет регистрировать меньшие сдвиги пиков и, вследствие, повышает чувствительность.

2. Чем больше длина резонатора, тем больше изменение оптической длины при той же амплитуде акустических колебаний.

3. Отмечена повышенная чувствительность к частотам, совпадающим с собственными механическими резонансами компонентов интерферометра.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания "Фундаментальные исследования в области создания приборов и технологий развития ключевых узлов терминалов лазерной космической связи с высокой скоростью передачи данных" FZWF-2025-0002. НИОКТР 125052706438-3.

[1] Zhenfeng Gong, Ke Chen, Xinlei Zhou, Yang Yang, Zhihao Zhao, Helin Zou, *Journal of Lightwave Technology*, **35**, №24, 5276-5279, (2017).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ С ДИФРАКЦИОННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ МОДУЛЯТОРАМИ СВЕТА С ФУНКЦИЯМИ ПРОПУСКАНИЯ, ЗАДАННЫМИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ

Чугунов С.С., Спиридонов С.И., Щербаков А.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

semen.chugunov@metalab.ifmo.ru

Реализована архитектура нейронной сети, предсказывающая функцию пропускания пространственного модулятора света с учетом краевых эффектов, возникающих на границах соседних ячеек. Продemonстрирована возможность ее использования для решения обратной задачи дифракции.

Ключевые слова: краевые эффекты, пространственный модулятор света, нейронная сеть.

Одной из задач оптики является прямая задача дифракции – расчет дифракционной картины, которая формируется после прохождения светового пучка через оптическую систему, состоящую из различных оптических элементов с известными функциями пропускания, описывающими модуляцию падающего волнового фронта, с использованием методов, в основе которых лежит преобразование Фурье [1]. Среди часто используемых элементов можно выделить элементы с простой функцией пропускания, например тонкая линза, поляризатор, пластинка, и со сложной – дифракционные оптические элементы (ДОЭ) и пространственный модулятор света. Для последних существует проблема, связанная с возникновением краевых эффектов на границах соседних элементарных ячеек [2]. Одним из наиболее известных подходов для ее решения является использование аналитически скорректированной функции пропускания, лишь эффективно описывающей возникающие краевые эффекты [2]. Альтернативным подходом является применение метода строгого расчета элементов со сложными функциями пропускания на основании уравнений Максвелла. Проблема такого подхода заключается в его сопряжении с эффективным расчетом оптических схем, состоящих из большого числа таких элементов.

В данной работе используется Фурье-модальный метод [3] для расчета фазового набег, создаваемого одной элементарной ячейкой ДОЭ с учетом влияния ее окружения. Оно представляет собой восемь соседних ячеек с заданными состояниями, искажающие идеальный отклик по поверхности центральной ячейки. Применение Фурье-модального метода позволило сгенерировать набор данных, представляющий состояния квадратной структуры, состоящей из девяти элементарных ячеек модулятора, и соответствующий им скорректированный набег фазы, генерируемый центральной ячейкой.

На сгенерированном наборе данных была обучена нейронная сеть, предсказывающая скорректированную функцию пропускания по заданной двумерной маски состояний. Ее архитектура и количество весов для обучения были выбраны таким образом, чтобы избежать проблемы переобучения при тестировании на валидационном наборе данных.

На основе обученной модели был разработан программный модуль для библиотеки SVETLANNA [4]. Это открытая библиотека, предназначенная для проектирования дифракционных нейронных сетей и численного решения прямой задачи дифракции для оптических систем, состоящих из различных оптических элементов. Модуль позволяет рассчитывать преобразованный функцией пропускания ДОЭ волновой фронт. Для него использовалась скорректированная функция пропускания, описывающая возникающие на границах соседних ячеек с заданными состояниями краевые эффекты с помощью разработанной нейронной сети.

С использованием созданного программного модуля и функционала библиотеки была продемонстрирована возможность эффективного решения обратной задачи дифракции без использования классических алгоритмов, таких как алгоритм Герцберга-Сакстона [5]. Продemonстрирован пример подбора скорректированной маски состояний для пространственного модулятора света, позволяющая генерировать световой пучок заданной формы при решении прямой задачи дифракции. Результаты работы могут быть применены различным дифракционным элементам и пространственным модуляторам света в различных приложениях. Строгий расчет учитывает специфику геометрий и размеров пикселей конкретных ДОЭ и пространственных модуляторов света, и разработанный модуль для открытой библиотеки SVETLANNA [4] позволит унифицированным образом применять разработанный метод.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-11-00153-П).

[1] Matsushima K., Shimobaba T., *Optics Express*, **17**, 22, 19662-19673, (2009).

[2] Moreno I., Sánchez-López M. D. M., Davis J. A., Cottrell D. M., *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, **17**, 1, 27, (2021).

[3] Spiridonov S., Shcherbakov A.A., *Journal of Computational Science*, **67**, 101936, (2023).

[4] Открытая библиотека для проектирования дифракционных нейронных сетей SVETLANNA [Электронный ресурс]. URL: <https://pypi.org/project/svetlanna/> (дата обращения: 21.06.2025).

[5] Zalevsky, Z., Mendlovic D., Dorsch R.G., *Optics Letters*, **21**, 12, 842-844, (1996).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН, СОСРЕДОТОЧЕННЫХ У ВОГНУТОЙ ГРАНИЦЫ

Халиков А.Р., Попов И.Ю.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

al.ry.ri@gmail.com

Численное исследование локализации энергии у границы в резонаторе с волноводами выявило зависимость концентрации от частоты, влияние геометрических дефектов и эффективность фильтрации высокочастотных волн.

Ключевые слова: локализация, резонатор, дефекты.

Концентрация волновой энергии у криволинейной границы — эффект, наблюдаемый при возбуждении высокочастотных мод в круговой области. Поведение такой локализации при наличии отклонений от идеальной геометрии, например, в виде локального дефекта, изучено недостаточно. Настоящая работа посвящена численному исследованию волнового процесса в области с дефектом на границе, включая анализ устойчивости локализации и эффективности передачи энергии через систему с волноводами.

Постановка задачи. Эффект удержания волны у границы широко описан для симметричных областей [1, 2], но реакции таких мод на искажения формы, особенно в задаче с волноводами, требуют уточнения. Целью исследования является количественная оценка влияния частоты и геометрии локального дефекта на распределение энергии у границы, а также рассмотрение эффективности прохождения сигнала между входным и выходным волноводом. Это может быть полезно для задач фильтрации и селекции частотных компонентов [3].

Объект и метод исследования. Рассматривается круговая область с двумя линейными волноводами и локальным дефектом (вогнутость или выпуклость) на границе окружности, пример которого показан на рисунке. Система возбуждается волной фиксированной частоты через первый волновод. Измеряется энергия как в основной области, так и в узкой полосе вдоль границы. Отдельно оценивается энергия, переданная во второй волновод, что позволяет судить об эффективности структуры как фильтра. Решение волнового уравнения получено численно с использованием стандартных разностных схем.

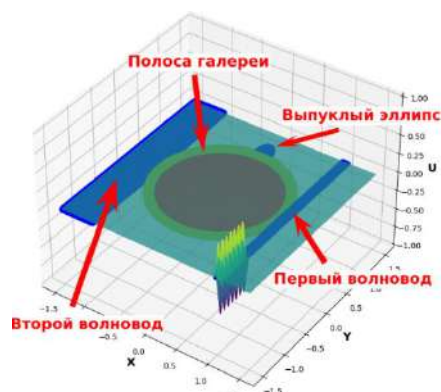


Рисунок. Пример вычислительной области

Результаты. С ростом частоты наблюдается повышение концентрации энергии у границы, что соответствует смещению максимумов мод к периферии. Локальные дефекты уменьшают степень локализации, особенно при увеличении их размеров, однако при высоких частотах эффект удержания частично сохраняется. Проведённый анализ показал, что форма дефекта влияет не только на распределение энергии в области, но и на коэффициент передачи сигнала между волноводами. Отдельные конфигурации проявляют выраженную зависимость выходной энергии от частоты, что позволяет рассматривать систему как простейший полосовой фильтр.

Выводы. В работе проведено численное исследование влияния локального дефекта на локализацию волны и эффективность передачи сигнала через систему. Результаты уточняют границы применимости эффекта удержания энергии у криволинейной границы и демонстрируют потенциал использования подобных систем для частотной фильтрации.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 24-21-00107.

[1] Rayleigh J.W.S., *The Theory of Sound*, 2, London: Macmillan, (1896).

[2] Климов В.В., *Успехи физических наук*, **184**, №12, 1245-1272, (2014).

[3] Foreman M.R., Swaim J.D., Vollmer F., *Adv. Opt. Photon.*, **7**, 168-240, (2015).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ
ДИОКСИДОВ ТИТАНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ
АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА**

Хмелевский В.А., Карлагина Ю.Ю., Романова Г.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

hotlinevalery@yandex.ru

В настоящей работе исследовано влияние изменения морфологии поверхности на изменение фотокаталитической активности диоксидов титана. Проанализированы зависимости влияния химического состава на эффективность фотокатализа.

Ключевые слова: диоксиды титана, ультрафиолет, активные формы кислорода, микрорельеф.

На сегодняшний день одной из наиболее распространенных проблем в области медицины является бактериальное прикрепление к поверхностям [1]. В процессе присоединения бактерии формируются в большие колонии и образуют биопленки, которые имеют высокую устойчивость к антибиотикам, механическим и химическим воздействиям для борьбы с ними, а также приобретают способность к более быстрому распространению [2]. Появление конгломератов приводит к появлению инфекций и увеличивает количество хронических заболеваний в области здравоохранения [3]. Однако, существует множество методов борьбы с данной проблемой, одной из которых является увеличение уровня генерации активных форм кислорода (АФК) за счет воздействия ультрафиолетового (УФ) излучения на полупроводниковые покрытия. Данный метод позволяет переходить свободным электронам в зону проводимости и активировать синглетный кислород и ОН-группы, позволяющие эффективно действовать в отношении бактерий [4]. Предложенный в данной научно-исследовательской работе способ направлен на повышение эффективности генерации АФК.

Целью настоящей работы является повышение площади поверхности полупроводниковых покрытий путем предварительного лазерного структурирования поверхности. Предполагается использование шлифовальной бумаги «MIRKA» различной зернистости от 100 до 2000 для устранения неровностей поверхности титана марки ВТ1-0. Далее полученные структуры подвергались лазерной обработке на комплексе «Минимаркер-2» с длиной волны 1064 нм и мощностью 20 Вт для формирования микрорельефа поверхности и создания оксидных покрытий. Для оценки фотокаталитической активности полученных образцов был поставлен эксперимент по облучению титана УФ с длиной волны 380 нм в растворе красителя метиленового синего концентрации 1%, способного деградировать при генерации АФК. Для полученных образцов была проведена оценка химического состава и построены зависимости эффективности фотокаталитического выхода от микрорельефа поверхности.

Таким образом, в ходе исследования были получены образцы, демонстрирующие наибольшую фотокаталитическую активность благодаря предварительному структурированию поверхности. Такие полупроводниковые покрытия могут применяться в области здравоохранения для повышения антибактериальности поверхности, в частности, в сфере дентальных имплантатов.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030».

[1] Kreve S., Dos Reis A.C., *Japanese dental science review*, **57**, 85-96, (2021).

[2] Shree P. et al., *Medicine in Microecology*, **16**, 100084, (2023).

[3] Bassetti S. et al., *European journal of internal medicine*, **99**, 7-12, (2022).

[4] Lefatshe K., Mola G.T., Muiva C.M., *Heliyon*, **6**, 6, (2020).

**ИЗМЕРЕНИЕ СТРУКТУРЫ ОПТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ МНОГОПУЧКОВОЙ
ФОКУСИРОВКЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Золотавин М.А., Бурдонов К.Ф., Соловьев А.А.

ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия
mihailzolotavin@gmail.com

Работа посвящена исследованию структуры поля, возникающей при встречной фокусировке четырех оптических каналов, с помощью субволновых волоконных зондов. Особое внимание уделено методам диагностики зондов. Исследование проводится в интересах проекта XCELS.

Ключевые слова: субволновые зонды, интерференция.

Одновременная доставка и последующая фокусировка двенадцати сверхмощных лазерных импульсов в одну точку является одной из основных задач, решаемых в рамках проекта XCELS [1]. Предполагается, что топология оптического поля в главном фокусе системы позволит достичь рекордных уровней интенсивности излучения, в результате чего станут возможными наблюдения явлений, связанных с нелинейностью физического вакуума. Отсюда естественным образом возникает задача изучения структуры результирующего поля, которая может быть решена методом с использованием субволнового волоконного зонда (СВЗ), обычно используемого в задачах сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) [2]. Однако, в отличие от СБОМ, предполагается зондирование непосредственно оптического поля, а не его рассеяния на какой-либо поверхности. В рамках данного исследования разработан метод диагностики данного типа СВЗ на предмет эффективности их запитки лазерным излучением с различными пространственными характеристиками. Создана экспериментальная установка, позволяющая осуществлять ввод лазерного излучения в СВЗ с разных направлений и с переменной поляризацией. В качестве лазерного источника использовался фемтосекундный задающий генератор Ti:Sa мощностью 1 Вт. Исследуемые образцы СВЗ показали чувствительность к направлению и поляризации зондируемого излучения. Полученные результаты могут иметь практическое значение для задач когерентного сложения большого числа встречных лазерных пучков.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант №25-62-00019).

[1] Хазанов Е.А. и др. *Квантовая электроника*, **53**, 2, 95-122, (2023).

[2] Миронов В.Л., *Техносфера*, **144**, (2005).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ИНТЕНСИВНОСТИ В ПУЧКЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ТОЧНОСТЬ ДАЛЬНОМЕРА**

**Гацко Д.А., Макарин С.С., Гавриш М.В., Прохорова У.В., Розанов П.К.,
Сементин В.В., Борейшо А.С., Погода А.П.**

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия
bkprob@mail.ru

В работе продемонстрирована взаимосвязь между точностью измерений дальномера и профиля пучка излучения. Рассматриваются различные методы коррекции качества распределения интенсивности в лазерном пучке.

Ключевые слова: дальномер, распределение интенсивности, профиль пучка.

В работе изложены результаты исследования связи распределения интенсивности в пучке лазерного излучения и точности измерений дальномера [1, 2]. Проведён анализ влияния профилей излучения на характеристики пучка. Рассмотрены процессы взаимодействия выходного излучения с различными поверхностями, в том числе неровностями поверхностей. Установлено, что для лазерных пучков с неидеальным распределением интенсивности характерно увеличение погрешности измерения дальности, причём наибольшее влияние оказывают асимметрия и неустойчивость профиля по времени. Подобраны методы коррекции пучка, такие как пространственные фильтры, цифровая обработка, замена лазерных источников. Полученные данные можно применить для разработки стабильных сканирующих систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания "Фундаментальные исследования в области создания приборов и технологий развития ключевых узлов терминалов лазерной космической связи с высокой скоростью передачи данных" FZWF-2025-0002. НИОКТР 125052706438-3.

[1] Вильнер В., Ларюшин А., Рудь Е., *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес.*, №3, 118-123, (2008).

[2] Любченко Д.А., Колмогоров О.В., *Оптический журнал*, **91**, №4, 82-92, (2024).

ПРИМЕНЕНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛУТОНОВЫХ И БИНАРНЫХ ГОЛОГРАММ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СПЕКЛ-ПОЛЕЙ

Радюк А.А.¹, Давлетшин Н.Н.^{1,2}, Иконников Д.А.^{1,2}, Мысливец С.А.^{1,2},
Вьюнышев А.М.^{1,2}, Чиркин А.С.³

¹Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

kdavletshin@iph.krasn.ru

Исследованы статистические свойства рассеянного света, формируемого при освещении бинарных и полутонных голограмм. Показано, что радиус пространственной корреляции для спекл-полей, полученных при рассеянии на полутонных голограммах меньше, чем на бинарных голограммах.

Ключевые слова: спекл-поле, корреляционная функция, радиус корреляции.

Спекл-поля представляют собой структурированные световые поля, особенностью которых является случайное пространственное распределение интенсивности и фазы [1]. Применение спекл-полей стало неотъемлемой частью классического подхода в методах фантомной визуализации [2]. Для создания спекл-полей используются различного вида устройства, такие как матовые стекла, пространственные модуляторы света и цифровые микрозеркальные устройства.

В работе исследованы статистические характеристики спекл-полей, генерируемых с помощью цифровых голограмм, которые формируются пространственным модулятором света. В качестве голограмм были рассмотрены случайные полутонные и бинарные маски с различной степенью модуляции. Примеры рассмотренных голограмм и соответствующие им распределения интенсивности представлены на рисунке. Как видно из рисунка, для каждого из типов голограмм наблюдается формирование спекл-полей.

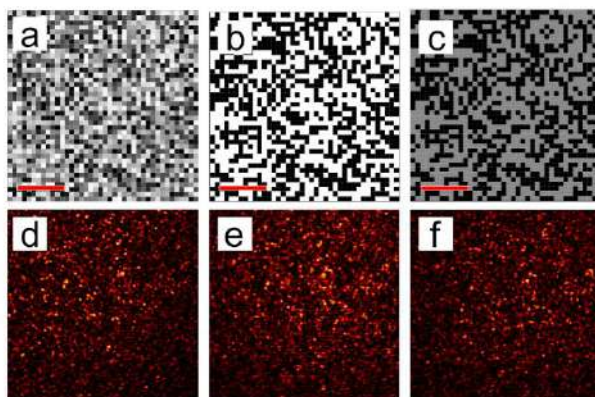


Рисунок. Случайные маски (область в увеличенном масштабе) (a, b, c) и соответствующие им распределения интенсивности спекл-поля (d, e, f): a,d) маска полутонного типа со степенью модуляции [0, 255]; b,e) маска бинарного типа со степенью модуляции [0; 255]; c,f) маска бинарного типа со степенью модуляции [0; 128]. Масштабный отрезок соответствует 360 мкм

Для анализа спекл-полей были построены функции распределения интенсивности, как на основе экспериментальных, так и аналитических данных, рассчитанных по формуле

$$PDF(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right), \quad (1)$$

где I – выборка интенсивности в спекл-поле, $\langle I \rangle$ – среднее значение интенсивности по выборке.

Также была рассчитана корреляционная функция интенсивности второго порядка $g^{(2)}$ для рассматриваемых типов голограмм. Полученные значения $g^{(2)}$ позволили определить тип излучения как псевдотепловое. На основе построенных функций $g^{(2)}$ были найдены радиусы корреляций для разных типов голограмм. Минимальный радиус корреляции соответствует спекл-полям, на основе полутонных голограмм.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН. Работа опубликована в рамках субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ.

[1] Welford W.T., *Contemp. Phys.*, **21**, №4, 401-412, (1980).

[2] Davletshin N.N., Vyunishev A.M., Chirkin A.S., *Opt. & Laser Tech.*, **184**, 112465, (2025).

СИСТЕМА ДЛЯ ЦИФРОВОЙ И АНАЛОГОВОЙ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

Каменев В.Г., Клеопова Н.А., Арапов Ю.Д.

ФГУП ВНИИА им Н.Л. Духова, Москва, Россия

nadiyakarakova@gmail.com

В докладе представлена система для регистрации голограмм в быстропротекающих процессах. Цифровая запись голографических изображений позволяет производить быструю обработку, выделяя зоны интереса. Аналоговая запись голограмм позволяет детально исследовать особенности регистрируемых процессов.

Ключевые слова: голография, цифровая регистрация, быстропротекающие процессы.

При воздействии ударно-волнового нагружения на различные конструкционные материалы может наблюдаться образование микрочастиц с размерами в диапазоне от долей микрона до десятков микрон [1]. Регистрация параметров образования данных частиц представляет существенный научный интерес при исследованиях свойств материалов в условиях экстремальных нагрузок [2]. Одним из наиболее перспективных способов регистрации данных частиц является голография. Могут применяться цифровые и аналоговые методы записи голограммы. В первом случае используются ПЗС и КМОП матрицы, а также электронно-оптические преобразователи. Недостатком данного подхода является низкое разрешение, ограниченное предельными размерами пикселя цифровых регистраторов (до 5 мкм). При аналоговой регистрации используются специальные голографические фотопластины, с разрешением в диапазоне 2000-3000 пар линий на мм. Однако при данном подходе возникают технические сложности при многокадровой регистрации, а также представляет проблему огромная информационная емкость голографической пластины.

В докладе предложен перспективный подход на базе совмещения цифровых и аналоговых методов, где каждый кадр регистрируется одновременно на цифровую матрицу и фотопластину. Сигнал с цифровой матрицы проходит экспресс-обработку, при которой с помощью интеграла Френеля-Кирхгоффа восстанавливаются слои объемного изображения, на которых выделяются зоны интереса (рисунок). Далее эти же участки идентифицируются на аналоговой голограмме, с которой происходит их восстановление в масштабе, увеличенном в 30-50 раз.

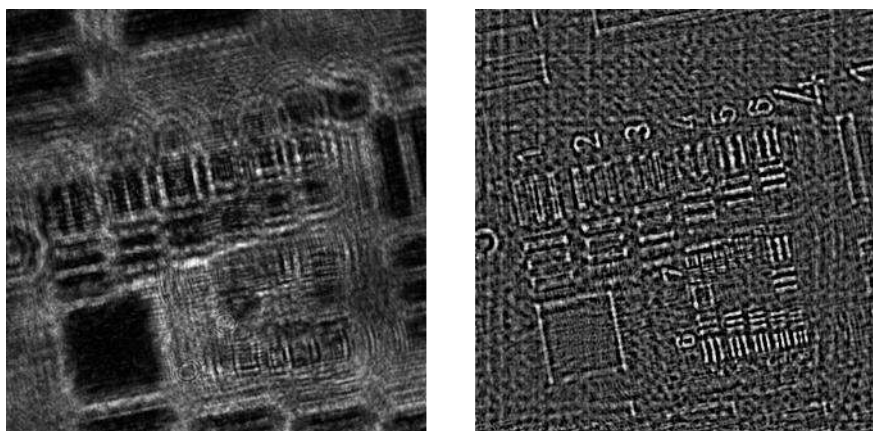


Рисунок. Голограмма (слева), восстановленное изображение миры USAF-1951 (справа)

Данный подход наиболее эффективен при исследовании процессов разрушения материалов, развития гидродинамических неустойчивостей, явлений микрокумуляции. Описанный в докладе экспериментальный стенд содержит два канала, в каждом из которых используется и цифровая и аналоговая регистрация. Это позволяет исследовать явления в динамике и восстанавливать значения скорости образца в различные моменты времени.

[1] Огородников В.А., Иванов А.Г., Михайлов А.Л. и др., *Физика горения и взрыва*, **34**, №6, 103-107, (1998).

[2] Sorenson D.S., Pazuchanics P., *Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos, NM (United States)*, № LA-UR-11-03789, (2011).

НЕВСКАЯ ФОТОНИКА-2025
ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Дизайн обложки

Вёрстка

Подписано к печати

Заказ 4798 от 14.11.2025

Тираж 300 экз.

Н.Ф. Гусарова

М.О. Жукова

А.А. Дроздов

Печатается в авторской редакции

Отпечатано: Учреждение «Университетские коммуникации»
199034, Санкт-Петербург, В.О., Биржевая линия, 16

ИТМО

ISBN 978-5-7577-0737-2



9 785757 707372 >

**Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО**

197101, Санкт-Петербург,
Кронверкский пр., д. 49, литер. А