



НЕВСКАЯ
ФОТОНИКА

ИТМО

НЕВСКАЯ ФОТОНИКА-2023

Всероссийская научная конференция
с международным участием
Сборник научных трудов

9-13 октября 2023 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НЕВСКАЯ ФОТОНИКА-2023

ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

9-13 октября 2023 г.

ИТМО



**НЕВСКАЯ
ФОТОНИКА**

Санкт-Петербург
2023

УДК 53.04, 53.08, 53.09, 61, 531.7, 535, 537.87, 538.95, 616, 620.3, 681.7
ББК 22.34, 28.70, 32.86, 34.58, 53.4

Невская фотоника-2023, Всероссийская научная конференция с международным участием, сборник научных трудов (9-13 октября 2023 г.) / под ред. д.ф.-м.н. Цыпкина А.Н. – СПб.: Университет ИТМО, 2023. – 315 с.

Издание содержит материалы лекций заслуженных ученых и результаты научных работ молодых ученых, доложенные на Всероссийской научной конференции с международным участием "Невская фотоника-2023", проходившей с 9 по 13 октября 2023 г., по тематикам: промышленная фотоника, оптические материалы фотоники, сверхбыстрая фотоника и когерентная оптика, физика наноструктур, лазерная и силовая оптика, оптическая метрология, биофотоника, квантовая оптика и коммуникации, артфотоника.

ISBN 978-5-7577-0698-6

ИТМО

Университет ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, ведущий вуз России в области информационных, фотонных и биохимических технологий. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию: ICPC (единственный в мире семикратный чемпион), Google Code Jam, Facebook Hacker Cup, Яндекс.Алгоритм, Russian Code Cup, Topcoder Open и др. Приоритетные направления: IT и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication. Входит в ТОП-100 по направлению «Автоматизация и управление» Шанхайского предметного рейтинга (ARWU) и занимает 74 место в мире в британском предметном рейтинге QS по компьютерным наукам (Computer Science and Information Systems). Представлен в мировом ТОП-200 по телекоммуникационным технологиям (Telecommunication engineering), а также в ТОП-300 по нанонаукам и нанотехнологиям (Nanoscience & Nanotechnology) ARWU. Входит в ТОП-200 по инженерным наукам (Engineering and Technology), в ТОП-300 по физике и астрономии (Physics & Astronomy), наукам о материалах (Materials Sciences), а также по машиностроению, аэрокосмической и промышленной инженерии (Mechanical, Aeronautical & Manufacturing Engineering) рейтинга QS. Лидер проекта «Приоритет - 2030».

© Университет ИТМО, 2023

© Авторы, 2023

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

по направлениям индустриальная фотоника, оптические материалы фотоники, сверхбыстрая фотоника и когерентная оптика, физика наноструктур, лазерная и силовая оптика, оптическая метрология, биофотоника, квантовая оптика и коммуникации, артфотоника.

Председатель редколлегии:

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

Члены редколлегии:

доцент, к.ф.-м.н. Асеев Владимир Анатольевич

профессор, д.ф.-м.н. Баранов Александр Васильевич

профессор, д.т.н. Вейко Вадим Павлович

профессор, д.ф.-м.н. Венедиктов Владимир Юрьевич

с.н.с., к.ф.-м.н. Вьюнышев Андрей Михайлович

профессор, д.х.н. Горин Дмитрий Александрович

к.х.н. Дымищиц Ольга Сергеевна

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

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

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

профессор, д.ф.-м.н. Косарева Ольга Григорьевна

доцент, к.ф.-м.н. Миронов Леонид Юрьевич

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

профессор, д.ф.-м.н. Толстик Алексей Леонидович

профессор, д.ф.-м.н. Тучин Валерий Викторович

в.н.с., к.ф.-м.н. Ушакова Елена Владимировна

профессор, д.т.н. Храмов Валерий Юрьевич

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

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

доцент, к.т.н. Чистяков Владимир Викторович

г.н.с., к.ф.-м.н. Юевич Владимир Игоревич

ВВЕДЕНИЕ

Издание содержит материалы лекций заслуженных ученых и результаты научных работ молодых ученых, доложенные на Всероссийской научной конференции с международным участием "Невская фотоника- 2023", проходившей с 9 по 13 октября 2023 г., по тематикам: индустриальная фотоника, оптические материалы фотоники, сверхбыстрая фотоника и когерентная оптика, физика наноструктур, лазерная и силовая оптика, оптическая метрология, биофотоника, квантовая оптика и коммуникации, артфотоника.

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, телекоммуникаций, системах экологического мониторинга, безопасности, аэрокосмической промышленности и сфере искусства.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНДУСТРИАЛЬНАЯ ФОТОНИКА (ИНЖЕНЕРНАЯ СЕКЦИЯ)	27
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЯЦИОННОЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ СПЕКТРОВ Боритко С.В., Гречухин А.Н., Иванов С.И.....	28
ЛАЗЕРНАЯ И МИКРОСПЕКТРАЛЬНАЯ ТЕХНИКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ НАНОМАСШТАБНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Погonyшев А.О., Трусов М.А.	29
ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ЛИНЗОВАННЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ ТОРЦЕВОГО ВВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ В ВЫСОКОКОНТРАСТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ Вобликов Е.Д., Пономарев Р.С., Ветошкин М.А., Москалев Д.Н.	30
РАЗРАБОТКИ ООО «СМАРТС-КВАНТТЕЛЕКОМ» В ОБЛАСТИ КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ Егоров В.И., Наливайко И.П.	31
АПЕРИОДИЧЕСКАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НУЛЕЙ ζ-ФУНКЦИИ РИМАНА Мадисон А.Е., Мадисон П.А., Козодаев Д.А., Казанков А.Н., Мошников В.А.....	32
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ Илюшин П.Я., Шипило Д.Е., Николаева И.А., Панов Н.А., Косарева О.Г.....	33
РАЗРАБОТКА ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА СОЗДАНИЯ ГИДРОФОБНЫХ ГРАДИЕНТОВ СМАЧИВАНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНОГО НАПРАВЛЕННОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ Гришина А.И., Филатов И.А., Щедрина Н.Н., Одинцова Г.В.....	34
ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ФОТОНИКИ.....	35
ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ $(\text{CS}_{1-x}\text{RBx})_4\text{PbVBr}_6$ В БОРОГЕРМАНАТНОМ СТЕКЛЕ Бабкина А.Н., Харисова Р.Д., Зырянова К.С., Кузьменко Н.К.....	36
ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЛАЗМОНОВ С ПЕРЕНОСОМ ЗАРЯДА В КОМПЛЕКСНЫХ СИСТЕМАХ Еремкин Е.В., Фёдоров А.С., Высотин М.А.	37
КРИТИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ РЕАКТИВНОГО ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО НИОБАТА ЛИТИЯ ВО ФТОРСОДЕРЖАЩЕЙ ПЛАЗМЕ Козлов А.А., Москалев Д.Н., Салгаева У.О., Криштоп В.В., Петухов И.В., Волынцев А.Б.	38
НОВЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ СО СЛОЯМИ ОКСИДОВ, АКТИВИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ, ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ В ФОТОНИКЕ Соколов Н.С., Коровин А.М., Кузин Д.С., Куликин А.Б., Смирнов А.Н., Сахаров В.И., Бурковский Р.Г., Наумов С.В., Чернышев В.А., Заморянская М.В.....	39

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ YVO_4, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er^{3+}, Tm^{3+}, Nd^{3+}, ДЛЯ ЗАЩИТНОЙ МАРКИРОВКИ Медведев В.А., Мамонова Д.В., Калинин А.А., Михайлов М.Д., Маньшина А.А., Колесников И.Е.	40
ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КЛАСТЕРОВ СЕРЕБРА В СТЕКЛООБРАЗНЫХ МАТРИЦАХ Миронов Л.Ю., Санникова М.Д., Марасанов Д.В., Слобожанинов А.А.....	41
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СЕНСОРОВ Nd^{3+}, $Yb^{3+}:YF_3$ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ Пудовкин М.С., Олейникова Е.И.....	42
ПРИРОДА ОКРАСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ ЦИНКОВОАЛЮМОСИЛИКАТНЫХ СТЕКЛОКЕРАМИК НА ОСНОВЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ ГАНИТА Дымшиц О.С., Алексеева И.П., Хубецов А.А., Запалова С.С., Центер М.Я., Жилин А.А.....	43
ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ОБЛУЧЕНИЯ НА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОЧАСТИЦ $Ag-AgBr$, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В СТЕКЛЯННОЙ МАТРИЦЕ С ПОМОЩЬЮ ИОННОГО ОБМЕНА Марасанов Д.В., Безруков П.А., Сгибнев Е.М., Никоноров Н.В.....	44
ЭФФЕКТ СО-ЛЕГИРОВАНИЯ ЛАНТАНОИДАМИ НА СТРУКТУРУ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НЕОРГАНИЧЕСКИХ ФТОРИДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ Мерещенко А.С., Бетина А.А., Булатова Т.С., Богачев Н.А.....	45
ВЛИЯНИЕ ИОНОВ НЕОДИМА НА ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОГО СТЕКЛА Нассер Х., Никоноров Н.В., Игнатьев А.И., Миронов Л.Ю.	46
СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ЛЮМИНОФОРОВ $LiY_xGd_{1-x}F_4$ И $LiGdF_4: Eu^{3+}$ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И СЕНСОРИКИ Олейникова Е.И., Пудовкин М.С., Морозов О.А., Кораблева С.А.	47
ЗОЛОТО-ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ Свинко В.О., Соловьева Е.В.....	48
ОПТИЧЕСКИЙ СЕНСОР ВЛАЖНОСТИ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ, ПОКРЫТЫХ ФТОРПОЛИМЕРОМ НАФИОН Сгибнев Е.М., Тананаев П.Н., Шелаев А.В., Янковский Г.М., Барышев А.В.	49
СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТОВ $CsPbX_3$ ($X=Cl, Br, I$) ВО ФТОРОФОСФАТНЫХ СТЕКЛАХ Колобкова Е.В.	50
ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ДИНАМИКА МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ $Bi_2O_3/Yb_2O_3/Nd_2O_3$ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ Артамонов Д.А., Цибульникова А.В., Самусев И.Г., Брюханов В.В., Кожевников А.С.	51
ТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИНАМИКА ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ МАТЕРИАЛАХ Бурцев А.А., Киселев А.В., Невзоров А.А., Ионин В.В., Михалевский В.А., Елисеев Н.Н., Лотин А.А.	52

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ YAG/YSZ КЕРАМИК АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Валиев Д.Т., Степанов С.А., Пайгин В.Д., Двилис Э.С., Хасанов О.Л.....	53
ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ, СТИРАНИЕ И ПЕРЕЗАПИСЬ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ МИКРОСТРУКТУР В СИЛИКАТНОМ СТЕКЛЕ, СОДЕРЖАЩЕМ СУЛЬФИД КАДМИЯ Ветчинников М.П., Липатьев А.С., Шахгильдян Г.Ю., Лотарев С.В., Сигаев В.Н.	54
ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК PbS Гревцева И.Г., Чирков К.С., Асланов С.В., Овчинников О.В., Смирнов М.С....	55
ОПТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ Nd³⁺, Yb³⁺:LiYF₄ Докудовская А.К., Пудовкин М.С., Олейникова Е.И., Кораблева С.Л., Морозов О.А.	56
НЕОБЫЧНЫЕ ВАРИАНТЫ ДИФРАКЦИИ БРЭГГА НА РЕГУЛЯРНОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ В ТАНТАЛАТЕ ЛИТИЯ Дубиков А.В., Савченков Е.Н., Шандаров С.М., Чувакова М.А., Ахматханов А.Р., Шур В.Я.....	57
ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ LiNb_{0.88}Ta_{0.12}O₃ МЕТОДОМ ПРОТОННОГО ОБМЕНА» Сосунов А.В., Петухов И.В., Корнилицын А.Р., Мололкин А.А., Фахртдинов Р.Р.....	58
ГЕКСАФЕРРИТЫ М-ТИПА, ЛЕГИРОВАННЫЕ ИОНАМИ Al³⁺, КАК МАГНИТОТВЕРДЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ, ПРОЯВЛЯЮЩИЕ СУБТЕРАГЕРЦОВЫЙ ЕСТЕСТВЕННЫЙ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС Султановская А.С., Горбачев Е.А., Козлякова Е.С., Алябьева Л.Н., Асмаа Ахмед, Трусов Л.А.	59
ВЛИЯНИЕ СКРЫТЫХ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЕНОК В СПЕКТРЕ СУПЕРСВЕРХТОНКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИМЕСНЫХ ИОНОВ Yb³⁺ В МОНОКРИСТАЛЛЕ Y₂SiO₅ НА ЭФФЕКТ МОДУЛЯЦИИ ОГИБАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОГО СПИНОВОГО ЭХО Соловаров Н.К., Суханов А.А., Тарасов В.Ф., Заварцев Ю.Д., Кутовой С.А.	60
ПРОЗРАЧНЫЕ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ЛИТИЕВОАЛЮМОСИЛИКАТНОЙ СИСТЕМЫ, ДОПИРОВАННЫЕ ИОНАМИ ЖЕЛЕЗА: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА Труханова К.А., Дымшиц О.С., Запалова С.С., Попков В.И., Алексеева И.П. Жилин А.А.	61
ЭПР И ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КРИСТАЛЛА CaMoO₄:Er³⁺ Шакуров Г.С., Зарипов Р.Б., Герасимов К.И., Миннегалиев М.М., Моисеев С.А., Исаев В.А., Лебедев А.В., Аванесов С.А.	62
INTRIGUING ENERGY TRANSFER PHENOMENA IN SCINTILLATING GLASSES: A BREAKTHROUGH Rajaramakrishna R.	63
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ДИФРАКЦИЯ СВЕТОВЫХ ВОЛН С ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ НА ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММАХ В КУБИЧЕСКИХ ГИРОТРОПНЫХ КРИСТАЛЛАХ Шандаров С.М., Буримов Н.И., Злобин А.О., Шмаков С.С., Шмидт А.А., Симонян Р.А., Костеников М.А., Навныко В.Н.	64

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ В ДИФФУЗИОННО ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ LiNbO₃:Cu Анисимов Р.И., Темерева А.С., Колмаков А.А., Шандаров С.М.	65
ОПТИЧЕСКИЕ, РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ И ЛАЗЕРНО-АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА КРИСТАЛЛОВ LiCaAlF₆ Желева Е.Б., Семашко В.В., Шавельев А.А., Шакиров А.А., Низамутдинов А.С., Морозов О.А., Кяшкин В.М., Карабутов А.А., Бродниковский Ю.П.	66
СТРУКТУРЫ С МНОГОУРОВНЕВЫМ УПОРЯДОЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ХИРАЛЬНЫХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ Бакланова К.Д., Долганов В.К., Долганов П.В.	67
МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОМОДОВОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ДЕЛИТЕЛЯ НА ТОНКОПЛЕНОЧНОМ НИОБАТЕ ЛИТИЯ Москалев Д.Н., Козлов А.А., Салгаева У.О., Криштоп В.В., Волынцев А.Б.	68
ФОТОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ГЕНЕРАЦИЯ КОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В АКТИВНОЙ СРЕДЕ LiLu_{0.7}Y_{0.3}F₄:Ce³⁺ Низамутдинов А.С., Макарова Д.А., Сидоров И.Д., Хамдан Я., Шавельев А.А., Кораблева С.Л., Семашко В.В.	69
ВСТРЕЧНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В КРИСТАЛЛАХ ТИТАНАТА ВИСМУТА И СИЛИКАТА ВИСМУТА СРЕЗА (111) Симонян Р.А., Костеников М.А., Шмаков С.С., Шандаров С.М., Буримов Н.И.	70
ЕДИНИЧНЫЕ ЦЕНТРЫ ОКРАСКИ В ШИРОКОЗОННЫХ КРИСТАЛЛАХ Мартынович Е.Ф., Дресвянский В.П.	71
СИНТЕЗ И ПЛАЗМОННАЯ НАСТРОЙКА ЗОЛОТЫХ И ГИБРИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ И РАМАНОВСКИХ МЕТОК С УСИЛЕНИЕМ ПОЛЯ В СУБНАНОМЕТРОВЫХ ЗАЗОРАХ Хлебцов Н.Г., Хлебцов Б.Н., Дыкман Л.А.	72
ПЛАВНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ШАГА СПИРАЛИ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ХОЛЕСТЕРИКА ПРИ ПЛАНАРНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ Абдуллаев А.С., Крахалев М.Н., Зырянов В.Я.	73
ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ ДАММАННА СОЗДАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ФОТООРИЕНТАЦИИ И ТРАВЛЕНИЕМ ИОННЫМ ПУЧКОМ Барма Д.Д.	74
ОСОБЕННОСТИ ЭКСИТОНОПОДОБНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В НЕИДЕАЛЬНОЙ 1D ФОТОННОЙ СТРУКТУРЕ – ЦЕПОЧКЕ МИКРОПОР Безус Ю.А., Румянцев В.В., Федоров С.А.	75
НОВЫЕ ФОТОПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ИНДОЛИНОВЫХ СПИРОПИРАНОВ С ПОГЛОЩЕНИЕМ В БЛИЖНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ Дмитриев В.С., Пугачев А.Д., Козленко А.С., Быкусов В.В., Макарова Н.И., Ростовцева И.А., Ожогин И.В., Лукьянов Б.С.	76
ФОТО- И ЭЛЕКТРОУПРАВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ СВЕТА ХИРАЛЬНЫМ НЕМАТИКОМ С ТАНГЕНЦИАЛЬНО-КОНИЧЕСКИМ СЦЕПЛЕНИЕМ Костиков Д.А., Абдуллаев А.С., Крахалев М.Н., Зырянов В.Я.	77

ФОТОДЕТЕКТОР ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ ТАММОВСКОГО ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНА В СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ ГЕРМАНИЯ Конов Ю.В., Бикбаев Р.Г., Тимофеев И.В.	78
СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНТИНУУМЕ В ТЕЛЕКОМ ДИАПАЗОНЕ: МЕТОД СЛУЧАЙНОГО ЛЕСА Герасимов В.С., Молокеев М.С., Костюков А.С., Ершов А.Е., Максимов Д.Н., Полютов С.П.	79
УМЕНЬШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ МОД НА ГРАНИЦЕ СЕРДЦЕВИНЫ ПОЛЫХ СВЕТОВОДОВ Прямыков А.Д.	80
ПОВЕРХНОСТНЫЕ МОДЫ В ФОТОННОМ ТОПОЛОГИЧЕСКОМ ИЗОЛЯТОРЕ НА ОСНОВЕ МАССИВА ПРИЗМЕННЫХ РЕЗОНАТОРОВ Ким П.Н., Федченко Д.П., Рудакова Н.В., Тимофеев И.В.	81
ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ НЕИДЕАЛЬНЫХ 1D ФОТОННЫХ СТРУКТУР В ОКРЕСТНОСТИ ЧАСТОТЫ ЭКСИТОННОГО ПЕРЕХОДА Рыбалка А.Е, Румянцев В.В., Федоров С.А.	82
СИНХРОНИЗИРОВАННАЯ ФЛЕКСОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ В ЖК-ЯЧЕЙКЕ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЛАНАРНО-ГОМЕОТРОПНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ Гейвандов А.Р., Симдянкин И.В., Уманский Б.А., Палто С.П.	83
ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМОЕ СЕЛЕКТИВНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА ХОЛЕСТЕРИКОМ ПРИ ТАНГЕНЦИАЛЬНО-КОНИЧЕСКИХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ Лесной М.А., Крахалев М.Н., Зырянов В.Я.	84
СВЕРХБЫСТРАЯ ФОТОНИКА И КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИКА	85
МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИ- И ЦИРКУЛЯРНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ВУФ И РЕНТГЕНОВСКИХ ИМПУЛЬСОВ Рябкин М.Ю.	86
ВОЗБУЖДЕНИЕ И ИОНИЗАЦИЯ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ УНИПОЛЯРНЫМИ СУБЦИКЛОВЫМИ ИПУЛЬСАМИ Архипов Р.М., Архипов М.В., Пахомов А.В., Розанов Н.Н.	87
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕСКОЛЬКИХ ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С РЕЗОНАНСНЫМИ СРЕДАМИ Дьячкова О.О., Архипов Р.М., Архипов М.В., Пахомов А.В., Розанов Н.Н.	88
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КВАЗИУНИПОЛЯРНЫХ ТГЦ ИМПУЛЬСОВ В НЕРАВНОВЕСНЫХ ЗАМАГНИЧЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛАХ Богацкая А.В., Волкова Е.А., Попов А.М.	89
НОВЫЙ АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ – РАСЩЕПЛЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА ПРИ СИЛЬНОЙ ПЕРЕМОДУЛЯЦИИ Юшков К.Б., Молчанов В.Я., Даринский А.Н.	90
НЕПАРАКСИАЛЬНЫЕ НАКЛОННЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПУЧКИ И ПАКЕТЫ Плаченев А.Б., Киселев А.П.	91
ФАЗОВО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЗАПИСИ ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ Толстик А.Л., Ивакин Е.В.	92
СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАВЕДЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И ЗАПИСИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕШЕТОК В КРИСТАЛЛЕ СИЛИКАТА ВИСМУТА Даденков И.Г., Толстик А.Л., Миксюк Ю.И., Саечников К.А.	93

АНАЛОГ ЭФФЕКТА ТАЛЬБОТА ДЛЯ ДИФРАКЦИИ НА ВИЛКООБРАЗНЫХ РЕШЕТКАХ Иконников Д.А., Мысливец С.А., Архипкин В.Г., Вьюнышев А.М.	94
КОНФИГУРИРУЕМЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СУПЕРРЕШЁТКИ Дармаев Э.Ч., Иконников Д.А., Мысливец С.А., Архипкин В.Г., Вьюнышев А.М.	95
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ – ТЕРАГЕРЦОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХБЫСТРОЙ ДИНАМИКИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ФОТОПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ Булгакова В.В., <u>Букин В.В.</u> , Гончаров Ю.Г., Ушаков А.А., Зайцев К.И., Бурданова М.Г., Пауков М.И., Красников Д.В., Насибулин А.Г., Гарнов С.В.	96
НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ТРЕХМЕРНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ Вьюнышев А.М., Архипкин В.Г., Чиркин А.С.	97
ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ В МАССИВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВОЛНОВОДОВ Михин А.О., Савельев Р.С., Руцкая В.В., Синев И.С., Горлач М.А.	98
ВОССТАНОВЛЕНИЕ 3D-СЦЕНЫ С ОСЕВОЙ ГОЛОГРАММЫ ПРИ ПОМОЩИ СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОСЕТИ Свистунов А.С., Рымов Д.А., Козлов А.В., Стариков Р.С., Черёмхин П.А.	99
ВЛИЯНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ, ВОССТАНАВЛИВАЕМОГО ТЕХНИКОЙ МУЛЬТИПЛЕКСНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ФАНТОМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ Исмагилов А.О., Лаппо-Данилевская А.К., Цыпкин А.Н.	100
ВОЛНОВОДНЫЙ Tm^{3+}:YAP ЛАЗЕР С ГИГАГЕРЦОВОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ Понарина М.В., Охримчук А.Г., Рыбин М.Г., <u>Букин В.В.</u> , Образцов П.А.	101
СОЛИТОННЫЕ РЕЖИМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОДНООСНЫХ КРИСТАЛЛАХ Сазонов С.В.	102
РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА ОТ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА Оладышкин И.В., Фадеев Д.А.	103
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ТРЁХКРАТНОЕ ПОНИЖЕНИЕ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КВАДРАТИЧНОЙ СРЕДЕ ЗА СЧЁТ КАСКАДНЫХ ПРОЦЕССОВ Trofimov V.A., Харитонов Д.М., Федотов М.В.	104
СВЕРХИЗЛУЧЕНИЕ И РЕЗОНАНСЫ ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЫ В ПРИСУТСТВИИ ПОПРАВКИ ЛОКАЛЬНОГО ПОЛЯ ЛОРЕНТЦ-ЛОРЕНЦА Рыжов И.В.	105
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ГАЗОНАПОЛНЕННОМ ВОЛОКНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАНТОВОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПИСАНИЮ НЕЛИНЕЙНОСТИ Врублевская Н.Р., Шипило Д.Е., Николаева И.А., Панов Н.А, Косарева О.Г.	106

КОМПАКТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЕНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОДОБОТНОГО МИКРОРЕЗОНАТОРА Ружицкая Д.Д., Миньков К.Н., Павлов В.И.....	107
ПОЛЯРИТОННЫЕ МОДЫ СВЕРХИЗЛУЧАЮЩЕГО ЛАЗЕРА В ЗАПРЕЩЕННОЙ ФОТОННОЙ ЗОНЕ КОМБИНИРОВАННОГО РЕЗОНАТОРА ФАБРИ-ПЕРО С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ВОЛН Кочаровский В.В., Мишин А.В., Кочаровская Е.Р.	108
ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН НА АСИММЕТРИЧНУЮ СВЕРХИЗЛУЧАТЕЛЬНУЮ ГЕНЕРАЦИЮ В СИММЕТРИЧНОМ РЕЗОНАТОРЕ ФАБРИ-ПЕРО Кочаровская Е.Р., Кочаровский В.В.....	109
УСИЛЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ ГАРМОНИК В ОПТИЧЕСКИ МОДУЛИРОВАННОЙ НЕОНОПОДОБНОЙ АКТИВНОЙ СРЕДЕ ПЛАЗМЕННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ЛАЗЕРА Антонов В.А., Хайрулин И.Р., Рябикин М.Ю.	110
ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ Дресвянский В.П., Мартынович Е.Ф.	111
БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ФОТОДИОДЫ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ИНДИЯ Пивоварова А.А., Куницына Е.В., Коновалов Г.Г., Слипченко С.О., Подоскин А.А., Андреев И.А., Пихтин Н.А., Ильинская Н.Д., Яковлев Ю.П.....	112
НОВЫЕ ЗАКОНЫ ДИФФУЗНОГО РАССЕЯНИЯ ВОЛНЫ РЭЛЕЯ И НАРУШЕНИЕ ЗАКОНА ЛАУЭ-БРЭГГА-ВУЛЬФА Чуков В.Н.	113
ESTIMATION OF PLASMA PROPERTIES IN LIQUID JETS VIA REFLECTION DYNAMICS Hilal S., Ismagilov A.O., Tsyupkin A.N., Melnik M.V.....	114
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ПУТЕМ РАЗЛОЖЕНИЯ ПО ТЕПЛОВЫМ МОДАМ Павлов В.И., Кондратьев Н.М., Шитиков А.Е., Лобанов В.Е.	115
ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ РЕШЕТОК В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОГО МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЯ В ОБЪЕМЕ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ Богацкая А.В., Попов А.М., Гулина Ю.С., Гриценко И.В., Рупасов А.Е.....	116
ФИЗИКА НАНОСТРУКТУР	117
ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ДВУХУРОВНЕВОЙ ДИССИПАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НАЛИЧИИ ОСЦИЛЛЯЦИЙ РАБИ Иванов А.В.....	118
ОПТИЧЕСКИЕ МОДЫ В НАНОТРУБКАХ НА ОСНОВЕ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ Казанов Д.Р., Пошакинский А.В., Шубина Т.В.	119
СИНТЕЗ, СТРУКТУРНЫЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА CVD АЛМАЗНЫХ НАНОЧАСТИЦ С ЦЕНТРАМИ ОКРАСКИ Грудинкин С.А., Богданов К.В., Баранов М.А., Голубев В.Г., Баранов А.В.....	120

ПЛАЗМОННО-НЕУПОРЯДОЧЕННЫЙ МАССИВ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ Ag НА SiO₂/C-Si ДЛЯ ГКР ПРИЛОЖЕНИЙ Ермина А.А., Солодовченко Н.С., Левицкий В.С., Пригода К.В., Бельская Н.А., Павлов С.И., Большаков В.О., Толмачев В.А., Жарова Ю.А.	121
СОВМЕЩЕННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ И АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ Магарян К.А., Аржанов А.И., Степанов М.Е., Наумов А.В.	122
УНИПОЛЯРНЫЕ БАРЬЕРНЫЕ nVn СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ HgCdTe: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ Войцеховский А.В., Дзядух С.М., Горн Д.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Средин В.Г.	123
ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК GaAs/AlGaAs Башегурова Е.А., Дерибина Е.И., Капитонов Ю.В.	124
2D ЭКСИТОНЫ В АТОМАРНО-ТОНКИХ ОРГАНО-НЕОРГАНИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУРАХ АПVI С ЭНАНТИОМЕРНЫМИ ЛИГАНДАМИ Куртина Д.А., Графова В.П., Лебедев А.И., Васильев Р.Б.	125
ЭПИТАКСИЯ НЕНАПРЯЖЕННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК GaAs/AlGaAs И ИХ ОПТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ Дерибина Е.И., Капитонов Ю.В. ...	126
ОДНОРОДНОЕ И НЕОДНОРОДНОЕ УШИРЕНИЕ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe/CdS/ZnS: ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ Аржанов А.И., Иноземцева А.В., Каримуллин К.Р., Наумов А.В.	127
ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СЛОЁВ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА ИЗ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ Пятнов М.В., Соколов М.М., Киселев И.А., Панкин П.С., Волкова И.Р., Волочаев М.Н., Бикбаев Р.Г., Рыжков И.И., Ветров С.Я., Тимофеев И.В., Шабанов В.Ф.	128
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК Cd_{0.3}Hg_{0.7}Te, ЛЕГИРОВАННЫХ МЫШЬЯКОМ Ружевич М.С., Фирсов Д.Д., Комков О.С., Мынбаев К.Д., Варавин В.С., Марин Д.В., Якушев М.В.	129
ЛАЗЕРНАЯ МИКРОСКОПИЯ ОБЕСЦВЕЧИВАНИЯ И ДИФФУЗИИ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ Бородина Л.Н., Орлова А.О., Вениаминов А.В.	130
ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ХЕМОРЕЗИСТИВНЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА НА ЛЕТУЧИЕ МАРКЕРЫ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ Парфенов П.С., Болтенко А.В., Клименко Д.И., Маслов В.Г., Орлова А.О.	131
ЛАЗЕРНАЯ И СИЛОВАЯ ОПТИКА	132
КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СКАНИРУЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ Юревич В.И.	133
CR:LISAF-ЛАЗЕР С ЛАМПОВОЙ НАКАЧКОЙ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ Сергеев А.А., Суханов Г.А., Низамутдинов А.С., Погода А.П.	134

ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЙ НАГРЕВ КРЕМНИЕВОГО ЗОНДА С КОНТРОЛЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ Избасарова Э.А., Харинцев С.С.	135
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАЗЛЕТА МИШЕНИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА Ракитина М.А., Брантов А.В., Глазырин С.И.....	136
SCATTERING AMPLITUDE OF SURFACE PLASMON POLARITONS EXCITED BY INHOMOGENEITIES OF THE SURFACE OF A PLASMONIC MATERIAL Dyshlyuk A.V., Proskurin A.A., Bogdanov A.A., Vitrik O.V.....	137
ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ, КОМПОЗИТНЫХ НАНОСТРУКТУР И ФАЗОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Маньшина А.А.	138
ЛАЗЕРНЫЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ НАНОФОТОННЫХ ЗАЩИТНЫХ МЕТОК Кустов П.Н., Петрова Е.А., Понкратова Е.Ю., Сандомирский М.П., Ларин А.О., Агеев Э.И., Зуев Д.А.	139
СОЗДАНИЕ ДВУМЕРНЫХ РЕЛЬЕФОВ С УПРАВЛЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР Синев Д.А., Ибрахим К., Суворов А.Р., Мухсинова Р.М., Москвин М.К., Андреева Я.М.	140
ЛАЗЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СТЕКОЛ: НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ Вейко В.П., Сергеев М.М., Заколдаев Р.А., Одинцова Г.В.....	141
ОПТИЧЕСКАЯ МЕТРОЛОГИЯ	142
МОДЕЛЬ ОПТОВОЛОКОННОГО СЕНСОРА СИЛЫ ТОКА НА ОСНОВЕ ГЕРМАНИЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА Янукович Т.П., Исмаилова А.С.....	143
РЕЗОНАТОРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ – СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ Венедиктов В.Ю., Филатов Ю.В., Шалымов Е.В.	144
ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОТКЛОНЕНИЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПЗС КАМЕРЫ Кирсанов А.В., Кузьмин И.В., Мухин И.Б., Чернов В.В.	145
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ СЕНСОРЫ НА БАЗЕ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СТЕКОЛ Марисова М.П., Андрианов А.В., Анашкина Е.А.	146
ВЫСОКОКОНТРАСТНЫЕ СУБДОПЛЕРОВСКИЕ РЕЗОНАНСЫ В ПАРАХ АТОМОВ ЦЕЗИЯ В ПОЛЕ ВСТРЕЧНЫХ БИХРОМАТИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ Михайлов А.М., Бражников Д.В.....	147
БЕСКОНТАКТНЫЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК ВИБРАЦИИ НА ОСНОВЕ АВТОДИННОГО ЭФФЕКТА В ЛАЗЕРНОМ ДИОДЕ Рыбалтовский А.В., Ковалев А.В., Даниленко Г.О.....	148
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В ФАНТОМНОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ Агапов Д.П., Ивченко А.В., Магницкий С.А.	149

БИОФОТОНИКА.....	150
МУЛЬТИФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ ЧАСТИЦЫ В СОЧЕТАНИИ С МЕТОДАМИ ФОТОНИКИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ Горин Д.А.....	151
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИИ КЛЕТОК НА ЛОКАЛИЗОВАННОЕ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ Белашов А.В., Жихорева А.А., Буторин П.Н., Беляева Т.Н., Салова А.В., Литвинов И.К., Корнилова Е.С., Семенова И.В., Васютинский О.С.	152
ГЕНЕТИЧЕСКИ КОДИРОВАННЫЕ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕТКИ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭНХАНСЕРОВ В ЖИВЫХ КЛЕТКАХ ПРИ ПОМОЩИ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ МИКРОСКОПИИ Беседовская З.В., Путляева Л.В., Лукьянов К.А.	153
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВЫРАЩИВАНИЯ ЯЧМЕНЯ НА ЕГО СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Буханов Е.Р., Величко В.В., Липшин А.Г., Шихов В.Н., Суринов Н.А.....	154
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КРОВОПОТЕРИ НА ПЕРФУЗИЮ ГОЛОВНОГО МОЗГА У КРЫС МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТЛ-КОНТРАСТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ Голубова Н.В., Рыжков И.А., Лапин К.Н., Серёгина Е.С., Дунаев А.В., Дрёмин В.В., Потапова Е.В.	155
ИЗУЧЕНИЕ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА ПО ИХ ЛИНЕЙНЫМ И НЕЛИНЕЙНЫМ УПРУГИМ СВОЙСТВАМ МЕТОДОМ КОМПРЕССИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ЭЛАСТОГРАФИИ Губарькова Е.В., Киселева Е.Б., Советский А.А., Плеханов А.А., Воронцов Д.А., Рябков М.Г., Багрянцев М.В., Бедерина Е.Л., Богомолова А.Ю., Сироткина М.А., Гладкова Н.Д., Зайцев В.Ю.	156
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЖИ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОСКОПИИ ДИФФУЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ Давыдов Д.А., Фадеев Н.А., Баев А.В., Будылин Г.С., Ширшин Е.А.	157
МОНИТОРИНГ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО-ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ СНА С ПОМОЩЬЮ ПОРТАТИВНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ Локтионова Ю.И., Сидоров В.В., Паршакова В.Е., Жарких Е.В., Дунаев А.В.	158
МЕТОД РАЗРЕШЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ КРИВЫХ КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА РАМАНОВСКИХ СПЕКТРОВ Матвеева И.А.	159
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ СВЕТА В ТКАНИ ДЕНТИНА МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЯ Никонова Е.Э., Будылин Г.С., Давыдов Д.А., Туркина А.Ю., Кочмарева А.С., Ширшин Е.А.....	160
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ДЕЙТЕРИРОВАННЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРЕИМПЛАНТАЦИОННЫХ ЭМБРИОНАХ МЫШИ МЕТОДОМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА Омельченко А.Н., Окотруб К.А., Игонина Т.Н., Брусенцев Е.Ю., Амтиславский С.Я., Суровцев Н.В.	161

ОЦЕНКА СВОЙСТВ ХРЯЩЕВОЙ ТКАНИ ПО СПЕКТРАМ ДИФFUЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ Ровнягина Н.Р., Будылин Г.С., Давыдов Д.А., Ширшин Е.А.....	162
МУЛЬТИВОЛНОВАЯ МОРА ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ Cr:LiCaAlF₆ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ОПТОАКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ Аглямов Р.Д., Наумов А.К., Шавельев А.А., Морозов О.А., Низамутдинов А.С., Шишкин А.Д., Бродниковский Ю.П., Карабутов А.А., Ораевский А.А., Семашко В.В.....	163
ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ В ДИАГНОСТИКЕ АТРОФИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭПИТЕЛИЯ ВЛАГАЛИЩА Логинова М.М., Сиротина Л.З., Губарькова Е.В., Потапов А.Л., Шкалова Л.В., Гладкова Н.Д., Мотовилова Т.М., Сироткина М.А.	164
ОПТИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КОЖИ И СЛИЗИСТОЙ ОБОЛОЧКИ В НОРМЕ, ПРИ ПАТОЛОГИИ И В ОТВЕТ НА ЛЕЧЕНИЕ Сироткина М.А., Киселева Е.Б., Потапов А.Л., Моисеев А.А., Седова Е.С., Гамаюнов С.В., Раденска-Лоповок С.Г., Гладкова Н.Д.....	165
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОГО ПРОСВЕТЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ: ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ И ТЕРАПИИ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ Тучин В.В.	166
РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРОВ ЭКСТИНКЦИИ ЧЕЛОВЕЧЕСКИХ ВОЛОС РАЗЛИЧНЫХ ЦВЕТОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ОКРАШИВАНИЯ Ермолаев В.М., Федорова Ю.В., Беликов А.В.	167
АГРЕГАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭРИТРОЦИТОВ: ИЗМЕРЕНИЯ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ IN VITRO Ермолинский П.Б., Максимов М.К., Луговцов А.Е., Приезжев А.В.	168
ДИНАМИКА АБСОРБЦИОННО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ФЛАВОНОИДОВ КАЛИНЫ КРАСНОЙ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИННЫХ ВОЛН Землякова Е.С., Цибулькинова А.В., Самусев И.Г., Зюбин А.Ю., Слежкин В.А.....	169
ИНТРАОПЕРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА РАКА МОЧЕВОГО ПУЗЫРЯ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТОВОЛОКОННОГО ЗОНДА Злобина Н.В., Будылин Г.С., Церегородцева П.С., Камалов Д.М., Сорокин Н.И., Ширшин Е.А., Камалов А.А.	170
АНАЛИЗ СОСТАВА СПЕКТРОВ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПЕЧЕНИ ПАЦИЕНТОВ С СИНДРОМОМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЖЕЛТУХИ Кандурова К.Ю., Сумин Д.С., Мамошин А.В., Потапова Е.В.	171
КОРРЕЛЯЦИЯ РЕАКЦИЙ МИКРОСОСУДОВ КОЖИ И ПАРАМЕТРОВ КЛИНИЧЕСКОГО И ЛАБОРАТОРНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ У ПАЦИЕНТОВ С СД 2 ТИПА Красулина К.А., Глазкова П.А., Глазков А.А., Ковалева Ю.А., Рогаткин Д.А.....	172

О ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОКОНЪЮГАТОВ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ В НЕГРЕЮЩИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ Сёмина П.Н., Исаев И.Л., Ключанцев А.Б., Костюков А.С., Хренников Д.Е., Замай А.С., Полотов С.П., Карпов С.В.....	173
ХЕМОСЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА ФЛУОРЕСЦЕИНА, ОСНОВАННЫЕ НА МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОМ ПЕРЕНОСЕ ПРОТОНА Слюсарева Е.А., Суржикова Д.П.....	174
ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РАТИОМЕТРИЧЕСКОГО ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО СИГНАЛА ФЛУОРЕСЦЕИНА Суржикова Д.П., Слюсарева Е.А.	175
КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФАНТОМНОГО ВОЛОКОННОГО ЭНДОСКОПА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ Фроловцев Д.Н., Ивченко А.В., Магницкий С.А.	176
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УВ-СОДЕРЖАЩИХ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ДЕЙСТВИЯ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ НА НОВООБРАЗОВАНИЯ (ЭКСПЕРИМЕНТЫ <i>IN-VIVO</i>) Хрущалина С.А., Юрлов И.А., Рябочкина П.А, Куликов О.А., Шляпкина В.И., Агеев В.П.	177
ФОТОПРОЦЕССЫ В КОМПЛЕКСАХ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ ФЛАВОНОИДОВ КАЛИНЫ С УЧАСТИЕМ МОЛЕКУЛ КИСЛОРОДА И НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА Цибульников А.В., Землякова Е.С., Артамонов Д.А., Самусев И.Г., Брюханов В.В., Зюбин А.Ю.	178
ПРИМЕНЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ АДЕНОКАРЦИНОМЫ И ПАРЕНХИМЫ ПЕЧЕНИ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ПРИ ПУНКЦИОННОЙ БИОПСИИ Шуплецов В.В., Потапова Е.В., Жеребцов Е.А., Дрёмин В.В., Кандурова К.Ю., Сумин Д.С., Мамошин А.В., Дунаев А.В.....	179
КВАНТОВАЯ ОПТИКА И КОММУНИКАЦИИ	180
УЯЗВИМОСТЬ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ С ФАЗОВО-ВРЕМЕННЫМ КОДИРОВАНИЕМ В УСЛОВИЯХ ЗАТУХАНИЯ Кронберг Д.А.....	181
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ В АТМОСФЕРЕ Ерохин К.Ю., Казанцев С.Ю., Казиева Т.В., Пчелкина Н.В.....	182
ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОФОТОННЫХ ЛАВИННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ОТ -40 °С ДО -15 °С Борисова А.В., Степанов К.В., Втюрина А.Г.....	183
ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НА КРК В ПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ Болотов Д.В., Белова О.С., Бушуев Э.Ю., Грычкин С.Е., Казанцев С.Ю., Колесников О.В., Строганова Е.П.	184
ТЕРМИНАЛ ЛАЗЕРНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ ГРУППИРОВКИ Акбулатов Р.Р., Воеводин Д.Д., Гавриленко М.И., Гусаков А.В., Ройз И.М., Кузнецов С.Н., Керносов М.Ю., Лозов Р.К., Огурцов Н.А., Приходько К.И., Румянцев А.А., Соколова М.А., Сунгатуллин Р.Р., Широбакин С.Е.....	185

УЯЗВИМОСТИ СИСТЕМ КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН Наседкин Б.А., Исмагилов А.О., Чистяков В.В., Гайдаш А.А., Литвин А.П., Цыпкин А.Н., Козубов А.В., Егоров В.И.....	186
АБСОЛЮТНАЯ ГРАНИЦА УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ АТАКЕ «ТРОЯН HORSE» НА СИСТЕМЫ КРК Сущев И.С., Богданов С.А., Булавкин Д.С., Бугай К.Е., Сидельникова А.С., Дворецкий Д.А.	187
ВЛИЯНИЕ ДВУХУРОВНЕВОГО АТОМА НА ДИНАМИКУ ПОЛЯ ВНУТРИ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА Попов Е.Н., Трифанов А.И.	188
ЗАКОНЫ ДИСПЕРСИИ ПОЛЯРИТОННОГО ТИПА ДЛЯ ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВЫХ АТОМОВ С НЕЭКВИДИСТАНТНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ ПРИ УЧЕТЕ МНОГОФОТОННЫХ ПЕРЕХОДОВ Коровой О.В., Надькин Л.Ю., Марков Д.А.....	189
УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТАМИ ФОТОНОВ, ИЗЛУЧАЕМЫХ ОДИНОЧНОЙ КВАНТОВОЙ ТОЧКОЙ В ОДНОМЕРНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ Гарифуллин А.И., Гайнутдинов Р.Х., Хамадеев М.А.	190
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ Кузнецов К.А., Фролов А.Д., Коновалов А.М., Ковалева П.М., Китаева Г.Х.	191
ОБ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДАХ В РАВНОВЕСНОЙ КВАНТОВОЙ СИСТЕМЕ Невдах В.В.	192
МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ КРАЕВЫХ ВОЛН В НЕЛИНЕЙНЫХ ФОТОННЫХ РЕШЁТКАХ Смолина Е.О., Смирнов Л.А., Смирнова Д.А.	193
ДИССИПАТИВНАЯ ДИНАМИКА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОМОДОВОГО СВЕТА ПРИ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ Матвеева М.В., Табиева А.В., Тушавин Г.В., Трифанов А.И.	194
АРТФОТОНИКА.....	195
КОМБИНИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ОЧИСТКИ СЛОЖНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБЪЕКТОВ ЖИВОПИСИ Васильева А.В., Карева А.К., Кафарова О.Б., Старостина И.В., Парфенов В.А.	196
ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНЕВЕКОВЫХ СЕРЕБРЯНЫХ МОНЕТ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ Леонидова А.А., Прокуратов Д.С., Асеев В.А., Горлов К.В.....	197
ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД СОЗДАНИЯ ПОЛНОЦВЕТНЫХ РИСУНКОВ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ: ОТ ЦВЕТНОЙ МАРКИРОВКИ ДО “РУКОТВОРНОЙ” ЖИВОПИСИ Вейко В.П., Морозова А.А., Наволоцкая К.С., Одинцова Г.В.....	198
АНАЛОГО-ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ В ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОЙ ГОЛОГРАФИИ Петров Н.В., Рабош Е.В.....	199
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАБОТЫ С ПЛОТНЫМИ ВОКСЕЛЬНЫМИ ДАННЫМИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЖИВОПИСИ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ Пинаев З.А., Волынский М.А.....	200
ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗУРИТА МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ФУРЬЕ СПЕКТРОСКОПИИ Андреев И.И., Сирро С.В., Асеев В.А.....	201

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	202
ИНДУСТРИАЛЬНАЯ ФОТОНИКА (ИНЖЕНЕРНАЯ СЕКЦИЯ)	202
ПЕРЧАТКА-КОНТРОЛЛЕР С ДАТЧИКОМ ИЗГИБА НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА Зарипов А.Э., Завалишина Л.Д., Лиокумович Л.Б., Ушаков Н.А., Маркварт А.А.....	203
НЕЙРОМОРФНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, ОСНОВАННАЯ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МЕТАЛЛАХ ОКСИДОВ Иванов Ф.Л., Чежегов А.А., Красников В.В., Балашов И.И., Чижов А.С., Грунин А.А., Федянин А.А.	204
СДВИГИ ЧАСТОТЫ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В КВАНТОВЫХ МАГНИТОМЕТРАХ НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ АТОМОВ Картошкин В.А.....	205
СВЕРХБЫСТРАЯ ФОТОНИКА И КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИКА	206
БИСТАБИЛЬНОСТЬ НЕЛИНЕЙНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ Бабенко А.Д., Гендрина А.А., Козлов С.А.	207
ЧИСЛЕННЫЕ СХЕМЫ С РАСЩЕПЛЕНИЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ГИНЗБУРГА-ЛАНДАУ Васева И.А., Медведев С.Б., Штырина О.В., Федорук М.П.	208
ПОСТОЯННЫЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИ ИЗГИБЕ СТУПЕНЧАТОГО МНОГОМОДОВОГО СВЕТОВОДА Завалишина Л.Д., Зарипов А.Э., Лиокумович Л.Б., Ушаков Н.А., Маркварт А.А.	209
О ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ Казаков И.И., Гусельников М.С., Козлов С.А.	210
ОДНОПИКСЕЛЬНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ ТРЁХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С РАЗРЕШЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ Лаппо-Данилевская А.К., Исмагилов А.О., Черных А.В., Цыпкин А.Н.....	211
ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ВИХРЕЙ Пантелеева Е.П., Кабанова О.С., Мельникова Е.А.	212
МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД НИЗКОПороГОВОЙ БИСТАБИЛЬНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОПУСКАНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО Терещенко Г.Р., Шипов М.Д., Козлов С.А.....	213
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СВЕТОВЫХ ПУЛЬ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ДИЭЛЕКТРИКЕ Бугай А.Н., Халяпин В.А.....	214
ДИНАМИКА ИМПУЛЬСОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ С ДИСПЕРСИЕЙ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА Цой Э.Н., Суюнов Л.А.	215
НОВЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ОГИБАЮЩЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ЗАХАРОВА-ШАБАТА Медведев С.Б., Чеховской И.С., Качулин Д.И., Васева И.А., Федорук М.П.	216

АНАЛИЗ ЗАЩИЩЕННОСТИ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ФАНТОМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И МЕТОДА МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ Мочалов М.А., Старцева А.М., Шумигай В.С., Опарин Е.Н., Исмагилов А.О., Цыпкин А.Н.....	217
КЛАССИЧЕСКАЯ ФАНТОМНАЯ ПОЛИМЕТРИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ МОДУЛЯТОРОМ СВЕТА Морева П.Е., Шумигай В.С., Альхалил Д., Наседкин Б.А., Цыпкин А.Н.....	218
ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ P-I-N-ДИОДАХ $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ Фань С., Малевич В.Л., Мустафин И.А., Калиновский В.С., Контрош Е.В., Прудченко К.К., Толкачев И.А., Трухин В.Н.	219
НАРУШЕНИЕ ПРИНЦИПА ВЗАИМНОСТИ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ СРЕДАХ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО НАГРЕВА Левковская В.М., Харитонов А.В., Харинцев С.С.....	220
КВАНТОВАЯ ОПТИКА И КОММУНИКАЦИИ	221
ИНТЕГРАЦИЯ ПРОТОКОЛОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КВАНТОВЫХ КЛЮЧЕЙ, НЕ ЗАВИСЯЩИХ ОТ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ, В ИНФРАСТРУКТУРУ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ Воронцова И.О., Гончаров Р.К., Тупяков Д.В., Киселев Ф.Д.	222
КОНТРОЛЬ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО АМПЛИТУДНОГО МОДУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА НА НЕПРЕРЫВНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ Геллерт М.Е., Наседкин Б.А., Филипов И.М., Чистяков В.В., Самсонов Э.О.	223
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К РАЗРАБОТКЕ И ПРИМЕНЕНИЮ КВАНТОВОГО ПОВТОРИТЕЛЯ В КОНТЕКСТЕ ПОСТРОЕНИЯ КВАНТОВОЙ СЕТИ Гончаров Р.К., Воронцова И.О. Тупяков Д.В., Киселев А.Д.....	224
СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЙ - ЛОВУШЕК В ПРОТОКОЛАХ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ НА ОСНОВЕ МОДУЛЯЦИИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА Алфёров С.В., Демкин К.В., Сущев И.С.	225
СИНХРОНИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА Жуковский Д.Д., Миронов Ю.Б., Тимошенко А.С.....	226
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУОПРЕДЕЛЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ Иванков Н.А., Зиновьев А.В., Гончаров Р.К.	227
ОБЗОР ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ КРК И ИХ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ Казиева Т.В., Трофимов Н.С., Казанцев С.Ю., Зайцев А.И., Шаховой Р.А., Волков А.А.	228
ФОТОННАЯ СТАТИСТИКА НЕКЛАССИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ СВЕТА В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ Каргина Д.А., Киселев А.Д.	229

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ РЕАЛИЗАЦИИ КВАНТОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ Лытаев А.А., Попов И.Ю.	230
ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ КВАНТОВЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ Малышев Д.М., Аверченко В.А., Тихонов К.С.	231
КУМУЛЯНТНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ ЛЕСТНИЦЫ ДИКЕ Потапов Д.А., Тихонов К.С.	232
ГЕТЕРОДИННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ДЛЯ СИСТЕМЫ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА НА БОКОВЫХ ЧАСТОТАХ С ДВУМЯ НЕЗАВИСИМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ Фадеев М.А., Гончаров Р.К., Михайлов В.Ю., Кынев С.М., Чистяков В.В.	233
ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭВОЛЮЦИОННЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОГИБАЮЩИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ РЕШЁТКАХ Федотовских Е.А., Смолина Е.О., Смирнов Л.А.	234
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА ДЛЯ ШИФРОВАНИЯ В ВОЛНЕ ХАОСА Чуйко В.А., Янукович Т.П., Агейко С.А.	235
МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА ПО ПРОТОКОЛУ ВВ84 МЕЖДУ ДРОНАМИ Каширский Д.Е., Якименко Ф.А.	236
КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ Зотова А.М., Казанцев С.Ю., Пчелкина Н.В., Трифонов А.А.	237
РЕЗОНАНСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ В СЕГМЕНТИРОВАННЫХ СПИРАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДАХ Лихов В.В., Васильев С.А., Алагашев Г.К., Охримчук А.Г.	238
ЛАЗЕРНАЯ И СИЛОВАЯ ОПТИКА	239
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОКАТАЛИЗА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ОКСИДНЫХ ПЛЁНОК С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ Афанасьев Н.А., Шелеманов А.А., Евстропьев С.К., Карлагина Ю.Ю., Одинцова Г.В.	240
ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО МЕТОДА ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ Егорова К.А., Розанов К.А., Сидорова А.Д., Горенский Ф.А., Синев Д.А.	241
ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ Бондаренко А.Г., Палехова А.В., Алексан Г.В., Дададжанов Д.Р., Заколдаев Р.А., Одинцова Г.В.	242
СОЗДАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ СТРУКТУР НА МАССИВНОМ ТИТАНЕ Рудь Д.А., Синев Д.А., Понкратова Е.Ю., Зуев Д.А.	243

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТОВ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЫ Топоровский В.В., Кудряшов А.В., Самаркин В.В., Галактионов И.В.....	244
ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ СУММАРНОЙ ЧАСТОТЫ ШИРОКОПОЛОСНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ С ОППОЗИТНЫМИ ЧАСТОТНЫМИ ЧИРПАМИ Кузьмин И.В., Миронов С.Ю., Мартьянов М.А.....	245
ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ФОТОНИКИ.....	246
ПЛАЗМОННЫЕ САМОКОМПЛЕМЕНТАРНЫЕ НАНОАНТЕННЫ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО СОГЛАСОВАНИЯ ИМПЕДАНСА В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ Асадулина С.М., Инти Л. Руис, Хуан Д. Баэна.....	247
ЭЛЕКТРОННЫЕ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСНЫХ СТРУКТУР MOF-76 НА ОСНОВЕ ЛАНТАНОИДОВ Бардакова А.В., Борисик А.К., Баряхоева К.А., Рудакова А.В., Буланин К.М., Емелин А.В.....	248
ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ИОНОВ РЗЭ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕРЕФТАЛАТОВ Богачев Н.А., Тойка Ю.Н., Буторлин О.С., Петрова А.С., Мерещенко А.С.	249
НАНОЛЮМИНОФОРЫ YAG:Ce,Gd ДЛЯ СОЗДАНИЯ БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ ПОЛИМЕРНО-СОЛЕВЫМ МЕТОДОМ Булыга Д.В., Евстропьев С.К., Гаврилова Д.А., Мягких М.К.....	250
ВЛИЯНИЕ EDTA НА РОСТ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА KDP Вильченко С.А., Грибко В.В.	251
ВЛИЯНИЕ ФОТОСТИМУЛИРОВАННОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ ИОНОВ ЭРБИЯ В ОКСИДНЫХ И ФТОРИДНЫХ МАТРИЦАХ Жаровов Д.А., Шурухина А.В., Рудакова А.В., Емелин А.В., Рябчук В.К.	252
УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ И ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ДИФРАКЦИОННЫМИ ЖК ЭЛЕМЕНТАМИ Комяк К.Г., Кабанова О.С., Мельникова Е.А., Рушнова И.И., Толстик А.Л.....	253
НАНОСТЕРЖНИ III-N МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИКРОСВЕТОДИОДОВ: СИНТЕЗ И СВОЙСТВА Котляр К.П., Гридчин В.О., Сошников И.П., Цырлин Г.Э.	254
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЁНОК В МИКРОРЕЗОНАТОРАХ ИЗ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА ЛЕГИРОВАННЫХ ПЛАЗМОННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ CuS Лунёв А.Ю, Михарев Е.А., Сидоров А.И.....	255
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ БЕНЗТИАЗОЛИЛБРОМФЕНОЛА В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ Парфёнова Е.В., Слюсаренко Н.В., Шабанова О.В., Слюсарева Е.А.	256
СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ КРИСТАЛЛА NOAL₃(VO₃)₄ В ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДОВ ⁵I₈ → ⁵F₃ И ⁵F₂ Соколов В.В., Малаховский А.В., Сухачёв А.Л., Гудим И.А.....	257

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗЕРКАЛАХ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316L(N)-IG СИСТЕМЫ СБОРА ИЗЛУЧЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ТР/ЛИФ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР Терещенко И.Б., Самсонов Д.С., Мухин Е.Е., Коваль А.Н., Николаенко К.О., Толстяков С.Ю., Богачев Д.Л., Солк С.В., Патрикеев В.Е., Худолей А.Л., Кумейша П.Н., Марчий Г.В., Григорьева О.А.....	258
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДА БОРА НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СТЕКЛОКЕРАМИК, АКТИВИРОВАННЫХ ХРОМОМ Шеремет В.Г., Бабкина А.Н.....	259
АП-КОНВЕРСИЯ ВО ФТОРИДНЫХ МАТРИЦАХ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ С ЛАНТАНОИДАМИ Er/Yb Шурухина А.В., Жаровов Д.А, Баринов Д.С, Рудакова А.В., Рябчук В.К., Емелин А.В.	260
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТОПЛАЗМОННОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ФОТОННОГО МАТЕРИАЛА Валитова А.Ф., Газизов А.Р., Салахов М.Х.	261
УПРАВЛЕНИЕ ПОВЕДЕНИЕМ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ СТРУКТУР В СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ХИРАЛЬНЫХ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ Пивень А.О., Дармороз Д.Д., Орлова Т.....	262
ИССЛЕДОВАНИЕ АДСОРБЦИОННЫХ И ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦИНКОВОЙ ШПИНЕЛИ ZnO:ZrO₂:Mn Портнова К.А., Шелеманов А.А., Евстропьев С.К.	263
ДЕФОРМИРОВАННАЯ ЛЕЖАЧАЯ СПИРАЛЬ В СЛОЕ ХОЛЕСТЕРИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА И УСЛОВИЯ ЕЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ Симдянкин И.В., Гейвандов А.Р., Барма Д.Д., Штыков Н.М., Палто С.П.	264
ВЛИЯНИЕ ЙОДИДА КАЛИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК PbS, ПОКРЫТЫХ МОЛЕКУЛАМИ ТИОГЛИКОЛЕВОЙ КИСЛОТЫ Гревцева И.Г., Чирков К.С., Овчинников О.В., Смирнов М.С.....	265
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ БИНАРНЫХ АССОЦИАТОВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag₂S И PbS Овчинников О.В., Смирнов М.С., Гревцева И.Г., Возгорькова Е.А., Чирков К.С., Татьяна Е.П., Смейлова А.И.	266
БИОФОТОНИКА.....	267
ВЛИЯНИЕ Е-ЖИДКОСТИ (ВЕЙПОВ) НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЯИЧНИКОВ Селифонов А.А., Селифонова Е.И., Тучин В.В.	268
ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ GFP В МИКРОРЕЗОНАТОРЕ ФАБРИ-ПЕРО ПРИ НАКАЧКЕ СВЕРХКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ Вьюнышева С.А., Мысливец С.А., Давлетшин Н.Н., Еремеева Е.В., Высоцкий Е.С., Павлов И.Н., Вьюнышев А.М.....	269
ОЦЕНКА ЦИТОТОКСИЧНОСТИ И БИОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ В ТКАНЕВЫХ СРЕЗАХ ПЕЧЕНИ МЕТОДОМ МУЛЬТИФОТОННОЙ МИКРОСКОПИИ Гаврина А.И., Родимова С.А., Крылов Д.П., Козлов Д.С., Елагин В.В., Зюзин М.В., Кузнецова Д.С.....	270

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНЫХ НАРУШЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ Горюнов И.А., Шуплецов В.В., Адаменков Н.А., Журило И.П., Потапова Е.В., Дрёмин В.В.....	271
ПАРАМЕТРЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АНТИМИКРОБНОЙ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ У ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ Ефимова Е.С., Полиданов М.А., Корченова М.В., Каневский М.В., Мусаелян А.Г., Алипов В.В., Тучина Е.С.	272
НОВЫЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА ДЛЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ Арутюнян Б.А., Закоян А.А.	273
ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИММУНОТЕРАПИИ ОПУХОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАБОЛИЧЕСКОГО ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ВРЕМЯРАЗРЕШЁННОГО ИМИДЖИНГА Изосимова А.В., Сачкова Д.А., Ванцева О.А., Кондратьева А.Р., Сажина М.М., Яшин К.С., Можеров А.М., Щеславский В.И., Ширманова М.В., Южакова Д.В.	274
ВРЕМЯ-РАЗРЕШЕННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ МИКРОСКОПИЯ В АНАЛИЗЕ ЦИТОТОКСИЧНОСТИ И БИОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ В EX VIVO ТКАНЕВЫХ СРЕЗАХ ПЕЧЕНИ Козлов Д.С., Родимова С.А., Крылов Д.П., Можеров А.М., Зюзин М.В., Кузнецова Д.С.	275
МЕТОД FLIM В ОЦЕНКЕ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПЕЧЕНИ ПРИ ТОКСИЧЕСКОМ ПОВРЕЖДЕНИИ НА МОДЕЛИ ТКАНЕВЫХ ЭКСПЛАНТАТОВ Крылов Д.П., Козлов Д.С., Родимова С.А., Можеров А.М., Карабут М.М., Кузнецова Д.С.....	276
ВЛИЯНИЕ L-АРГИНИНА НА АГРЕГАЦИЮ ЭРИТРОЦИТОВ: РОЛЬ ЭНДОТЕЛИЯ Максимов М.К., Ермолинский П.Б., Щегловитова О.Н., Умеренков Д.А., Луговцов А.Е., Приезжев А.В.	277
СПЕКТРОСКОПИЯ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ЖЕЛЧИ В ОЦЕНКЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПЕЧЕНИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЖЕЛТУХЕ ПОСЛЕ АНТЕГРАДНОЙ ДЕКОМПРЕССИИ Приземин В.Н., Сумин Д.С., Мамошин А.В., Потапова Е.В.	278
НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНСАМБЛЯ РАКОВЫХ КЛЕТОК В УСЛОВИЯХ ИММЕРСИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ПРОСВЕТЛЕНИЯ Светлицына Н.А., Тучин В.В., Семенова Н.И.	279
ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЕРФУЗИОННО-КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗДОРОВЫХ И РАКОВЫХ ТКАНЕЙ ЯИЧНИКОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ГЛИЦЕРИНА Селифонов А.А., Тучин В.В.	280
АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ ЭНДОГЕННЫХ ФЛУОРОФОРОВ БИОТКАНЕЙ МЕТОДАМИ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ Хасан А., Будылин Г.С., Ровнягина Н.Р., Касьянова П.С., Якимов Б.П., Гайер А.В., Ширшин Е.А.....	281
ОПТИЧЕСКАЯ МЕТРОЛОГИЯ	282
ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛУВОЛНОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ KDP, DKDP В ПЕРЕМЕННОМ СИНУСОИДАЛЬНОМ ПОЛЕ Арсентьев С.С., Смирнова Е.А., Хышов А.А., Новиков М.А.	283

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАРТМАНОМЕТРА И ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФИЗО В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ Галактионов И.В., Никитин А.Н., Шелдакова Ю.В., Топоровский В.В., Денисов Д.Г., Сахаров А.А., Карасик В.Е., Кудряшов А.В.....	284
ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ И АМПЛИТУДНЫХ ШУМОВ ОДНОЧАСТОТНЫХ ЛАЗЕРОВ Загорулько К.А., Козлов А.В., Хатырев Н.П.....	285
РАСЧЕТ ЛИДАРНЫХ СИГНАЛОВ В ИНФОРМАТИВНОМ ДИАПАЗОНЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ Кравцова Н.С., Садовников С.А., Яковлев С.В., Тужилкин Д.А.	286
БИНАРИЗАЦИЯ АМПЛИТУДНЫХ ГОЛОГРАММ ФРЕНЕЛЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В РАСХОДЯЩИХСЯ ПУЧКАХ, С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ПРЯМОГО ПОИСКА СО СЛУЧАЙНОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ Овчинников А.С., Черёмхин П.А., Родин В.Г., Савченкова Е.А., Свистунов А.С.....	287
ПРИМЕНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ «ЭФФЕКТ ТАЛЬБОТА» ДЛЯ НАУЧНЫХ ПРОЕКТОВ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ Пчелкина Н.В., Рабенандрасана Ж., Смольский А.А.....	288
ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ ФОТОТЕРМИЧЕСКИМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ Арсентьев С.С., Смирнова Е.А., Хышов А.А., Новиков М.А., Лукьянов А.Ю.....	289
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ИЗ ДВУХ СВЯЗАННЫХ СУБВОЛНОВЫХ РЕШЕТОК С ОПТИЧЕСКОЙ РТ-СИММЕТРИЕЙ Венедиктов В.Ю., Ефремова Е.А., Зинчик А.А., Крылов И.Р., Прохорова У.В., Шалымов Е.В., Шоев В.А.	290
ФИЗИКА НАНОСТРУКТУР	291
ЭЛЕКТРОННЫЙ МАКЕТ ТРЕХМЕРНОЙ ОКТУПОЛЬНОЙ ИОННОЙ ЛОВУШКИ Семынин М.С., Рудый С.С., Рыбин В.В.....	292
ОХЛАЖДЕНИЕ КЛАССИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ КВАНТОВОГО ПРЕДЕЛА ПРИ ПРИЛОЖЕНИИ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРИМЕРЕ КАНТИЛЕВЕРА Орлов В.К., Рождественский Ю.В.	293
PECULIARITIES OF ABLATION AND DEPOSITION OF BRASS BY NANOSECOND LASER PULSES Ramos-Velazquez A., Amiaga J.V., Khuznakhmetov R.M., Veiko V.P.....	294
СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА ПО СПЕКТРАМ ПОГЛОЩЕНИЯ, КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНИКИ АТОМНО-СИЛОВОЙ И СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ Иноземцева А.В., Аржанов А.И., Каримуллин К.Р., Наумов А.В.	295
ХИРОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АТОМАРНО-ТОНКИХ НАНОСТРУКТУР CdSe С ХИРАЛЬНЫМИ ЛИГАНДАМИ Куртина Д.А, Васильев Р.Б.....	296

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОМОЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА НА ПОВЕРХНОСТИ SI(100) МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ Лозовой К.А., Дирко В.В., Кукунов О.И., Соколов А.С., Коханенко А.П., Войцеховский А.В.	297
КВАНТОВЫЙ ВЫХОД МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ВБЛИЗИ ПЛАЗМОННОЙ НАНОЧАСТИЦЫ Мушин Ф.Ю., Чмерева Т.М.	298
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТРАВЛЕНИЯ НА ПОРИСТОСТЬ СЛОЁВ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ МНОГОСЛОЙНОГО ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ Леньшин А.С., Пешков Я.А., Золотухин Д.С., Черноусова О.В., Канькин С.В., Минаков Д.А.	299
ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК ZnO МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ Саенко А.В., Хубежов С.А., Билык Г.Е.	300
ПЕРЕХОД ОТ НЕПРЯМОЙ К ПРЯМОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЕ В ТОНКИХ СЛОЯХ β-InSe Котова Л.В., Бородин Б.Р., Галимов А.И., Елисеев И.А., Рахлин М.В.	301
ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РОСТА ПЛАНАРНЫХ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ Сибирев В.Н., Сибирев Н.В.	302
КИНЕТИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РОСТА GaAs ПЛАНАРНЫХ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ Сибирев Н.В., Штром И.В.	303
МАКРОКРИСТАЛЛЫ NaCl ДОПИРОВАННЫЕ КОЛЛОИДНЫМИ КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ РАЗНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА Новиков З.Б., Ципотан А.С.	304
ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПЛЕНКИ ОКСИДА ОЛОВА НА ПОРИСТОМ КРЕМНИИ Ким К.Б., Леньшин А.С., Черненко С.С., Золотухин Д.С., Нифталиев С.И.	305
ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ФОТОННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ Касьянова И.В., Горкунов М.В., Артемов В.В., Ежов А.А., Мамонова А.В., Симдянкин И.В., Гейвандов А.Р., Палто С.П.	306
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ИОНОВ Eu^{3+} В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ МОЛИБДАТА ЕВРОПИЯ СО СТРУКТУРОЙ ШЕЕЛИТА Кулинкин А.Б., Магарян К.А., Аржанов А.И., Смирнов А.Н., Коровин А.М., Кузин Д.С., Чернышев В.А., Наумов А.В., Соколов Н.С.	307
СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК И НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ГаР Ридер М.А., Большаков А.Д., Кондратьев В.М., Кузнецов А.С., Федоров В.В., Захаров В.В., Орлова А.О.	308
ВЛИЯНИЕ ПОСТСИНТЕЗНОЙ ОБРАБОТКИ И ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОСОВМЕСТИМЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ Ефимова А.А., Захаров В.В., Орлова А.А.	309
СИСТЕМА НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ И КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ZnS ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ Ковова М.С., Шмаков С.В., Захаров В.В., Большаков А.Д., Орлова А.О.	310

КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ ТРОЙНЫХ СОЕДИНЕНИЙ AGINS2 КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРОВ Осколкова Т.О., Орлова А.О.....	311
АРТФОТОНИКА.....	312
ИССЛЕДОВАНИЕ <i>IN SITU</i> КАРТИНЫ «ХИРОСИМА I» (1958) ВЕРНЕРА ТЮБКЕ (1929-2004) Смолянская А.А., Андреев И.А., Сирро С.В., Асеев В.А., Терещенко Е.Ю., Смолянская О.А.	313
СОЗДАНИЕ КОМПАКТНОЙ СИСТЕМЫ РАДАРНОГО ТИПА ДЛЯ СКАНИРОВАНИЯ ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ПОЛОТЕН НА ЧАСТОТЕ 122 ГГц Цветков А.Р., Смолянская О.А.....	314

**ИНДУСТРИАЛЬНАЯ ФОТОНИКА
(ИНЖЕНЕРНАЯ СЕКЦИЯ)**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЯЦИОННОЙ
АКУСТООПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ СПЕКТРОВ**
Боритко С.В., Гречухин А.Н., Иванов С.И.

Научно-технологический центр Уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

В работе рассмотрена возможность использования для дифференцирования оптических спектров модуляционной акустооптической спектрометрии, которая основана на акустооптической дифракции на фазовой решетке, созданной акустической волной с резкой периодической модуляцией фазы.

Ключевые слова: дифференцирование перекрывающихся оптических спектров.

Основной задачей спектрометрии является точное определение положения спектральных составляющих. Часто встречаемая ситуация состоит в том, что в перекрывающихся спектрах на фоне мощного широкого пика расположен более узкий и менее мощный пик. В этом случае, как показано на рис. 1(а), какой бы точный спектрометр не использовался измерение спектрального положения меньшего пика происходит с существенной ошибкой. Для решения данной проблемы достаточно продифференцировать имеющуюся зависимость и, как это показано на рис. 1(б), положение меньшего пика определяется с достаточной точностью.

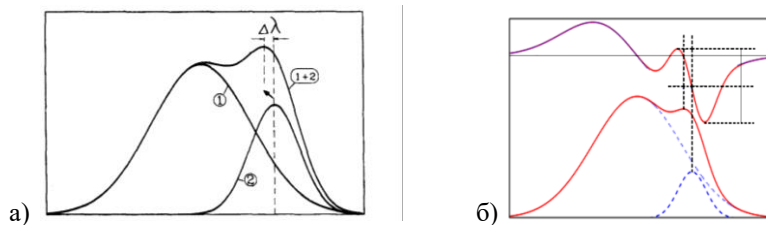


Рис. 1. Один спектральный пик на фоне другого (а), результат дифференцирования пересекающихся спектральных линий (б)

В работе реализована (теоретически предсказанная в [1] и [2]) возможность использования для дифференцирования оптических спектров акустооптическую дифракцию на фазовой решетке, созданной акустической волной с резкой периодической модуляцией фазы. На основе квазиколлинеарной акустооптической ячейки был создан макет спектрометра, позволяющего регистрировать производные оптических спектров. В качестве тестового эксперимента была произведена регистрация излучения неоновой лампы, имеющей линейчатый спектр. На рис. 2 показан один пик спектра, а также его производная. Из графика видно, что созданный макет довольно эффективно регистрирует как спектр оптического сигнала, так и его производную, причем в реальном масштабе времени (см. представленный скан) - слева присутствуют как сигнал спектра, так и его производной; справа сигналов нет.

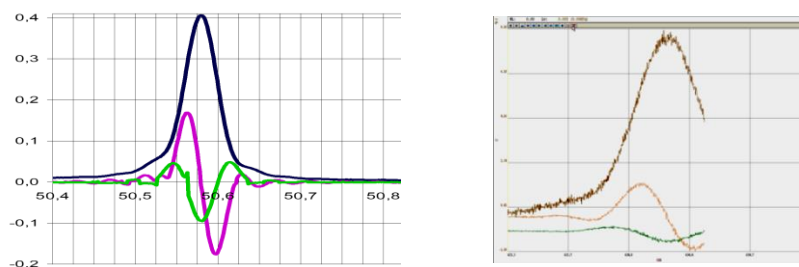


Рис. 2. Часть спектра неоновой лампы, зарегистрированная созданным макетом модуляционного акустооптического спектрометра и скан с экрана регистрирующей системы

Таким образом, в результате проведенных работ предложен метод точного определения положения спектральных особенностей в перекрывающихся спектрах в реальном масштабе времени и создана приборная реализация предложенного метода. Следует отметить, что, как это видно из графика на рис. 2, созданный макет позволяет регистрировать не только первую, но и вторую производную оптического спектра (правда с низкой эффективностью). Мы предполагаем продолжить работы с целью выявления возможности более эффективной регистрации именно второй производной.

[1] Пустовойт В.И., Пожар В.Э., *Радиотехника и электроника*, **43**, №1, 121-127, (1998).

[2] Пожар В.Э., Пустовойт В.И., *Успехи современной радиоэлектроники*, **9**, 47-61, (2006).

**ЛАЗЕРНАЯ И МИКРОСПЕКТРАЛЬНАЯ ТЕХНИКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ
ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ НАНОМАСШТАБНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Козодаев Д.А.¹, Кузнецов Е.В.¹, Погоньшев А.О.², Трусов М.А.¹

¹ООО «Активная Фотоника», Зеленоград, Москва, Россия

²ФГБУ «ВНИИОФИ», Москва, Россия

Мы представляем на конференции «Невская Фотоника» научное оборудование для нано-спектральных исследований производства Группы компаний «НТ-МДТ» (ИНН 7735184244), одного из ведущих разработчиков оптико-зондового оборудования и других научных инструментов высокого класса для экспериментальных исследований в области нанофотоники.

Ключевые слова: нанофотоника, зондово-оптические установки.

Бренд «НТ-МДТ» («NT-MDT») имеет давнюю историю и хорошо известен во всём научном мире. Команда «НТ-МДТ» была первой, кто выпустил на мировой рынок комбинированную АСМ+КР установку для измерений спектральных свойств материалов с нанометровым латеральным разрешением, еще в 2004 г. С тех пор прошло уже почти 20 лет, и производитель все эти годы не стоял на месте! На сегодняшний день нами уже разработана высоко-профессиональная зондово-спектральная измерительная система нового поколения, в которой конструктивно предусмотрена максимально гибкая архитектура и заложено множество возможностей для реализации самых сложных научных экспериментов, как в оптической спектроскопии, так и в зондовой наноскопии.

Спектральная часть нашей измерительной системы изначально спроектирована под удобную интеграцию с атомно-силовым микроскопом, и позволяет довольно легко выйти на режим зондового усиления спектрального сигнала, типа TERS и TEPL [1]. Далее функциональность системы будет расширена в область реализации мульти-фотонных процессов (более подробно о подобных экспериментальных методах можно прочитать в книге [2]), в том числе с высоким временным разрешением, с возможностью построения гиперспектральных карт нелинейных зондово-оптических взаимодействий.

Стремясь к максимальной локализации производства зондового и спектрального оборудования на территории России, наша команда уже разработала и самостоятельно серийно выпускает твердотельные термостабилизированные лазеры видимого и ближнего ИК диапазона для рамановской и фотолюминесцентной спектроскопии стационарных состояний, которые можно использовать как с техникой нашего производства, так и с приборами сторонних производителей.

Конструктивная схема наших лазерных источников построена на интеграции специально отобранных лазерных диодов с отражающими объемными брэгговских решетками, с целью выделения и стабилизации единственной моды в спектре излучения. Наши лазеры отличает высокая стабильность по мощности, узкая ширина линии излучения, гауссовский профиль пучка, высокий коэффициент подавления боковых мод. Мы выпускаем лазерные источники в диапазоне мощностей от десятков до сотен мВт, в вариантах исполнения с открытым пучком на выходе и с заведением излучения в оптическое волокно.

[1] Novotny L., Hecht B., *Principles of Nano-optics*, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, (2007).

[2] Demtroeder W., *Laser Spectroscopy: Basic concepts and instrumentation*, 3rd ed., Springer, (2003).

**ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ЛИНЗОВАННЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ
ТОРЦЕВОГО ВВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ В ВЫСОКОКОНТРАСТНЫЕ
ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ**

Вобликов Е.Д.¹, Пономарев Р.С.², Ветошкин М.А.¹, Москалев Д.Н.^{1,2}

¹ПАО ПНППК, г. Пермь, Россия

²ПГНИУ, г. Пермь, Россия

Цель исследования – изучение зависимости вносимых оптических потерь линзованных оптических волокон от их геометрических параметров.

Ключевые слова: линзованные оптические волокна, вносимые оптические потери.

Передача оптического излучения между высококонтрастными интегрально-оптическими волноводами и стандартными оптическими волокнами остается актуальной задачей. Сложность проблемы заключается в значительной разнице размеров фундаментальной моды излучения в волокне и канальном волноводе, обусловленной разницей контрастов показателей преломления этих двух типов волноводов. Для высококонтрастных интегральных оптических волноводов диаметр поля моды может отличаться от волоконного на порядок, что приводит к низкой эффективности ввода излучения и паразитной засветке соседних волноводных каналов.

Задача минимизации вносимых оптических потерь в большинстве случаев сводится к максимальному согласованию размеров и формы диаметров поля моды волновода и оптического волокна. Для некоторых приложений значимой является также и проблема обратных отражений. В публикациях по данной теме значительное внимание уделено разработке элементов для преобразования волноводной моды с целью ее увеличения и согласования с оптическим волокном [1]. Задача согласования мод может быть решена также и путем преобразования оптической моды в линзованном оптическом волокне [2]. Однако оптимизации формы линзованных оптических волокон в современных публикациях уделено меньше внимания.

Также недостаточно подробно освещен вопрос измерения характеристик линзованных волокон. Хорошо описаны методы измерения фокусного расстояния [3] и диаметра поля моды [2]. Эти же параметры производители приводят в паспортах своих изделий, не ссылаясь, впрочем, на какой-то единый стандарт проведения этих измерений. Хуже освещен вопрос о вносимых оптических потерях и методах измерения этой величины [4].

Настоящая работа посвящена изучению зависимости характеристик линзованного оптического волокна от основных геометрических параметров. В качестве параметров оптимизации выбраны длина и угол схождения тейпированного участка волокна, а также радиус скругления сердцевин. Дается оценка пределов уменьшения диаметра поля моды, достижимых с помощью тейпированных линзованных волокон (рисунок а). Расчеты выполнены методом распространяющегося луча (beam propagation method) в среде OptiBPM.

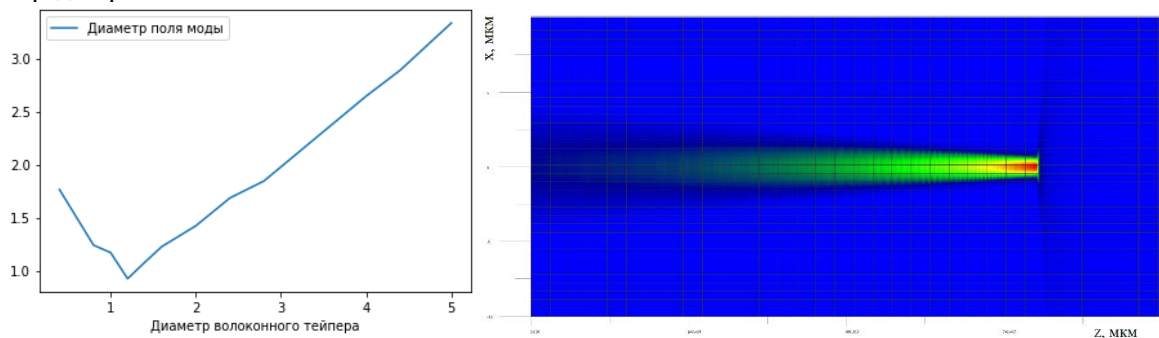


Рисунок. а) Зависимость диаметра поля моды от диаметра тейпированного оптического волокна.

б) Распределение поля в линзованном оптическом волокне

Экспериментальная проверка результатов проведена на примере линзованных волокон, изготовленных методом травления. Измерены диаметр поля моды и вносимые оптические потери для линзованных волокон разной геометрии.

[1] Khan S., *APL Photonics*, **5**, №5, 056101, (2020).

[2] Zakrzewski A., *Opto-Electronics Review*, **24**, №4, 216-222, (2016).

[3] Шмырова А.И., *Оптические и информационные технологии*, 27-28, (2022).

[4] Земцов Д.С., *Компьютерная оптика*, **47**, №2, 224-229, (2023).

**РАЗРАБОТКИ ООО «СМАРТС-КВАНТТЕЛЕКОМ»
В ОБЛАСТИ КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ**

Егоров В.И.^{1,2}, Наливайко И.П.¹

¹ООО «СМАРТС-Кванттелеком», Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ООО «СМАРТС-Кванттелеком» — один из российских лидеров в области квантовых коммуникаций. В настоящей работе рассказывается об опыте разработки и внедрения систем квантовой рассылки ключей в информационные сети, в том числе в первые в стране магистральные квантовые сети, создании компонентной базы для этих устройств.

Ключевые слова: квантовые коммуникации, квантовые сети, фотоника.

В эпоху тотальной цифровизации проблема безопасности и конфиденциальности данных стала одной из ключевых для бизнеса и целых отраслей экономики. Компания ООО «СМАРТС-Кванттелеком» предлагает инновационную технологию криптографического шифрования передаваемых данных на основе квантов света — фотонов. Такой способ защиты решает задачи тех, у кого время актуальности зашифрованной информации значительно превышает время ее дешифрования:

- силовые ведомства и государственные структуры,
- крупные промышленные холдинги и распределенные предприятия,
- банки, кредитные организации и иные компании финансового сектора,
- телекоммуникационные и технологические компании.

Продукты компании основаны на методе квантового распределения ключей на боковых частотах модулированного излучения (КРКБЧ), разработанном в ИТМО [1]. Линейка решений компании на сегодняшний день включает:

- квантовые криптографические системы выработки и распределения ключей (различного исполнения),
- источники и детекторы фотонов для систем квантовых коммуникаций,
- модуляторы для оптических, радиофотонных и квантовых систем связи,
- квантовые генераторы случайных чисел.

Системы квантовой коммуникации ООО «СМАРТС-Кванттелеком» используются при построении магистральных квантовых сетей Санкт-Петербург — Москва и Москва — Нижний Новгород на инфраструктуре ОАО «РЖД». Между географически распределенными центрами обработки данных АО «СМАРТС» в Самарском регионе и на ряде других сетей.

[1] Gleim A.V. et al., *Optics Express*, **24**, №3, 2619-2633, (2016).

АПЕРИОДИЧЕСКАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА
НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НУЛЕЙ ζ -ФУНКЦИИ РИМАНА

Мадисон А.Е.¹, Мадисон П.А.^{1,2}, Козодаев Д.А.³, Казанков А.Н.³, Мошников В.А.²

¹НИУ ВШЭ - Санкт-Петербург, Санкт-Петербург, Россия

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

³ООО «АКТИВНАЯ ФОТОНИКА», Санкт-Петербург, Россия

Обсуждается возможность создания аперриодической дифракционной решетки, щели которой расположены в соответствии с распределением нетривиальных нулей дзета-функции Римана. Методами контактной атомно-силовой литографии создан действующий прототип такой аперриодической решетки. Экспериментально получена картина дифракции, для которой положение дифракционных пиков соответствует простым числам и их степеням.

Ключевые слова: дифракционные оптические элементы, дзета-функция Римана, аперриодические кристаллы.

Аперриодический порядок широко используется в нанопотонике [1]. Аперриодические структуры могут характеризоваться необычными дифракционными свойствами. Условие, что для когерентной интерференции лучей необходимо, чтобы на оптической разности хода укладывалось бы целое число длин волн, для аперриодических структур может не выполняться. Мы рассмотрели распределение δ -функций Дирака по нулям ζ -функции Римана и исследовали его Фурье-спектр [2]. Спектр содержит пики на логарифмах простых чисел и их степеней, причем их амплитуда определяется значениями функции фон Мангольда $\Lambda(n)$. Так как дифракционная картина по сути своей является Фурье-образом, то существует принципиальная возможность создания дифракционного оптического элемента нового типа.

На поверхности прозрачной пластины нами создавалась аперриодическая система щелей, позиции которых соответствовали значениям нулей ζ -функции с некоторым масштабным коэффициентом. Прототипы аперриодических дифракционных решеток изготавливались методами контактной атомно-силовой литографии с использованием сканирующего зондового микроскопа NTEGRA, НТ-МДТ (Зеленоград). Было подготовлено несколько вариантов шаблонов и осуществлена отладка режимов силовой литографии на подложках из различных материалов. Экспериментальная картина дифракции для оптимального случая представлена на рисунке (расстояние до экрана было ~ 30 см). Ниже представлен Фурье-спектр от соответствующим образом упорядоченной последовательности δ -функций.

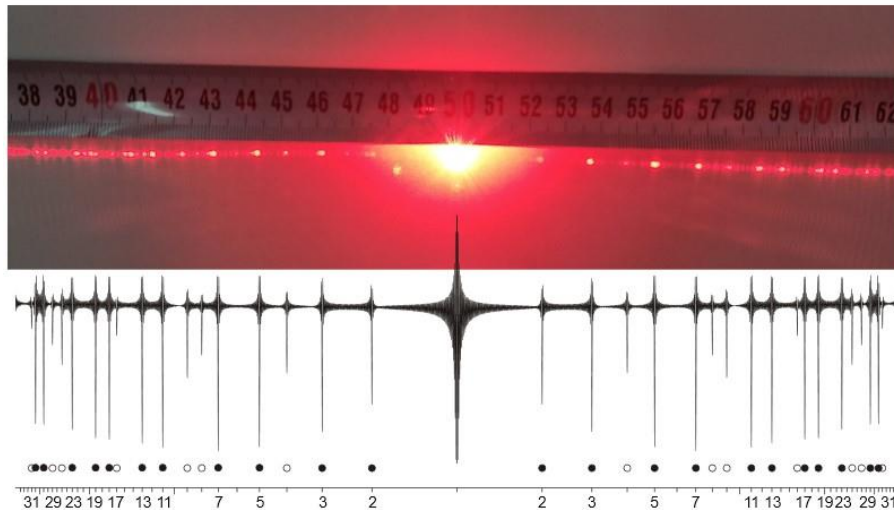


Рисунок. Дифракция на аперриодической решетке, щели которой расположены в соответствии с распределением нетривиальных нулей ζ -функции Римана: сверху – картина дифракции (эксперимент), снизу – Фурье-спектр распределения нулей ζ -функции Римана (расчет)

Вывод. Методами контактной АСМ-литографии создан действующий прототип аперриодической решетки, щели которой располагались в соответствии со значениями нулей ζ -функции Римана. Экспериментально получена картина дифракции, при этом положение дифракционных пиков соответствует простым числам и их степеням.

[1] Dal Negro L., *Optics of aperiodic structures: Fundamentals and device applications*, CRC Press, (2014).

[2] Madison A.E., Madison P.A., Kozyrev S.V., *Struct. Chem.*, **34**, 777–790, (2023).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ
ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Илюшин П.Я.^{1,2}, Шипило Д.Е.^{1,2}, Николаева И.А.^{1,2}, Панов Н.А.^{1,2}, Косарева О.Г.^{1,2}

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

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Проведено моделирование распространения квадратурно-модулированного сигнала в оптической линии связи с полупроводниковыми оптическими усилителями (ПОУ). Проанализирована возможность декодирования такого сигнала с внесенными искажениями при различных мощностях и частотах следования импульсов сигнала.

Ключевые слова: волоконно-оптические линии связи, полупроводниковые оптические усилители, квадратурно-модулированный сигнал.

ПОУ могут быть встроены в волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), чтобы компенсировать затухание сигнала и увеличить расстояние передачи. Они являются альтернативой цифровым повторителям. В отличие от последних, при использовании ПОУ искажения сигнала накапливаются по мере прохождения линии связи, и должны быть скомпенсированы только на ее выходе, в момент приема. В настоящей работе были численно проанализированы искажения, внесенные в передаваемый по ВОЛС сигнал полупроводниковыми оптическими усилителями, а также показана возможность их компенсации.

Модель ВОЛС состояла из участков одномодового линейного волокна стандарта G.652.D, чередующихся с ПОУ для компенсации поглощения. Распространение поля по волокну описывалось уравнением для огибающей оптического поля $A(t, z)$, учитывающее хроматическую дисперсию с коэффициентом $\beta_2 = 2.3 \times 10^{-8}$ пс²/мкм и поглощение с коэффициентом $\gamma = 0.2$ дБ/км. В уравнениях модели ПОУ учитывались эффекты насыщения [1, 2] и дисперсии [3] коэффициента усиления $g(t, z)$:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{1}{2} (1 - i\alpha) \left(gA + gT_2^2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \right) - \frac{1}{2} \alpha_{int} A, \quad \frac{\partial g}{\partial t} = \frac{g_0 - g}{\tau_c} - \frac{g|A|^2}{E_{sat}},$$

где v_g – групповая скорость, $\alpha = 6$ – отношение показателей преломления и поглощения, $T_2 = 23.6$ пс – обратная ширина спектра усиления, $\alpha_{int} = 2$ мм⁻¹ – коэффициент внутреннего поглощения усилителя, $g_0 = 24.3$ мм⁻¹ – коэффициент усиления в ненасыщенном режиме, $\tau_c = 200$ пс – время релаксации носителей заряда из зоны проводимости в валентную зону, $E_{sat} = 0.46$ пДж – энергия насыщения. Данные параметры были выбраны, чтобы усиление слабого сигнала, насыщенная мощность и ширина спектра усиления соответствовали техническим характеристикам ПОУ INPHENIX IPSAD1508.

Построенная модель была применена для расчета распространения квадратурно-модулированного сигнала, что позволило определить его характеристики, при которых передача по ВОЛС сопровождается некритическими искажениями формы огибающей: средняя мощность на входе в ПОУ выбрана приблизительно равной 0.5 мкВт, длительность одного импульса – 4 пс [см. рис. (а, б)]. При выбранных характеристиках сигнала искажения, связанные с ПОУ, с достаточной точностью описываются в виде постоянного фазового набега, что позволило компенсировать их независимо от искажений, связанных с волокном, на этапе постобработки прошедшего по ВОЛС сигнала. Ошибки декодирования [рис. (в)] возникают лишь если фазовый набег скомпенсирован с ошибкой в 0.2 рад и более. Таким образом, даже при длительностях импульсов, на порядок меньших, чем используются в современных линиях связи, дисперсия усиления в ПОУ не сказывается на возможности декодирования квадратурно-модулированного сигнала.

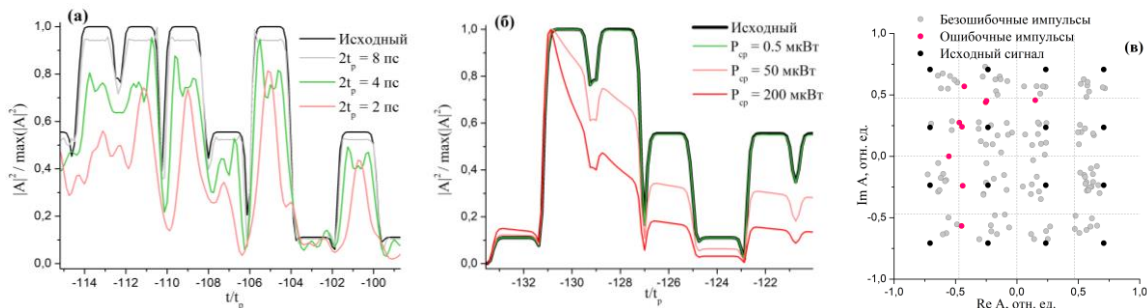


Рисунок. (а) Эффект дисперсии усиления в сигналах с различной длительностью импульса. (б) Эффект насыщения усиления в сигналах различной мощности. (в) Импульсы после компенсации искажений.

Красные точки – ошибки при передаче

- [1] Agrawal G.P., Olsson N.A., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **25**, №11, 2297-2306, (1989).
 [2] Peterson R., Cristiano M.G., Evandro C., *Optical Engineering*, **57**, №10, 106112, (2018).
 [3] Agrawal G.P., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **27**, №6, 1843-1849, (1991).

РАЗРАБОТКА ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА СОЗДАНИЯ ГИДРОФОБНЫХ ГРАДИЕНТОВ СМАЧИВАНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНОГО НАПРАВЛЕННОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Гришина А.И., Филатов И.А., Щедрина Н.Н., Одинцова Г.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В настоящей работе исследуется метод создания гидрофобных градиентов смачивания с помощью структурирования импульсным наносекундным лазером и последующим нанесением гидрофобизирующей жидкости. Исследована возможность повторного использования полученного гидрофобного градиента смачивания.

Ключевые слова: автономное течение жидкости, гидрофобный градиент смачивания, лазерное структурирование.

Смачиваемость играет важную роль в различных областях промышленных технологий, начиная от антикоррозионной обработки и заканчивая биомедицинскими применениями. Управление смачиванием с помощью лазерного структурирования позволяет создавать поверхности с комбинацией последовательно расположенных областей по уменьшению угла смачивания, так называемых градиентов смачивания. Поверхности с градиентом смачивания находят свое применение в микрофлюидных системах Lab-On-a-Chip и Point-Of-Care [1], в системах управления температурным режимом для отвода конденсированной влаги [2], для конденсации пара [3] и разделения жидкостей с различным поверхностным натяжением [4]. Уже существующие гидрофобные градиенты смачивания создаются методами, включающими в себя большое количество продолжительных по времени этапов обработки поверхности [5-7]. Созданный нашей научной группой ранее с помощью лазерного структурирования градиент [8] обладал гидрофильными свойствами и оставался стабильным только в течение короткого периода времени.

Целью настоящей работы является создание лазерно-химического метода формирования структур для направленного течения жидкости путём создания гидрофобного градиента смачивания. С использованием лазерного структурирования и гидрофобизирующей жидкости предполагается возможность создать износостойкие стабильные поверхности с высоким смачиванием. С помощью импульсного наносекундного итербиевого волоконного лазера «МиниМаркер-2» мощностью 50 Вт с длиной волны 1064 нм и гидрофобизирующей жидкости Soft99 Glaco Zero Mirror Coat, представляющей из себя спиртовую суспензию из силанизированных наночастиц кремния [9], на поверхности нержавеющей стали марки AISI 304 были подобраны режимы с перекрытиями от 0% до 90% и плотностями мощности от 28.2 МВт/см² до 282.9 МВт/см², обеспечивающие углы смачивания от 140° до 180°. Из них были выбраны области и создан гидрофобный градиент смачивания. Его длина составляет 12 мм, средняя скорость течения капли на данном градиенте соответствует 33 мм/с. Была проверена возможность многократного использования: после 30 проходов капля продолжает течение. Также был создан градиент со сложной геометрией, а именно поворот, и протекающие по нему капли автономно меняли направление.

Таким образом, в ходе исследования был получен образец с гидрофобным градиентом смачивания, показывающий стабильность свойств и возможность многократного использования. Такие градиенты можно использовать в микрофлюидных системах для транспортировки капель и смешивания жидкостей малых объемов.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030».

- [1] Morrissette J.M. et al., *Scientific reports*, **7**, 1800, (2017).
- [2] Lowrey S. et al., *Langmuir*, **38**, №2, 605-619, (2021).
- [3] Sommers A.D. et al., *Applied Thermal Engineering*, **173**, 115226, (2020).
- [4] Chowdhury I.U. et al., *Physical Review Fluids*, **6**, №9, 094003, (2021).
- [5] Lui C. et al., *Scientific reports*, **7**, 7552, (2017).
- [6] Tang X. et al., *Journal of Colloid and Interface Science*, **604**, 526-536, (2021).
- [7] Funayama K. et al., *Scientific reports*, **13**, 6440, (2023).
- [8] Shchedrina N.N. et al., *Optics Express*, **29**, №8, 12616-12624, (2021).
- [9] Luo J.T. et al., *Physical Review Applied*, **7**, №1, 014017, (2017).

ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ФОТОНИКИ

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ
(CS_{1-x}RB_x)₄PBVR₆ В БОРОГЕРМАНАТНОМ СТЕКЛЕ

Бабкина А.Н., Харисова Р.Д., Зырянова К.С., Кузьменко Н.К.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе показан синтез и свойства нанокристаллов (CS_{1-x}Rb_x)PbBr₃ и (CS_{1-x}Rb_x)₄PbBr₆ в стекле. С увеличением содержания рубидия спектр люминесценции смещается в синюю область, а квантовый выход увеличивается с 28 до 51%.

Ключевые слова: германатное стекло, бромид свинца-цезия, допирование рубидием.

До сих пор не утихают споры о наличии видимой люминесценции кристаллов типа A₄PbBr₆. Первые работы [1] по выращиванию и изучению оптических свойств перовскитных и перовскитоподобных монокристаллов показали, что электронная структура Cs₄PbBr₆ аналогична электронной структуре кристаллов PbBr₂. Край экситонного поглощения кристаллов, обусловленный катионным экситоном Френкеля [1], приходится на область 310–330 нм. Люминесценция же в кристаллах CsPbX₃ связана с образованием экситонов Ванье-Мотта в подрешетке Pb²⁺, имеющих время жизни порядка нескольких наносекунд [2] и подверженных сильному размерному квантованию. В других работах было показано наличие интенсивной зеленой люминесценции кристаллов Cs₄PbBr₆ без каких-либо примесей, и был предложен дефектный характер их люминесценции.

В данной работе в качестве объекта исследования выступили борогерманатные стекла состава: 23,59 В₂О₃ – 38,09 GeO₂ – 6,41 Na₂O – 5,03 ZnO – 1,38 P₂O₅ – 2,85 TiO₂ – 4,99 K₂O – 5,41*(1-x) Cs₂O – (5,41*x) Rb₂O – 2,26 PbO – 9,98 Br мол.%, где x = 0; 0,1; 0,3; 0,5. Синтез стекла проводили в атмосфере воздуха при температуре 950°C в течение 30 мин. Нанокристаллы перовскита были выделены в матрице стекла при тонком отжиге от 450°C.

Согласно рентгеновскому фазовому анализу в отсутствие рубидия в борогерманатной матрице выделяются кристаллы Cs₄PbBr₆ и CsPbBr₃. С увеличением содержания рубидия выделение нанокристаллов (Cs,Rb)₄PbBr₆ сменялось появлением нанокристаллов Rb₄PbBr₆. При этом дифракционные рефлексы, соответствующие кристаллам CsPbBr₃ или RbPbBr₃, отсутствовали. Материалы во всех случаях демонстрировали поглощение в области 500 нм (рис. а) и интенсивную зеленую люминесценцию. При увеличении содержания рубидия от состава Cs_{0,9}Rb_{0,1} до состава Cs_{0,5}Rb_{0,5} максимум люминесценции смещался в синюю область с 521 до 511 нм, квантовый выход (КВ) люминесценции увеличивался с 28 до 51% (рис. б), а среднее время затухания увеличилось с 2 до 8 нс.

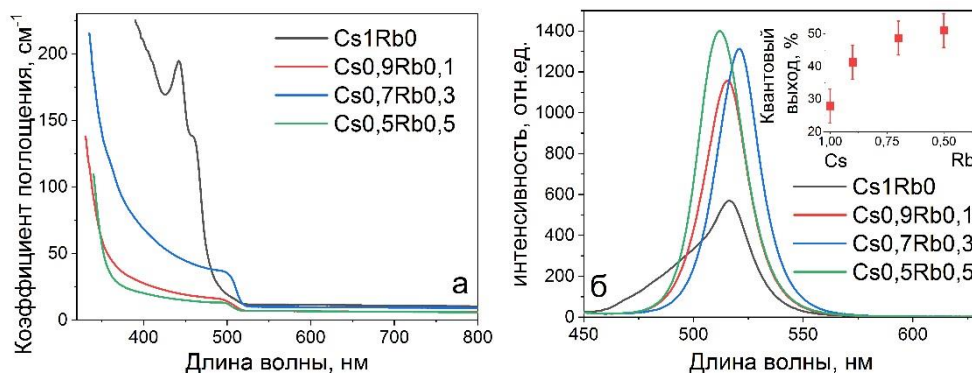


Рисунок. (а) Спектры поглощения стекол с различным соотношением Cs/Rb. (б) Спектры люминесценции стекол при возбуждении 390 нм. На вставке: концентрационная зависимость КВ

В работе [3] показано, что даже самые малые примеси CspVBr₃, не различимые рентгеновским дифракционным анализом, дают зеленую люминесценцию в монокристаллах Cs₄PbBr₆. Также в пользу источника люминесценции как кристаллов (Cs,Rb)PbBr₃ говорит время жизни люминесценции, которое соответствует экситонам Ванье-Мотта. Таким образом, в исследуемых материалах были выделены одновременно нелюминесцентные кристаллы (Cs,Rb)₄PbBr₆ и люминесцентные кристаллы (Cs,Rb)PbBr₃.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 19-72-10036).

[1] Nikl M., Nitsch K., Polak K., *Phys. Status Sol.*, **166**, №2, 511-518, (1991).

[2] Nikl M., Mihokova E., Nitsch K., Polak K., Rodova M., Dusek M., Pazzi G. P., Fabeni P., Salvini L., Gurioli M., *Chem. Phys. Lett.*, **220**, №1-2, 14-18, (1994).

[3] Nikl M., Mihokova E., Nitsch K., Somma F., Giampaolo C., Pazzi G., Fabeni P., Zazubovich S., *Chem. Phys. Lett.*, **306**, 280-284, (1999).

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЛАЗМОНОВ С ПЕРЕНОСОМ ЗАРЯДА В КОМПЛЕКСНЫХ СИСТЕМАХ

Еремкин Е.В.¹, Фёдоров А.С.^{1,2}, Высотин М.А.^{1,2}

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

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

Плазмоны с переносом заряда (СТР) в комплексах металлических наночастиц, соединенных проводящими молекулярными линкерами, теоретически проанализированы с использованием статистического подхода.

Ключевые слова: плазмоны с переносом заряда, наночастицы.

Плазмоны с переносом заряда (СТР) возникают в системах, состоящих из двух или более металлических наночастиц, соединенных проводящим мостиком (линкером) [1]. В таких системах свободные заряды перемещаются между наночастицами, что приводит к появлению плазмонов в виде этих осциллирующий заряда. Было показано, что в случае тонких мостиков генерируется узкий плазмонный пик с резонансом в ближней ИК-области спектра [2].

Ранее часто СТР исследовались в димерах, в то время как работы описывающие более сложные массивы практически отсутствуют [3]. В то же время кластеры наночастиц, соединенных проводящими линкерами, довольно часто получают в экспериментах по синтезу, особенно методами мокрой химии [4]. Для того чтобы идти в ногу с экспериментальными работами, в данной работе используется "статистический" подход, в котором образование большого набора кластеров наночастиц, соединенных линкерами, описывается простым методом на базе молекулярной динамики (MD).

Для изучения СТР в сгенерированных кластерах используется гибридная модель расчета плазмонов с переносом заряда, представленная в работе [3]. Для нахождения плазмонных частот кластера находят собственные числа системы уравнений вида (1):

$$\ddot{Q}_j = -\frac{1}{\alpha} \sum_k \left[\sum_{s \neq k, j} \left(Q_s \left(\frac{1}{R_{sj}} - \frac{1}{R_{sk}} \right) + (Q_j - Q_k) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_{jk}} \right) \right) \right], \quad \alpha = \frac{L^2 m^*}{2n_f e^2}, \quad (1)$$

где Q_j – заряд наночастицы, R – радиус наночастицы, R_{jk} – расстояние между двумя наночастицами, L – длина линкера, m^* – эффективная масса, e – заряд электрона, k и j – наночастицы связанные линкером.

В рамках оригинальной MD методики были сгенерированы наборы кластеров двух типов: набор, сгенерированный с параметрами, моделирующими высокую концентрацию линкеров в растворе, и набор с низкой концентрацией.

Применяя гибридную модель расчета плазмонов к полученным наборам кластеров, был получен набор плазмонных частот. На рисунке показано, что распределение полученных частот неравномерно, наблюдается несколько пиков, величина которых отличается для разных концентраций.

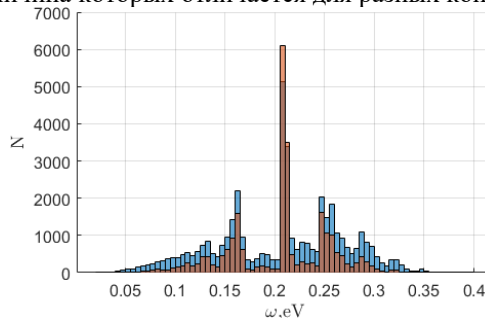


Рисунок. Сравнение распределения плазмонных частот для наборов кластеров двух типов: синим – высокая концентрация линкеров, красным – низкая. На оси N отмечено количество плазмонных резонансов во всем наборе кластеров, на оси ω – частота плазмонного резонанса в эВ

Полученное возбуждение ИК-плазмонов может быть широко использовано на практике, особенно в области биосенсоров, где использование ИК-излучения пользуется большим спросом из-за его более низкого поглощения по сравнению с излучением в видимом диапазоне, а также в приборной технике для фотоники и электроники.

Работа была поддержана грантом Российского научного фонда "«Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» (региональный конкурс)", №23-12-20007. Участие в конференции осуществлено при поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» №20230623-03921.

[1] Koya A.N., Lin J., *Applied Physics Reviews*, **4**, №2, 021104, (2017).

[2] Wen F. et al., *ACS nano*, **9**, №6, 6428-6435, (2015).

[3] Fedorov A.S. et al., *The Journal of Chemical Physics*, **154**, №8, 084123, (2021).

[4] Jiang N., Zhu T., Hu Y., *Microchimica Acta*, **186**, №12, 1-8, (2019).

КРИТИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ РЕАКТИВНОГО ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО НИОБАТА ЛИТИЯ ВО ФТОРСОДЕРЖАЩЕЙ ПЛАЗМЕ

Козлов А.А.^{1,2}, Москалев Д.Н.^{1,2}, Салгаева У.О.¹,
Криштон В.В.², Петухов И.В.^{1,2}, Волинцев А.Б.¹

¹ФГАОУ ВО ПГНИУ, г. Пермь, Россия

²ПАО ПНППК, г. Пермь, Россия

Статья содержит экспериментальные результаты по формированию высококонтрастных волноводов, показывающие наличие критических скоростей реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития, выше которых происходит образование нанопористого продукта реакции - фторида лития на поверхности вейфера.

Ключевые слова: тонкопленочный ниобат лития, волноводы, критическая скорость травления.

Тонкопленочный ниобат лития (англ. thin film lithium niobate, TFLN) наследует все свойства классического ниобата лития, но также дает возможности значительной миниатюризации волноводных структур ввиду более высокого контраста показателя преломления в сравнении с диффузионными технологиями [1].

Ранее авторами в публикации [2] были показаны расчеты геометрии одномодовых канальных волноводов на TFLN, а также представлены технологические особенности формирования профиля волноводов неглубокого травления ($d_{\text{травл}} = 300$ нм) на подложках из классического ниобата лития X-среза (производства CQT, Китай).

Травление профиля волноводной структуры производилось при помощи метода реактивного ионного травления (РИТ) в индукционно-связанной плазме в смеси SF_6 и Ar.

Реакция травления ниобата лития во фторсодержащей плазме по химической природе относится к классу твердотельных топохимических реакций травления ввиду образования одного или нескольких (в зависимости от температуры подложки) нелетучих продуктов реакции (как правило LiF) [3].

Данная особенность травления существенно ограничивает возможность трансфера техпроцесса травления с классического ниобата на вейферы TFLN ввиду его отличающейся химической активности, связанной, как полагают авторы, с особенностями изготовления вейферов. Ограничение связано со значительным сужением окна параметров поддержания плазмы, которые соответствуют режиму реактивного ионного травления.

В ходе экспериментов было установлено, что РИТ TFLN даже без дополнительного нагрева подложки характеризуется наличием критических скоростей травления, выше которых на поверхности образуется нанопористый фторид лития.

На рисунке показаны профили волноводов, которые соответствуют нормальному режиму РИТ (слева), а также режиму с надкритической скоростью травления, который характеризуется переходом от РИТ к топохимическому плазменному травлению с зарастанием поверхности пластины продуктами реакции (справа).

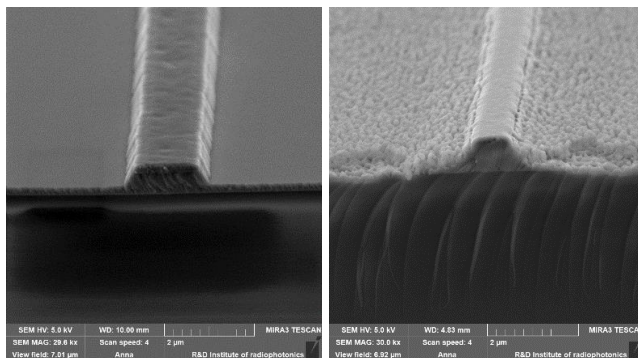


Рисунок. Профиль волноводов, полученных в режиме нормального РИТ (слева) и режиме с надкритической скоростью травления (справа), Сг маска для травления не снята с поверхности волновода

Наличие продукта реакции приводит к существенному росту шероховатости поверхностей, что может приводить к значительному росту рассеяния оптического излучения в волноводе. Также переход к топохимическому плазменному травлению делает невозможным контроль глубины травления для получения волноводов неполного травления ввиду автокаталитической природы травления с трудно контролируемой возрастающей во времени скоростью травления.

[1] Yuan S., Hu C. et al., *Journal of Semiconductors*, **42**, 041, 1-10, (2021).

[2] Kozlov A.A., Moskalev D.N. et al. *Appl. Sci.*, **13**(4), 2097, (2023).

[3] Гуляев В.В., Дикарев Ю.И. и др., *Конд. среды и межфаз. гран.*, **12**, №4, 360-368, (2010).

НОВЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ СО СЛОЯМИ ОКСИДОВ, АКТИВИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ, ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ В ФОТОНИКЕ

Соколов Н.С.¹, Коровин А.М.¹, Кузин Д.С.¹, Кулинкин А.Б.¹, Смирнов А.Н.¹,
Сахаров В.И.¹, Бурковский Р.Г.², Наумов С.В.³, Чернышев В.А.⁴,
Заморянская М.В.¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

³Институт физики металлов им. М.Н. Михеева, г. Екатеринбург, Россия

⁴Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии, позволившим реализовать условия эпитаксиального роста, выращены субмикронные слои $Y_2O_3:Eu$ и Eu_xMoO_4 на подложках Al_2O_3 и $SrTiO_3$. Изучена кристаллическая структура, химический состав и люминесценция выращенных пленок.

Ключевые слова: ионы Eu, эпитаксиальные пленки, лазерная молекулярно-лучевая эпитаксия.

Активация редкоземельными ионами широкозонных оксидных материалов открывает обширные возможности для их применений в различных областях фотоники. Одной из таких быстро развивающихся областей является редкоземельная квантовая нанофотоника, нацеленная на создание нового класса эффективных и масштабируемых устройств, таких как оптические запоминающие устройства, источники одиночных фотонов и оптико-микроволновые преобразователи. Макроскопические объемные матрицы, хотя и обладают совершенной кристаллической структурой, часто трудны для выращивания и не дают перспективы масштабируемого производства, необходимого для будущих квантовых технологий. В качестве альтернативы можно использовать высококачественные субмикронные пленки из легированных редкоземельными ионами материалов. Одним из наиболее перспективных методов синтеза таких пленок является лазерная молекулярно-лучевая эпитаксия, примененная в настоящей работе для создания двух видов гетероструктур, содержащих ионы европия, и привлекательных для применений в редкоземельной фотонике:

1) субмикронные слои $Y_2O_3:Eu$ на подложках $Al_2O_3(0001)$ и $SrTiO_3(001)$. В полученных нами слоях легированного европием оксида иттрия неоднородная ширина линии перехода ${}^5D_0-{}^7F_0$, наиболее важного для применений в квантовых оптических устройствах, составляет всего около 10 ГГц, что намного меньше ширины этого перехода в пленках, содержащих ионы Eu^{3+} и выращенных методами ALD и CVD, рассмотренными в относительно недавнем обзоре [1];

2) эпитаксиальные гетероструктуры 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 и рентгеновских лучей показали, что несмотря на появление вакансий, структура шеелита сохраняется в широком диапазоне значений x . Этот эффект может быть объяснен стабилизирующим влиянием подложки $SrTiO_3$. Наличие таких вакансий приводит к переходу на них электронов с двух ближайших ионов Eu^{2+} и образованию ионов Eu^{3+} , т.е. $2Eu^{2+} + V_{Eu}^0 \rightarrow 2Eu^{3+} + V_{Eu}^{2-}$. Таким образом, меняя отношение числа атомов Eu и Mo можно менять относительные доли ионов Eu^{2+} и Eu^{3+} , имеющих совсем разные оптические свойства, (рисунок).

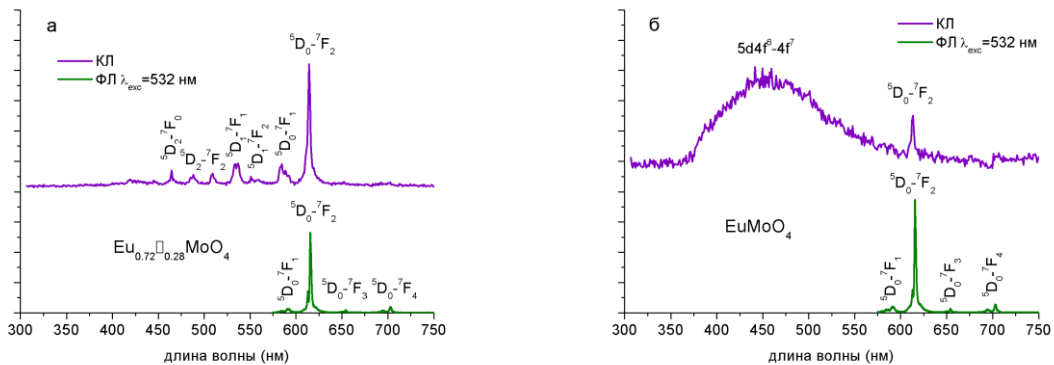


Рисунок. Спектры фото- (ФЛ, зеленые кривые) и катодолуминесценции (КЛ, фиолетовые кривые) ионов Eu^{3+} и Eu^{2+} в эпитаксиальных слоях $Eu_x(1-x)MoO_4$ (\square — вакансии) в образцах с различным значением x :
а — $x=0.72$, б — $x=1.0$. $T=300$ K

[1] Zhong T., Goldner P., *Nanophotonics*, **8**, 2003-2015, (2019).

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ YVO_4 , ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er^{3+} , Tm^{3+} , Nd^{3+} , ДЛЯ ЗАЩИТНОЙ МАРКИРОВКИ
Медведев В.А.¹, Мамонова Д.В.¹, Калинин А.А.¹, Михайлов М.Д.², Маньшина А.А.¹, Колесников И.Е.¹

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

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Нанокристаллические порошки YVO_4 были получены с помощью модификации метода Печини. Были исследованы люминесцентные свойства частиц YVO_4 . Разработан метод защитной маркировки стальной пластины.

Ключевые слова: люминесценция, защитная маркировка, редкоземельные ионы.

В настоящее время проблема широкого распространения подделок как никогда актуальна – современные технологии позволяют создавать изделия, неотличимые от оригиналов, что несёт в себе значительную угрозу для государственных органов и производителей различных видов продукции. Используемые методики защиты необходимо совершенствовать, чтобы идти в ногу со временем, в связи с чем в научном сообществе актуальным стал вопрос разработки новых способов борьбы с контрафактами. Создание сложной оптической системы в наноразмерном объекте позволяет получить защитный маркер, который не виден глазом из-за малого размера и при этом содержит уникальные спектральные характеристики, которые невозможно повторить без информации о составе и методе синтеза. Создание такой системы возможно при комбинировании сразу нескольких типов редкоземельных ионов.

В качестве среды для легирования группы редкоземельных ионов часто используются кристаллические матрицы оксидов. Преимуществом такого класса веществ является высокая химическая инертность и стабильность физических и химических свойств в широком температурном диапазоне. За счёт высокой устойчивости используемых в качестве защитных маркеров материалов их можно внедрять в поверхность защищаемых объектов посредством нанесения за счёт расплавления лазером верхнего слоя металла, что позволяет также помимо спектральной кодировки использовать дополнительные усиления защиты, такие как имиджинг и др. В связи с отсутствием какой-либо эффективной общепринятой методики маркировки металлических изделий, данные материалы могут найти широкое применение в таких областях деятельности, как военное и гражданское машиностроение, производство высокоточного оборудования и т.д.

В данной работе порошки YVO_4 , легированные ионами Er^{3+} , Tm^{3+} и Nd^{3+} , были синтезированы с использованием стандартного и модифицированного метода Печини [1, 2]. Получены и проанализированы результаты рентгеноструктурного анализа (РФА), морфологии (СЭМ) и люминесцентной спектроскопии.

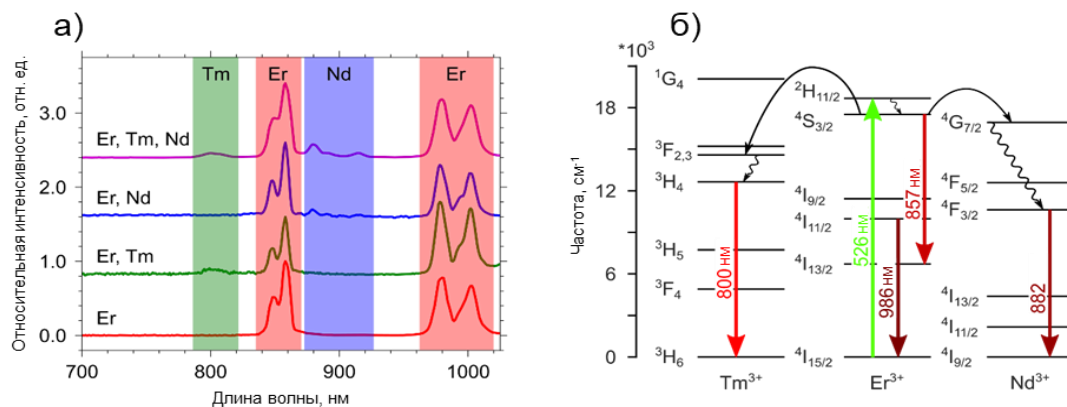


Рисунок. а) Спектры люминесценции, б) схема передачи энергии между ионами для одно-, дву- и трилегированных образцов $YVO_4: Nd^{3+} 0.03 \text{ ат.}\%$, $Er^{3+} 3 \text{ ат.}\%$, $Tm^{3+} 1 \text{ ат.}\%$ при возбуждении на длине волны 526 нм

Авторы благодарны Ресурсным Центрам ОЛМИВ, РДМИ и МРЦ-НТ Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета. Исследование выполнено в рамках гранта РФФ № 21-79-10018.

[1] Shubina I.M., Kolesnikov I.E., Olshin P.K., Likholetova M.V., Mikhailov M.D., Manshina A.A., Mamonova D.V., *Ceramics International*, **48**, 15832-15838, (2022).

[2] Medvedev V.A., Kolesnikov I.E., Olshin P.K., Mikhailov M.D., Manshina A.A., Mamonova D.V., *Materials*, **15**, (2022).

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КЛАСТЕРОВ СЕРЕБРА В СТЕКЛООБРАЗНЫХ МАТРИЦАХ

Миронов Л.Ю., Санникова М.Д., Марасанов Д.В., Слобожанинов А.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Были исследованы особенности люминесценции кластеров серебра в силикатном стекле при изменении температуры от 93 до 473 К. Показано, что температурное тушение флуоресценции обусловлено термически-активированной интеркомбинационной конверсией.

Ключевые слова: кластеры серебра, люминесценция, тушение люминесценции.

Кластеры серебра в стеклообразных матрицах являются перспективным люминесцентным материалом из-за их эффективной и широкополосной люминесценции. В ряде работ было показано, что люминесценция кластеров серебра в стекле имеет высокий квантовый выход до 90 % и покрывает весь видимый диапазон при УФ возбуждении [1-3]. Для разработки устройств на основе материалов с кластерами серебра необходимо детальное изучение механизмов безызлучательных потерь энергии, в том числе температурного тушения люминесценции, поскольку при использовании в составе светодиодных источников белого света может происходить значительный нагрев материала.

Для определения механизмов тушения люминесценции были исследованы кластеры серебра в стекле системы $\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-F}$ с примесью 0,002 мол. % Sb_2O_3 . Для формирования кластеров серебра исходное стекло было подвергнуто ионному обмену в расплавах $\text{NaNO}_3/\text{AgNO}_3$ (0,1–5 мол. % AgNO_3) с последующей термообработкой при температуре 450 °С в течение 24 часов. Измерение спектров люминесценции при изменении температуры от 93 до 473 К показало, что наблюдается спектральная неоднородность температурной зависимости люминесценции (рис. а). При понижении температуры значительно увеличивается интенсивность флуоресценции ($\tau_f=1,6\text{-}3$ нс) кластеров серебра в синей области спектра. Люминесценция кластеров была разделена на флуоресценцию и фосфоресценцию ($\tau_p\sim 100$ мкс) с помощью спектроскопии с временным разрешением. Зависимость флуоресценции от температуры была аппроксимирована с помощью уравнения Аррениуса (рис. б). Было обнаружено, что температурное тушение флуоресценции происходит через два состояния с различной энергией активации.

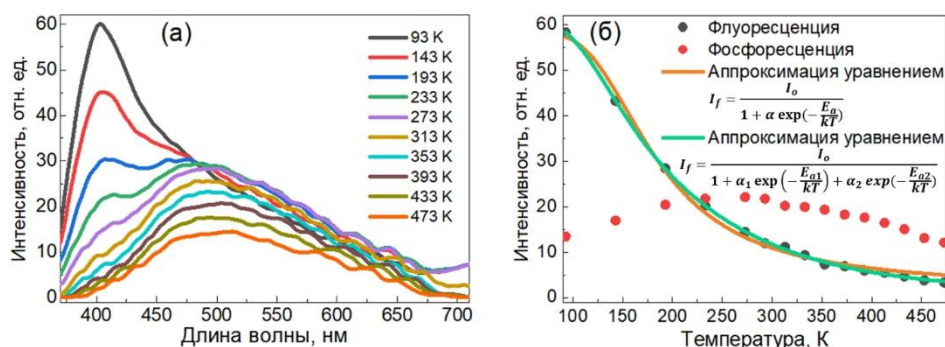


Рисунок. (а) Спектры люминесценции кластеров серебра при различных температурах, $\lambda_{ex} = 340$ нм. (б) Температурные зависимости интенсивности флуоресценции и фосфоресценции, $\lambda_{ex} = 340$ нм

На основании исследования концентрационной серии кластеров серебра в стекле показано, что наблюдаемые эффекты обусловлены термически-активированной интеркомбинационной конверсией, а не предложенным ранее механизмом термически-активированного переноса энергии [4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-73-10055).

[1] Ren K., Xu X., Yao Z., Chen X., Hu T., Li P., Fan X., Du J., Qiao X., Qian G., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **22**, 21307-21316, (2020).
 [2] Ma R., Qian J., Cui S., Qiao X., Wang F., Fan X., *J. Lumin.*, **152**, 222–225, (2014).
 [3] Chen X., Zhao J., Xu X., Ren K., Luo X., Sun X., Qiao X., Fan X., Qian G., Han G., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **20**, 23942-23947, (2018).
 [4] Mironov L.Yu., Marasanov D.V., Ulshina M.D., Sgibnev Y.M., Kolesnikov I.E., Nikonov N.V., *J. Phys. Chem. C*, **126**, 13863-13869, (2022).

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СЕНСОРОВ Nd³⁺, Yb³⁺:YF₃ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Пудовкин М.С., Олейникова Е.И.

Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия

Наночастицы Nd³⁺,Yb³⁺:YF₃ продемонстрировали высокую температурную чувствительность в широком диапазоне температур. Механизм температурной чувствительности включает в себя процессы фононной передачи энергии между легирующими ионами и искажение решетки из-за явления теплового расширения.

Ключевые слова: зависимость параметров кристаллической решетки от температуры, температурная чувствительность, Nd³⁺, Yb³⁺:YF₃.

В современном мире существует потребность в бесконтактных способах измерения температуры с высоким пространственным разрешением для гипертермии и сенсорики мироустройств. Метод люминесцентной термометрии, основанный на наночастицах, легированных Nd³⁺/Yb³⁺, является очень перспективным. Целью данной работы является спектрально-кинетическая характеристика наночастиц Nd³⁺ (0.1 и 0.5 мол.%), Yb³⁺ (0, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 и 3.0 мол.%):YF₃ для вывода о механизме температурной чувствительности.

По литературным данным системы Nd³⁺,Yb³⁺:YF₃ демонстрируют три зависящих от температуры процесса переноса энергии: фононный перенос энергии от Nd³⁺ к Yb³⁺, обратный перенос от Yb³⁺ к Nd³⁺ и диффузия энергии между Yb³⁺. Мы вводим LIR (Luminescent Intensity Ratio) в качестве параметра, зависящего от температуры (Рис. 1 и 2). Рисунок 1 полностью согласуется с процессами передачи энергии, описанными ранее. При низких температурах вероятность рождения фононов мала, следовательно, передача на Yb³⁺ минимальна. Для данной серии образцов максимальной температурной чувствительностью обладает образец с 0.5 мол.% Yb³⁺ (0,0012 K⁻¹ при 310 K). Неожиданный характер температурной зависимости LIR на рисунке 2 от 80-220 K можно объяснить следующим образом. Была предположена гипотеза, что увеличение LIR с ростом температуры связано со сжатием кристаллической решетки образца при низких температурах (как следствие, уменьшаются расстояния между ионами активаторами), вследствие чего увеличивается вероятность взаимодействия ионов активаторов [1, 2]. Известно, что взаимодействие между Nd³⁺ и Yb³⁺ диполь-дипольное, а оно зависит от расстояния r⁻⁶. Для данной серии образцов максимальной температурной чувствительностью обладает образец с 0.1 мол.% Yb³⁺ (0,002 K⁻¹ при 100 K).

Исследование выполнено за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности. Проект FZSM-2022-0021.

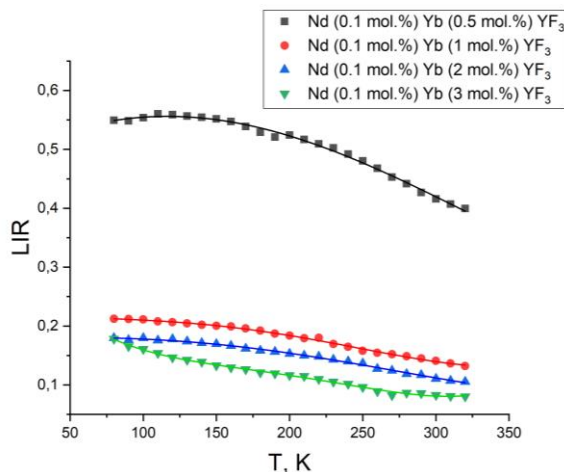


Рис. 1. LIR образцов Nd³⁺(0,1 мол.%), Yb³⁺(0,5 мол.%):YF₃ (черный), Nd³⁺(0,1 мол.%), Yb³⁺(1 мол.%):YF₃ (красный), Nd³⁺(0,1 мол.%), Yb³⁺(2 мол.%):YF₃ (синий) и Nd³⁺(0,1 мол.%), Yb³⁺(3 мол.%):YF₃ (зеленый), аппроксимированный полиномом 4 порядка

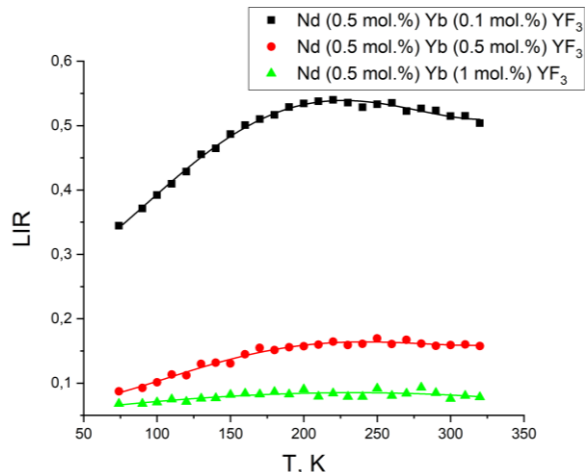


Рис. 2. LIR образцов Nd³⁺(0,5 мол.%), Yb³⁺(0,1 мол.%):YF₃ (черный), Nd³⁺(0,5 мол.%), Yb³⁺(0,5 мол.%):YF₃ (красный) и Nd³⁺(0,5 мол.%), Yb³⁺(1 мол.%):YF₃ (зеленый), аппроксимированный полиномом 4 порядка

- [1] Pudovkin, M., Oleynikova, E., Kiiamov A. et al., *Materials*, **16**(1), 39, (2022).
 [2] Ginkel A., Pudovkin M., Oleynikova E. et al., *Photonics*, **10**(4), 375, (2023).

**ПРИРОДА ОКРАСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ
ЦИНКОВОАЛЮМОСИЛИКАТНЫХ СТЕКЛОКЕРАМИК НА ОСНОВЕ
НАНОКРИСТАЛЛОВ ГАНИТА**

Дымшиц О.С.^{1,2}, Алексеева И.П.², Хубецов А.А.²,
Запалова С.С.², Центр М.Я.², Жилин А.А.³

¹ФТИ имени А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия

³АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

Исследована природа окраски стеклокерамик с диоксидом титана в качестве нуклеатора кристаллизации и наноразмерными кристаллами ганита. Интенсивное широкополосное поглощение в видимой области спектра обусловлено октаэдрически координированными ионами Ti^{3+} в кристаллах ганита.

Ключевые слова: нанокристаллы, алюмоцинковая шпинель, ионы титана.

Для введения ионов переменной валентности в низших степенях окисления (Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cr^{2+} , etc) [1] в прозрачные титансодержащие стеклокерамики на основе нанокристаллов шпинелей необходимо исследование влияния окислительно-восстановительных условий синтеза исходных стекол на структуру и свойства неактивированных матриц.

В работе синтезированы модельные стекла цинковоалюмосиликатной системы [2] массой 400 г. в тиглях из кварцевой керамики в окислительных (ox) и слабо восстановительных (red) условиях при температуре 1580 °С в течение 3 часов с принудительной гомогенизацией расплава, отлиты на металлическую плиту и отожжены при температуре 680 °С. На основании данных дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) проведена вторичная термообработка в интервале температур 720 – 1300 °С. Анализ кривых ДСК подтвердил, что условия синтеза не влияют на природу выделяющихся фаз и температуры их появления. Прозрачные стеклокерамики серой (red) и желтоватой (ox) окраски получены термообработкой в интервале температур 720 – 1050 °С и исследованы методами рентгенофазового анализа (РФА) и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Спектры поглощения исходных стекол и СКМ измерены в спектральном диапазоне 300 – 3300 нм (рисунок).

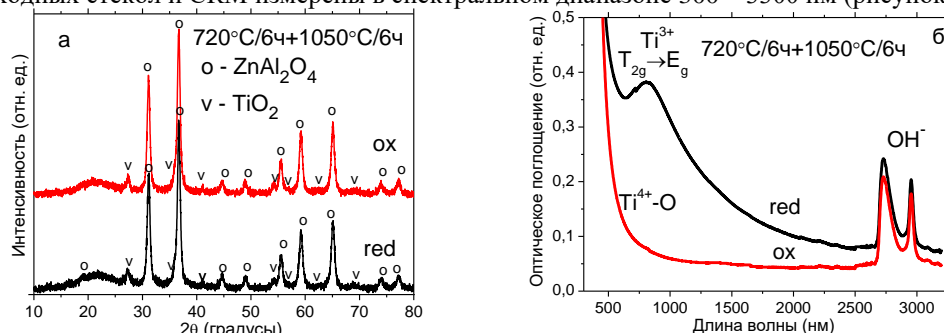


Рисунок. Дифрактограммы (а), спектры поглощения и фотографии (б) стеклокерамик. Режимы термообработки приведены на рисунках

Основной кристаллической фазой во всех стеклокерамиках являются нанокристаллы $ZnAl_2O_4$ (ганита) со структурой шпинели размером 5 – 40 нм. С повышением температуры термообработки объемная доля и размеры кристаллов увеличиваются. В интервале температур 1000 – 1300 °С дополнительно выделяются нанокристаллы TiO_2 (рутил) размером 11 – 50 нм и SiO_2 (кristобалит, при 1300 °С). Обнаруженные фазовые превращения подтверждаются данными спектроскопии КРС.

В образцах, синтезированных в red условиях, наблюдается широкополосное поглощение в области 400 – 1200 нм, обусловленное переходом $T_{2g} \rightarrow E_g$ ионов Ti^{3+} в октаэдрических позициях в нанокристаллах $ZnAl_2O_4$. Его интенсивность возрастает с ростом объемной доли $ZnAl_2O_4$. В образцах, синтезированных в окислительных условиях, поглощение света обусловлено полосой переноса заряда $Ti^{4+} - O^{2-}$ и рассеянием света на высокопреломляющих кристаллах $ZnAl_2O_4$.

Изменение red-ox условий синтеза стекол позволяет управлять содержанием ионов титана в различных степенях окисления в нанокристаллах $ZnAl_2O_4$, а значит, и спектральными свойствами материалов, что важно для создания перспективных материалов лазерной техники.

Авторы выражают благодарность К.Н. Еремееву и Л.Р. Басыровой за помощь с экспериментом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Грант 23-23-00446).

[1] Eremeev K., Basyrova L., Dymshits O., Balabanov S., Belyaev A., Alekseeva I., Khubetsov A., Tsenter M., Volokitina A., Zhilin A., Popkov V., Loiko P., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2086**, 012138(1-6), (2021).

[2] Golubkov V.V., Dymshits O.S., Petrov V.I., Shashkin A.V., Tsenter M.Ya., Zhilin A.A., Kang U., *J. Non-Cryst. Solids*, **351**, 711-721, (2005).

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ОБЛУЧЕНИЯ НА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОЧАСТИЦ Ag-AgBr, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В СТЕКЛЯННОЙ МАТРИЦЕ С ПОМОЩЬЮ ИОННОГО ОБМЕНА

Марасанов Д.В., Безруков П.А., Сгибнев Е.М., Никоноров Н.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В этой работе сравнивается фотокаталитическая активность стеклокерамики с металл-полупроводниковыми наночастицами Ag-AgBr при облучении УФ ртутной лампой и длинами волн видимого диапазона 405, 532 и 633 нм.

Ключевые слова: фотокатализ, металл-полупроводниковые наночастицы Ag-AgBr, ионный обмен.

Фотокатализ находит применение в очистке сточных вод, очистке воздуха, восстановлении диоксида углерода, производстве водорода, самоочищающихся поверхностях, дезинфекции и т. д. [1]. Фотокаталитические реакции протекают путем возбуждения электронов и дырок в полупроводниковых материалах, которые затем мигрируют на поверхность полупроводника, активируя каталитические окислительно-восстановительные реакции. Использование гибридных плазмонных наночастиц, состоящих из металлического ядра и полупроводниковой оболочки, является очень перспективным методом увеличения выхода электронно-дырочных пар и фотокаталитической активности [2, 3]. Однако до сих пор не изучены фотокатализаторы, способные эффективно генерировать электронно-дырочные пары при облучении не только в УФ области спектра, но также и в видимом диапазоне. Цель работы - изучение фотокаталитических свойств гибридных наночастиц Ag-AgBr, синтезированных в стеклянной матрице методом $\text{Na}^+\text{-Ag}^+$ ионного обмена, при облучении УФ ртутной лампой и длинами волн видимого диапазона 405, 532 и 633 нм.

Для исследования были синтезированы силикатные стекла на основе системы $\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-NaBr}$. Ионы серебра вводились в образцы полированного стекла с помощью $\text{Na}^+\text{-Ag}^+$ ионного обмена при погружении образцов в расплав солей $\text{AgNO}_3/\text{NaNO}_3$ при 320 °C на 2 часа. Последующая термообработка при 500 °C в течение 3 часов использовалась для стимулирования роста наночастиц Ag, AgBr или Ag-AgBr в зависимости от примесей стекла. Фотокаталитические свойства изучались путем измерения спектров поглощения водного раствора красителя метилового оранжевого (МО) (1 мг красителя на 100 мл H_2O) при облучении ртутной лампой в УФ-видимой области и лазерами с длиной волны 405, 532 и 633 нм с образцом и без него в кювете.

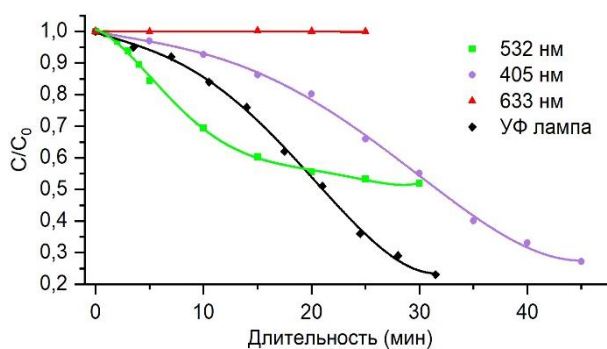


Рисунок. Дegradация водного раствора МО в присутствии фотокатализатора со стеклокерамикой Ag-AgBr при разной длине волны облучения

В ходе эксперимента наблюдалась эффективная деградация МО красителя в присутствии фотокатализатора на основе Ag-AgBr после облучения ртутной лампой и лазером длиной волны 405 нм (рисунок). Гибридные наночастицы Ag-AgBr успешно сочетают высокую скорость генерации горячих электронов в металлическом ядре и гораздо более длительное время жизни горячих электронов и дырок в полупроводниковой оболочке. Формирование электронно-дырочных пар с ростом длины волны облучения от 405 до 633 нм снижается вследствие уменьшения поглощения серебряных наночастиц вблизи красной и ИК области спектра.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-19-00559.

[1] Han, L., Wang, P., Zhu, C., Zhai, Y., Dong, S., *Nanoscale*, **3**, №7, 2931-2935, (2011).

[2] Dong R., Tian B., Zeng C., Li T., Wang T., Zhang J., *The Journal of Physical Chemistry C*, **117**, №1, 213-220, (2013).

[3] Марасанов Д.В., Сгибнев Е.М., Никоноров Н.В., *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, **22**, №3, 509-516, (2022).

ЭФФЕКТ СО-ЛЕГИРОВАНИЯ ЛАНТАНОИДАМИ НА СТРУКТУРУ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НЕОРГАНИЧЕСКИХ ФТОРИДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Мерещенко А.С., Бетина А.А., Булатова Т.С., Богачев Н.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Синтезированы новые наноматериалы: NaYF₄: Eu, Gd/Lu, NaYF₄: Tb, Gd/Lu/La и NaYF₄: Sm, Gd/Lu/La, NaYF₄: Yb, Ho, Gd/Lu/La. Изучено влияние концентрации лантаноидов на морфологию частиц, структуру и люминесцентные свойства.

Ключевые слова: люминофоры, лантаноиды, наноматериалы.

В рамках данной работы методом гидротермального синтеза получены новые серии соединений с целью определения влияния концентрации лантаноидов на морфологию наночастиц, фазовый состав, параметры элементарной ячейки и люминесцентные свойства нанокристаллических стоксовых люминофоров состава NaYF₄: Eu, Gd/Lu, NaYF₄: Tb, Gd/Lu/La и NaYF₄: Sm, Gd/Lu/La и антистоксовых люминофоров состава NaYF₄: Yb, Ho, Gd/Lu/La [1-3]. Рентгенофазовый анализ показал, что все полученные соединения кристаллизуются в гексагональной фазе β-NaYF₄ что показывает способность ионов Eu³⁺, Tb³⁺, Sm³⁺, Yb³⁺, Ho³⁺, La³⁺, Gd³⁺ и Lu³⁺ изоморфно замещать ионы Y³⁺ в кристаллической решётке полученных образцов. Образцы NaY_{0.6-x}Tb_{0.4}La_xF₄, NaY_{0.98-y}Sm_{0.02}La_yF₄ и NaY_{0.78-z}Yb_{0.2}Ho_{0.02}La_zF₄ кристаллизовались в виде β-NaYF₄ при содержании лантана менее 20 ат. % При концентрации ионов лантана более 60 ат. % указанные серии соединений кристаллизовались только в виде LaF₃ (JCPDS № 32-0483). Анализ морфологии полученных веществ с помощью сканирующей электронной спектроскопии показал, что образцы состоят из частиц, имеющих форму гексагональных призм размером от 40 до 1800 нм. Анализ частиц серии NaY_{0.8-x}Yb_{0.2}Ho_xF₄ показал, что концентрация ионов гольмия не влияет ни на форму, ни на размер частиц. Для соединений NaY_{1-x}Ln_xF₄ (Ln = Eu, Tb, Sm) замещение иттрия на более крупные ионы европия, тербия или самария приводит к уменьшению размера частиц. При легировании NaY_{0.7}Eu_{0.3}F₄, NaY_{0.6}Tb_{0.4}F₄, NaY_{0.98}Sm_{0.02}F₄ и NaY_{0.78}Yb_{0.2}Ho_{0.02}F₄ ионами лантана и гадолия, которые имеют больший радиус, чем у иттрия. Для частиц NaY_{0.6}Tb_{0.4}F₄, NaY_{0.98}Sm_{0.02}F₄ и NaY_{0.78}Yb_{0.2}Ho_{0.02}F₄ при концентрации La³⁺, начиная с 40 мол. % обнаружены два типа гексагональных частиц: крупные частицы в кристаллической структуре β-NaYF₄ и мелкие частицы в кристаллической фазе LaF₃. Частицы LaF₃ имеют значительно меньшие размеры и форму «таблетки». Были изучены люминесцентные свойства синтезированных соединений. При возбуждении светом с длиной волны 401 нм образцы с Sm³⁺ демонстрировали полосы люминесценции с максимумами при 561, 595, 646 и 703 нм. Мольная доля Sm³⁺, соответствующая максимальной эффективности люминесценции, составляет 0,02. Образцы, легированные Tb³⁺, демонстрировали полосы люминесценции с максимумами при 489, 544, 584, 591 и 616 нм. Мольная доля Tb³⁺, соответствующая максимальной эффективности люминесценции, составляет 0,4. При возбуждении образцов, содержащих ионы Eu³⁺, светом длиной волны 394 нм наблюдались следующие максимумы люминесценции: ⁷F₀ - ⁵K₆ (266 нм), ⁷F₀ - ⁵I₆ (284 нм), ⁷F₀ - ⁵F₁ (292, 297, 300 нм), ⁷F₀ - ⁵L₈ (316 нм), ⁷F₀ - ⁵D₄ (361 нм), ⁷F₀ - ⁵G₁ (375, 380, 384 нм), ⁷F₀ - ⁵D₃ (415 нм), ⁷F₀ - ⁵D₂ (464 нм), F₀ - ⁵D₁ (524, 534 нм), и ⁷F₁ - ⁵D₀ (590 нм). Мольная доля Eu³⁺, соответствующая максимальной эффективности люминесценции, составляет 0,3. Образцы, легированные Ho³⁺ и Yb³⁺, проявляли антистоксовую люминесценцию: при возбуждении светом с длиной волны 980 нм наблюдались полосы люминесценции с максимумами при 540, 647, 752 нм. Мольная доля Ho³⁺, соответствующая максимальной эффективности люминесценции, составляет 0,02. Со-легирование материалов NaY_{0.98}Sm_{0.02}F₄, NaY_{0.7}Eu_{0.3}F₄, NaY_{0.6}Tb_{0.4}F₄ и NaY_{0.78}Yb_{0.2}Ho_{0.02}F₄, ионами Gd³⁺, Lu³⁺ привело к увеличению интенсивности люминесценции.

Исследования проведены с использованием оборудования ресурсных центров Научного парка СПбГУ «Нанотехнологии», «Оптические и лазерные методы исследования вещества», «Термогравиметрические и калориметрические методы исследования», «Криогенный отдел», «Методы анализа состава вещества», «Рентгенодифракционные методы исследования», «Инновационные технологии композитных наноматериалов», «Магнитно-резонансные методы исследования». Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД-1191.2022.1.3).

[1] Bogachev N.A., Betina A.A., Bulatova T.S., Nosov V.G., Kolesnik S.S., Tumkin I.I., Ryazantsev M.N., Skripkin M.Y., Mereshchenko A.S., *Nanomaterials*, **12**, №17, 2972, (2022).

[2] Betina A.A., Bulatova T.S., Kolesnikov I.E., Bogachev N.A., Skripkin M.Yu., Mereshchenko A.S., *Russ. J. Gen. Chem.*, **92**, №12, 2832-2837, (2022).

[3] Nosov V.G., Betina A.A., Bulatova T.S., Guseva P.B., Kolesnikov I.E., Orlov S.N., Panov M.S., Ryazantsev M.N., Bogachev N.A., Skripkin M.Y., Mereshchenko A.S., *Materials*, **16**, №6, 2157, (2023).

**ВЛИЯНИЕ ИОНОВ НЕОДИМА НА ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ
ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОГО СТЕКЛА**

Нассер Х., Никоноров Н.В., Игнатьев А.И., Миронов Л.Ю.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Легирование фото-термо-рефрактивного стекла ионами неодима приводит к росту полос поглощения ионов неодима в УФ области и перекрыванию ими полосы поглощения ионов церия, отвечающих за фоточувствительность стекол, и безызлучательному переносу энергии возбуждения от ионов церия к ионам неодима. Эти эффекты приводят к уменьшению модуляции показателя преломления в брэгговских решетках, записанных в данных неодимовых стеклах.

Ключевые слова: фото-термо-рефрактивное стекло, фоточувствительность, перенос энергии.

Фото-термо-рефрактивное (ФТР) стекло является мультифункциональным материалом, который можно активировать редкоземельными ионами и одновременно записать в нем брэгговскую решетку, что дает потенциальную возможность создания лазеров с распределенной обратной связью [1].

Ионы церия определяют спектральную фоточувствительность стекла и являются донорами фотоэлектронов; ионы серебра и сурьмы, входящие в состав стекла, выполняют роль акцепторов фотоэлектронов. Так, при термообработке ионы серебра участвуют в захвате фотоэлектронов и формировании серебряных кластеров и наночастиц, выполняющих роль центров кристаллизации, а ионы брома и фтора участвуют в процессе кристаллизации с образованием на серебряных наночастицах оболочки из бромида серебра и наноразмерных кристаллов фторида натрия, объемная доля которых определяет модуляцию показателя преломления в брэгговской решетке [2].

В данной работе брэгговские решетки были записаны в исходном ФТР стекле и стеклах, активированных ионами неодимом. Было замечено, что для достижения максимального значения амплитуды модуляции показателя преломления в брэгговских решетках, записанных в неодимовых ФТР стеклах, необходимо увеличить дозу облучения, по сравнению с исходным стеклом. Этот сдвиг был пояснен влиянием двух эффектов: (i) ростом полос поглощения ионов неодима в УФ области и перекрыванию ими полосы поглощения ионов церия, отвечающих за фоточувствительность стекол, и (ii) безызлучательным переносом энергии возбуждения с ионов церия на ионы неодима при записи.

Для получения коэффициентов переноса энергии от ионов церия к ионам неодима были записаны кривые затухания люминесценции ионов церия (рисунок).

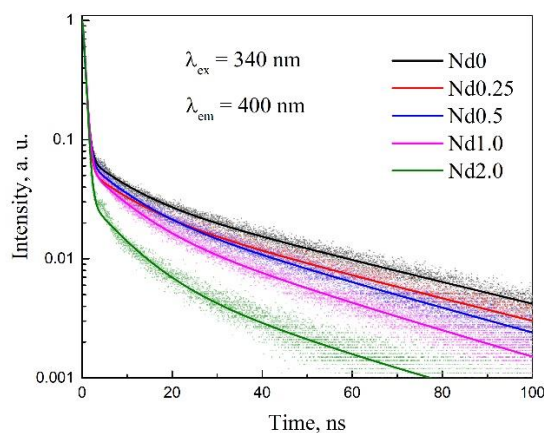


Рисунок. Кривые затухания люминесценции ионов церия в фото-термо-рефрактивных стеклах, активированных ионами неодима

Было получено, что коэффициент переноса энергии увеличивается от 5 до 37% при повышении концентрации неодима с 0,25 до 2,0 мол%. На основе расчета коэффициента переноса энергии и наблюдения перекрытия полос ионов неодима и церия в спектрах поглощения был сделан вывод, что эти эффекты приводят к уменьшению числа генерируемых фотоэлектронов от ионов церия при записи брэгговских решеток и, следовательно, снижению модуляции показателя преломления в решетках.

[1] Nasser K., Aseev V., Ivanov S., Ignatiev A., Nikonorov N., *Journal of Luminescence*, **213**, 255-262, (2019).

[2] Nikonorov N., Aseev V., Dubrovin V., Ignatiev A., Ivanov S., Sgibnev E., *Springer*, **218**, 83-113, (2018).

СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ЛЮМИНОФОРОВ
 $\text{LiY}_x\text{Gd}_{1-x}\text{F}_4$ И $\text{LiGdF}_4:\text{Eu}^{3+}$ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ
 КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И СЕНСОРИКИ

Олейникова Е.И., Пудовкин М.С., Морозов О.А., Кorableва С.А.

Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия

В данной работе впервые определен коэффициент распределения ионов Gd^{3+} в матрице LiYF_4 ($k=0,84$), проведена спектрально-кинетическая характеристика образцов $\text{LiGd}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$ ($x=0,05$; $0,3$ и $0,7$) и $\text{LiGdF}_4:\text{Eu}^{3+}$.

Ключевые слова: $\text{LiGdF}_4:\text{Eu}^{3+}$, люминесцентная термометрия, коэффициент распределения иона.

Кристалл LiGdF_4 является новым сложносинтезируемым соединением, который представляет собой актуальный материал в квантовой электронике [1], сенсорике [2] и фотовольтаике [3].

К целям и задачам данной работы можно отнести спектрально-кинетическую характеристику кристаллических частиц $\text{LiY}_{1-x}\text{Gd}_x\text{F}_4$ ($X = 0.05, 0.3, 0.7$ и 1.0) и $\text{LiGdF}_4:\text{Eu}^{3+}$ (1 ат.%) в зависимости от температуры.

Впервые определен коэффициент распределения ионов Gd^{3+} в матрице LiYF_4 , который составляет $k=0,84$. Времена затухания люминесценции в диапазоне $100 - 300$ К ведут себя сложным образом (рис. 1), что, по-видимому, является следствием наложения процессов многофоновой безызлучательной релаксации и пленения излучения. Для образцов $\text{LiGd}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$ ($x=0,05$; $0,3$ и $0,7$) время затухания люминесценции укорачивается с увеличением температуры, особенно явно это становится заметно с $200-220$ К и происходит из-за доминирующего процесса многофоновой релаксации на дефектах. Однако для образца LiGdF_4 наблюдается обратная тенденция увеличение времени затухания люминесценции с ростом температуры из-за возрастания вклада процесса пленения излучения, начиная с 200 К.

При резонансном возбуждении ионов Gd^{3+} в $\text{LiGdF}_4:\text{Eu}^{3+}$ (1 ат.%) наблюдается интенсивный спектр люминесценции Eu^{3+} и практически не наблюдается спектр Gd^{3+} , что говорит об эффективной передаче энергии Gd^{3+} к Eu^{3+} (рис. 2). Данное наблюдение было проверено с помощью образца $\text{LiYF}_4:\text{Eu}^{3+}$ (3 ат.%), который при таком же возбуждении не демонстрировал люминесценцию Eu^{3+} . Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности исследуемых материалов в квантовой электронике, сенсорике и фотовольтаике.

Более того в данных образцов встречается еще два интересных с точки зрения температурной сенсорики процесса: интенсивное широкополосное излучение при низких температурах и процесс кросс-релаксации ионов Eu^{3+} , которые также заметно зависят от температуры.

Исследование выполнено за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности. Проект FZSM-2022-0021.

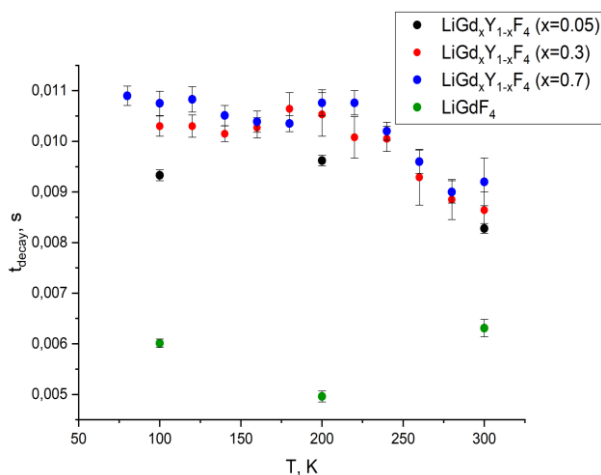


Рис. 1. Время затухания люминесценции (t_{decay}) образцов $\text{LiGd}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$ ($x=0,05$; $0,3$; $0,7$ и $1,0$) на длине волны 312 нм (${}^6\text{P}_{7/2}-{}^8\text{S}_{7/2}$) в диапазоне $100-300$ К

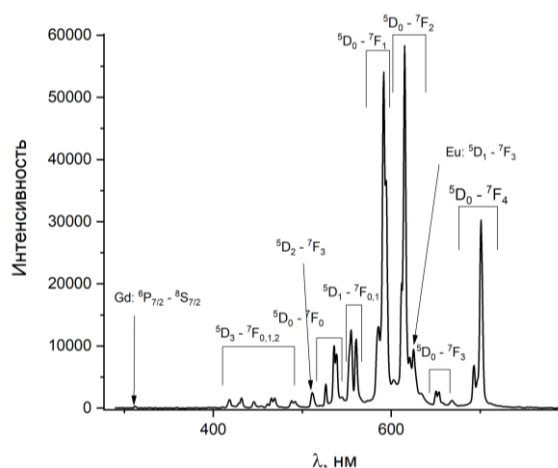


Рис. 2. Спектр люминесценции образца $\text{LiGdF}_4:\text{Eu}^{3+}$ (1 ат.%) при комнатной температуре

[1] Morozov O.A., Korableva S.L., Nurtdinova L.A. et al., *Optical Materials*, **137**, 113490, (2023).

[2] Aigouy L., Tessier G., Mortier M. et al., *Applied Physics Letters*, **87**(18), 184105, (2005).

[3] Sheoran S., *Progress in Natural Science: Materials International*, **29**(4), 457-465, (2019).

**ЗОЛОТО-ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ С
УПРАВЛЯЕМЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

Свинко В.О., Соловьева Е.В.

Институт химии, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлено систематическое исследование гибридных наносистем «металлическое ядро-полимерная оболочка-флуоресцентный краситель» методами электронной и флуоресцентной спектроскопии, гигантского комбинационного рассеяния. Из спектральных данных определена взаимосвязь состава и оптических свойств тройных наносистем.

Ключевые слова: гибридные материалы, цианиновые красители, плазмонные наночастицы.

Хорошо известно, что оптические свойства наночастиц (НЧ) благородных металлов можно настраивать, варьируя их размер и форму [1]. Однако природа и толщина оболочки, создаваемой вокруг плазмонных НЧ, также могут служить эффективным инструментом настройки их оптического отклика. Благодаря этому подобные гибридные системы могут найти применение в качестве оптических переключателей или меток для медицинской диагностики. Более того возможен дизайн наносистем, которые в зависимости от определенных параметров будут обладать меняющимся соотношением сигналов флуоресценции и гигантского комбинационного рассеяния (ГКР). Целью настоящей работы стало систематическое изучение влияния морфологии наночастиц золота, природы полимерной оболочки и флуоресцентного красителя на оптические свойства получаемых тройных систем.

Для решения задач работы синтезированы наночастицы золота различной морфологии (нанозвезды, нанокости, наностержни с аспектным соотношением 2,17, 2,76 и 3,33) и апробировано пять потенциально биосовместимых полиэлектролитов (поли(аллиламин)гидрохлорид), поли-L-лизин, разветвленный полиэтиленимин, полидиаллил-диметиламмоний хлорид и бычий сывороточный альбумин) в качестве материала оболочки. Для выбранных полиэлектролитов с помощью спектроскопии поглощения и флуоресценции также изучено их взаимодействие с различными функциональными производными красителя цианина 5.5 в фазе раствора и после их нанесения на металлическую поверхность. Для гибридных тройных систем (металлическое ядро, полимерная оболочка, флуоресцентный краситель) дополнительно зарегистрированы спектры гигантского комбинационного рассеяния.

Полученные результаты показали, что наиболее интенсивный оптический отклик производных цианина 5.5 обеспечивают золотые наночастицы в форме стержня со средним аспектным соотношением. При контакте полиэлектролитов с цианинами выявлено пять различных вариантов взаимодействия, определяемых в совокупности природой полимера, его концентрацией и зарядом функциональных групп красителя. При специфической адсорбции на молекулах бычьего сывороточного альбумина и неспецифической адсорбции на молекулах полидиаллил-диметиламмоний хлорида и поли-L-лизина наблюдалась интенсивная флуоресценция, доминирующая над сигналом ГКР. Напротив, взаимодействие с поли(аллиламин)гидрохлоридом и полиэтиленимином привело к поверхностной Н-агрегации в первую очередь сульфированных цианинов, что сопровождалось значительным тушением флуоресценции, но ростом интенсивности полос в спектрах ГКР. Сопоставление спектров поглощения и эмиссии красителей, полученных в растворах полимеров и на структурах «ядро-оболочка», показало, что характер взаимодействия краситель-полиэлектролит не меняется в дисперсных средах. Также из анализа полученных спектров впервые дифференцированы вклады в тушение флуоресценции красителя от плазмонного ядра и полимерной оболочки. В целом результаты работы демонстрируют возможность перенастройки оптических свойств гибридных тройных систем на основе наночастиц золота в пользу флуоресцентного, ГКР или бимодального отклика путем подбора состава оболочки.

Работа выполнена в рамках проекта СПбГУ 94031307 «Создание лаборатории плазмонно усиленной спектроскопии и биоимиджинга». Авторы выражают благодарность ресурсным центрам СПбГУ: «Методы анализа состава вещества», «Методы анализа состава вещества», «Нанотехнологии».

[1] Svinko V.O., Smirnov A.N., Shevchuk A.I., Demenshin A.I., Smirnov A.A., Solovyevs E.V., *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. Elsevier B.V.*, **226**, 113306, (2023).

ОПТИЧЕСКИЙ СЕНСОР ВЛАЖНОСТИ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ, ПОКРЫТЫХ ФТОРПОЛИМЕРОМ НАФИОН

Сгибнев Е.М., Тананаев П.Н., Шелаев А.В., Янковский Г.М., Барышев А.В.

ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

В работе исследуется оптический отклик на влажность сенсоров на основе золотых и серебряных наночастиц и влагочувствительного фторполимера. Продемонстрировано, что такие датчики могут достигать разрешения 0,3% в диапазоне относительной влажности 0-90%.

Ключевые слова: датчик влажности, плазмонный резонанс, нафион.

Детектирование влажности играет важную роль во многих областях науки и техники, включая медицину, системы кондиционирования, сельское хозяйство и промышленность [1]. Кроме того, анализ относительной влажности воздуха важен для корректной работы различных газовых датчиков, вследствие перекрёстной чувствительности [2, 3]. На сегодняшний день разработаны электрические датчики влажности, основанные на измерении ёмкости или сопротивления. Однако, оптические датчики, работа которых основана на изменении оптических характеристик (пропускания, отражения, длины волны, фазы), традиционно демонстрируют более высокую точность, а также невосприимчивы к внешнему электромагнитному полю. Основными критериями для датчиков влажности являются высокая чувствительность, широкий динамический диапазон чувствительности и малые времена отклика.

В данной работе исследуется отклик на влажность чувствительного элемента на основе наночастиц золота или серебра, характеризующихся свойством локализованного плазмонного резонанса и покрытых фторполимером нафион. Частицы золота получены термической обработкой сверхтонких плёнок золота толщиной 5 нм, изготовленных методом электронно-лучевого испарения. Частицы серебра получены термической обработкой стеклянных подложек, подвергнутых $\text{Na}^+\text{-Ag}^+$ ионному обмену с последующим отжигом на воздухе. Для исследования влияния относительной влажности образцы помещались в кювету с кварцевыми окнами, через которую продувался поток азота с контролируемым уровнем влажности от 0 до 90%. При изменении относительной влажности газа вследствие адсорбции влаги нафионом его диэлектрическая проницаемость и толщина меняются, что приводит к трансформации спектров пропускания образца. Пример изменения спектра пропускания при различных значениях относительной влажности и кинетическая кривая отклика чувствительного элемента на основе наночастиц золота, покрытых нафионом толщиной 300 нм, представлены на рисунке.

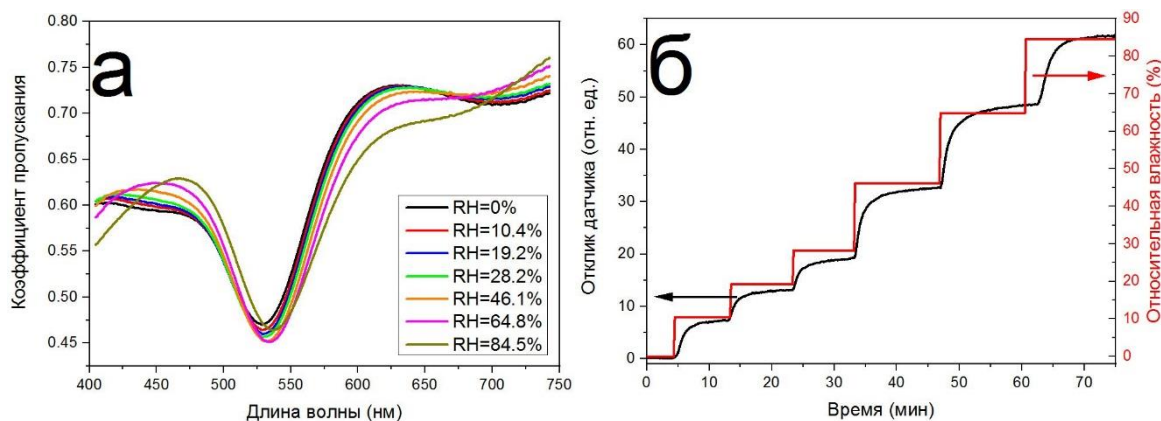


Рисунок. Спектры пропускания при различных значениях относительной влажности (а) и временная зависимость отклика (б) наночастиц золота, покрытых плёнкой нафиона толщиной 300 нм

Чувствительность исследованных сенсоров достигает 0,3% (определялась по уровню 3σ), что сопоставимо или превосходит характерные значения для коммерческих сенсоров. В работе также показано, что времена отклика и амплитуда существенно зависят от толщины нафиона и могут быть оптимизированы в зависимости от потенциального применения датчика. Кроме того, обсуждаются пути дальнейшего повышения чувствительности сенсора, разработан и опробован макет датчика влажности с чувствительным элементом на основе локализованного плазмонного резонанса золотых наночастиц, покрытых слоем нафиона.

- [1] Rao X., Zhao L., Xu L., et al., *Sensors*, **21**, №23, 8049, (2021).
- [2] Zhao Zh., Knight M., Kumar S., et al, *Sens. Actuators B*, **129**, №2, 726-733, (2008).
- [3] Wang Y., Zhou Y., *Materials*, **15**, №24, 8728, (2022).

**СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТОВ CsPbX₃ (X=Cl, Br, I) ВО
ФТОРОФОСФАТНЫХ СТЕКЛАХ**

Колобкова Е.В.^{1,2}

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²СПбГТИ(ТУ), Санкт-Петербург, Россия

Дан анализ влияния состава нанокристаллов и их размеров на характеристики люминесценции. Обнаружено увеличение квантового выхода и уменьшение полуширины полосы и стока сдвига при увеличении размеров нанокристаллов. Показано, что максимальный квантовый выход до 90% характерен для нанокристаллов CsPbBr₃, а при катионном или анионном замещении он заметно уменьшается вследствие формирования глубоких ловушек. Получены температурные зависимости сдвига зоны в диапазоне 80-600 К.

Ключевые слова: перовскит, нанокристалл, стекло.

Нанокристаллы перовскита состава (CsPbX₃, X =Cl, Br, I) обладают уникальными магнитными и оптические свойствами, включая высокий квантовый выход фотолюминесценции (PL QY, до 90%), узкий спектр излучения, регулируемый анионным и катионным замещением, а также размерным квантовым эффектом. Они являются перспективными материалами для создания солнечных батарей, лазеров, дисплеев и широкого круга других оптоэлектронных материалов. Влияние анионного и катионного замещения для изменения характеристик нанокристаллов перовскитов стало предметом многочисленных исследований [1, 2].

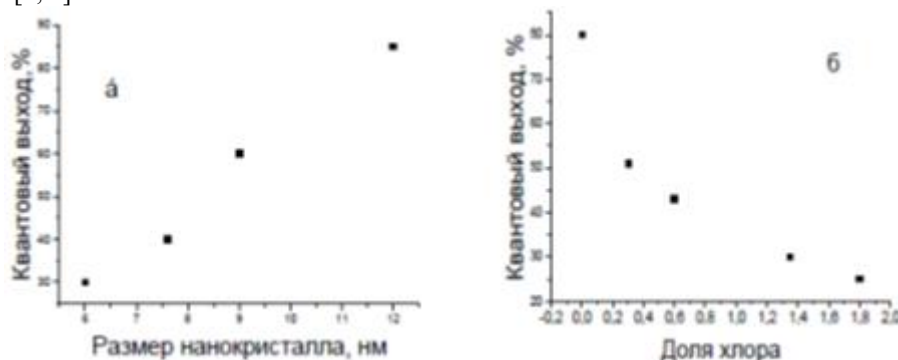


Рисунок. Зависимость квантового выхода люминесценции от размера квантовой точки (а) и содержания хлора в нанокристалле CsPbCl_xBr_{3-x} (б)

В работе были синтезированы квантовые точки состава CsPbCl_xBr_{3-x} и CsPbI_xBr_{3-x}. Для НК CsPbBr₃ обнаружено увеличение квантового выхода и уменьшение полуширины полосы и стока сдвига при увеличении размеров нанокристаллов (рис. а). Изучение температурных зависимостей в диапазоне 100- 600 К показало, что изменения характеристик НК CsPbBr₃ (температурный коэффициент сдвига энергии зоны E_g и уменьшение интенсивности люминесценции) происходят при 180 и 350 К, что соответствует изоструктурному фазовому переходу. При температурах выше 300 К коэффициент dE_g/dT зависит от размера НК и уменьшается более чем в 2 раза по сравнению со значениями объемных кристаллов. Показано, что катионное и анионное замещение приводит к сдвигу люминесценции в синюю область спектра, но сопровождается уменьшением квантового выхода. Обнаружено уменьшение квантового выхода при формировании НК CsPbCl_xBr_{3-x} (рис. б). Оказалось, что максимальная интенсивность люминесценции достигается в сине-зеленой области и в диапазоне 450-540 нм квантовый выход изменяется от 7 до 85%. При проведении катионного замещения свинец-кадмий сдвиг полосы люминесценции в диапазоне 460-530 нм приводит к уменьшению квантового выхода до 5% вследствие формирования глубоких ловушек.

Для квантовых точек состава CsPbI_xBr_{3-x} во фторофосфатном стекле характерен низкий (3-5%) квантовый выход. Получение люминесценции в диапазоне 620-700 нм может быть осуществлено на квантовых точках CsPbI₃ по механизму размерного квантования, однако КВ также невысок и составляет порядка 10 %. Причиной низкого квантового выхода в желто-красном спектральном диапазоне является низкая остаточная концентрация йода из-за низкой вязкости расплава стекла, сегрегация в процессе охлаждения и тенденция перехода НК в устойчивую неперовскитную δ- фазу.

[1] 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).

[2] Nedelcu G., Protesescu L., Yakunin S., Bodnarchuk M.I., Grotevent M.J., Kovalenko M.V., *Nano Lett.*, **15**, 5635, (2015).

ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ДИНАМИКА МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ
 $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{Nd}_2\text{O}_3$ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ

Артамонов Д.А., Цибульникова А.В., Самусев И.Г.,
 Брюханов В.В., Кожевников А.С.

ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта», Калининград, Россия

В данной работе проведен синтез и исследованы люминесцентные свойства нового оптически активного материала $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{Nd}_2\text{O}_3$. Этот материал представляет собой комплекс с апконверсионной генерацией.

Ключевые слова: апконверсия, фотовозбуждение, длительность дезактивации.

Разработка твердотельных лазеров является одним из важных направлений развития лазерной физики и квантовой электроники [1, 2]. Активная среда этих лазерных систем должна отвечать нескольким требованиям, включая высокий порог повреждения и теплопроводность, широкую полосу усиления, простоту изготовления и относительно короткое время обработки.

В настоящей работе установлено наличие эффективной красной апконверсионной люминесценции трехкомпонентного материала на основе $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{Nd}_2\text{O}_3$. Синтез данного материала представлял собой многостадийный термический процесс, конечным этапом которого было высокотемпературное спекание при $T=1250^\circ\text{C}$ ($t=3\text{ч}$) в муфельной печи. Непосредственно перед спеканием оксиды элементов подвергались тщательному истиранию в ступке. При $T=900^\circ\text{C}$ начинался процесс плавления смеси, в результате присутствия оксида висмута, температура плавления которого составляет $T=850^\circ\text{C}$. Расплавленный раствор, содержащий наночастицы оксида иттербия и оксида неодима, был отлит на поверхность. В результате отливки образец принимал форму капли диаметром 0,5 см. Полученный образец был исследован оптическими методами в видимом и ИК-диапазонах при возбуждении длиной волны 980 нм.

На рисунке представлена апконверсионная люминесценция материала при возбуждении длиной волны 980 нм.

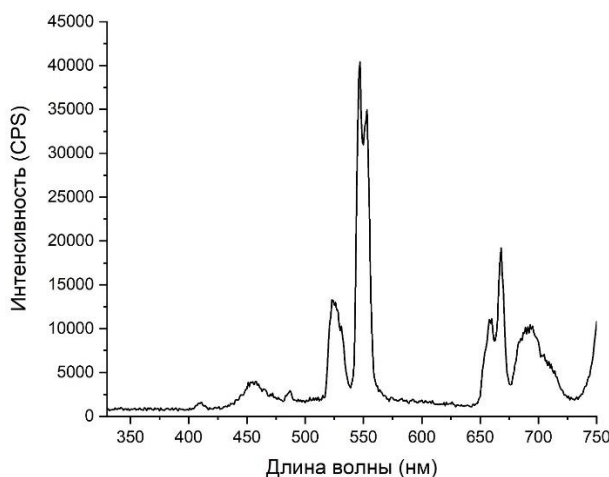


Рисунок. Спектры люминесценции в видимой области $\text{Bi}_2\text{O}_3:\text{Yb}^{3+}, \text{Nd}^{3+}$ на длине волны возбуждения 980 нм

Как видно из рисунка 1, спектр люминесценции в видимой области $\text{Bi}_2\text{O}_3:\text{Yb}^{3+}, \text{Nd}^{3+}$ был измерен при мощности лазера 0.3 W. Максимумы спектра люминесценции приходятся на 525, 545, 555, 655, 665, 695 нм. Переходы между уровнями $\text{Yb}^{3+}-\text{Nd}^{3+}$ соответствуют с основного $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{5/2}, ^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{9/2}$. В спектре наблюдаются полосы апконверсионной люминесценции в зеленом и красном диапазонах. Рассмотрение зависимости интенсивности апконверсионной люминесценции от времени позволило сделать вывод, что насыщение интенсивности происходит в промежуток времени от 5 до 30 мин с последующим выходом на стационарный режим. Эти свойства делают данный материал перспективными для использования в качестве активной среды лазерного излучения, что является значимым для оптики и биомедицины.

Данное исследование было поддержано из средств программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» БФУ им. И. Канта.

- [1] Patil A.S., Patil A.V., Dighavkar C.G., Adole V.A., Tupe U.J., *Chem. Phys. Lett.*, **796**, 139-155, (2022).
 [2] Furuse H., Yasuhara R., *Opt. Mater. Express*, **7**, 827-833, (2017).

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИНАМИКА ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В
ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Бурцев А.А., Киселев А.В., Невзоров А.А., Ионин В.В.,
Михалевский В.А., Елисеев Н.Н., Лотин А.А.

ИПЛИТ РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, г. Шатура, Россия

В работе представлены исследования температурной динамики электрической проводимости, оптического пропускания, структурных и термокинетических свойств тонких пленок халькогенидных материалов GeTe , $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$. Проведен анализ внутренней структуры образца в температурной динамике в областях, соответствующих температурам фазовых переходов. Анализируется кинетика кристаллизации.

Ключевые слова: халькогениды, кристаллизация.

Халькогенидные соединения IV-VI групп химических элементов являются уникальными материалами, поскольку их физические свойства существенно различаются для двух стабильных фазовых состояний - кристаллического и аморфного [1]. В устройствах на основе халькогенидов используется контраст в оптических и электрофизических свойствах между аморфным и кристаллическим состоянием. Этот контраст возникает из-за различий в структурном порядке, концентрациях носителей заряда и механизме химической связи [1, 2]. Быстрый и обратимый фазовый переход между двумя состояниями при высоких температурах и одновременно хорошая термическая стабильность при комнатной температуре гарантируют скорость и время работы, минуя испарение в активном элементе. Наиболее оптимальный с точки зрения скорости переключения и стабильности фазовых состояний сплав Ge-Sb-Te (GST) уже нашел широкое применение в устройствах оптической и электронной памяти, оптических устройствах, а также в нейроморфных архитектурах [2-4]. Интересной задачей являлось найти материал с наиболее высоким коэффициентом оптического качества ($\Delta n/\Delta k$). GST, легированный селеном (GSST), обладает исключительно большим коэффициентом оптического качества почти во всем инфракрасном спектре и по сути является представителем нового класса оптических материалов [5, 6]. Несмотря на интенсивные исследования свойств тонких пленок халькогенидов, данные в литературе противоречивы, а значения констант разбросаны в широком диапазоне. Это может быть связано как со сложностью метастабильной структуры исходного кристаллического соединения, так и с невозможностью воспроизведения структур аморфных слоев, полученных разными методами в разных лабораториях.

В работе представлены результаты комплексного исследования температурной динамики удельного электрического сопротивления и коэффициента оптического пропускания, дифференциальной сканирующей калориметрии, структуры и спектров КРС образцов GeTe , $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (GSST), полученных методом вакуумного термического напыления. Термограммы ДСК сравнивались с экспериментальными данными, позволяющими оценить изменение свойств при кристаллизации [7]. Все материалы продемонстрировали большой контраст электрических и оптических свойств при фазовых переходах. Более сложные сплавы GST и, особенно, GSST показали многоступенчатые механизмы кристаллизации. Термограмма GSST имеет сложную форму, что объясняется интенсивной рекристаллизацией. Структурные исследования показывают, что переход как в стабильную, так и в метастабильную кристаллические фазы происходит примерно при одной и той же температуре.

- [1] Wuttig M., Yamada N., *Nature materials*, **6**, №11, 824-832, (2007).
- [2] Guo P., Sarangan A.M., Agha I., *Applied sciences*, **9**, №3, 530, (2019).
- [3] Zhang W., Mazzarello R., Wuttig M., et al., *Nature Reviews Materials*, **4**, №3, 150-168, (2019).
- [4] Abdollahramezani S. et al., *Nanophotonics*, **9**, №5, 1189-1241, (2020).
- [5] Wang H. et al., *Materials Letters*, **254**, 182-185, (2019).
- [6] Sahoo D., Naik R., *Materials Research Bulletin*, **148**, 111679, (2022).
- [7] Burtsev A.A. et al., *Materials Science in Semiconductor Processing*, **150**, 106907, (2022).

**ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ YAG/YSZ КЕРАМИК
АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Валиев Д.Т., Степанов С.А., Пайгин В.Д., Двилис Э.С., Хасанов О.Л.

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Целью настоящей работы является получение и комплексное исследование многослойной структуры архитектуры керамика-керамика на основе оксидных систем YAG/YSZ, активированных ионами редкоземельных элементов с заданным распределением компонентов в объеме материала, методом импульсного спарк-плазменного спекания.

Ключевые слова: функционально-градиентная керамика, оксиды редкоземельных элементов, люминесцентные свойства.

Функционально-градиентные материалы (ФГМ) представляют собой композиционные или однофазные материалы, функциональные свойства которых равномерно или скачкообразно изменяются по predetermined и разработанному профилю. Профиль изменения свойств, в свою очередь, обусловлен неоднородностью микроструктуры, дизайн которой определяется требованиями к эксплуатационным характеристикам конечного изделия. За счёт постепенного перехода от одного материала до другого в ФГМ устраняются резкие изменения свойств, существующие в композиционном материале [1].

Функционально-градиентная керамика (ФГК) является разновидностью ФГМ, основой которой является поликристаллический материал. ФГК сочетает в себе особые свойства поликристаллических материалов, такие как термостойкость, износостойкость и биосовместимость, и находит широкое применение в области аэрокосмической, биомедицинской, элементов лазерной и сцинтилляционной техники и т. д. [2].

Среди множества типов поликристаллических люминесцентных материалов, наиболее перспективными являются наноструктурированные (имеющие субмикронный размер зёрен) керамики на основе иттрий-алюминиевого граната (Y₃Al₅O₁₂, YAG), и стабилизированного оксидом иттрия кубического диоксида циркония (ZrO₂-Y₂O₃, YSZ). Выбор этих материалов и их сочетаний обусловлен комплексом высоких физико-механических и оптико-люминесцентных свойств, а также возможностью направленной коррекции последних путём введения допантов (оксидов редкоземельных элементов или переходных металлов) в широком диапазоне концентраций и/или регулирования концентрации кислородных вакансий. Варьирование технологических параметров консолидации керамик на основе выбранных материалов позволяет целенаправленно создавать специфические центры свечения.

В работе приводятся результаты комплексных исследований по характеристике YAG/YSZ образцов ФГК с оксидами редкоземельных элементов, которые были направлены на оценку морфологии, фазового состава, оптических свойств, спектральных характеристик фото- и катодолюминесценции, определении эффективности преобразования излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Проект №21-73-10100). Исследования выполнены на оборудовании ЦКП НМНТ ТПУ при поддержке проекта № 075-15-2021-710.

[1] Качаев А.А., Ваганова М.Л., Гращенко Д.В., Лебедева Ю.Е., *Перспективные материалы*, **9**, 51-58, (2016).

[2] Udupa G., Rao S.S., *Procedia Materials Science*, **5**, 1291-1299, (2014).

**ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ, СТИРАНИЕ И ПЕРЕЗАПИСЬ
ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ МИКРОСТРУКТУР В СИЛИКАТНОМ СТЕКЛЕ,
СОДЕРЖАЩЕМ СУЛЬФИД КАДМИЯ**

Ветчинников М.П., Липатьев А.С., Шахгильдян Г.Ю., Лотарев С.В., Сигаев В.Н.
РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

Предложен подход к фемтосекундному лазерному модифицированию силикатного стекла, содержащего добавку сульфида кадмия, который обеспечивает возможность локальной записи, стирания и последующей перезаписи микроструктур, обладающих люминесценцией в видимом спектральном диапазоне.

Ключевые слова: стекло, наночастицы сульфида кадмия, фемтосекундный лазер.

Применение источников лазерного излучения, генерирующих сверхкороткие импульсы длительностью порядка нескольких фемто- или пикосекунд с высокой пиковой мощностью, открывает широкие возможности для микрообработки оптически прозрачных диэлектриков. Локальное модифицирование их структуры осуществляется за счет нелинейного характера поглощения лазерных импульсов, протекающего по многофотонному механизму [1]. Одним из возможных эффектов, наблюдаемых в результате подобного взаимодействия со стеклом, является локальная микро- и нанокристаллизация, которая может быть использована для создания трехмерных микроструктур с различным сочетанием оптических характеристик. В этом отношении особый интерес представляют стекла, содержащие добавку полупроводниковых соединений. Известно, что термическая обработка таких стекол в интервале температур, близких к их температуре стеклования, может инициировать образование наночастиц, размер которых определяет спектрально-люминесцентные характеристики всего материала [2]. Лазерно-индуцированная запись микроструктур на основе полупроводниковых наночастиц в объеме оксидных стекол может значительно расширить область применения данных материалов [3].

В работе демонстрируется возможность записи, стирания и последующей перезаписи люминесцирующих микроструктур в силикатном стекле в системе $K_2O-ZnO-B_2O_3-SiO_2$, содержащем добавку 4 масс.% CdS. Стекла синтезировались путем варки при температуре 1270 °С в закрытом корундовом тигле. Микромодифицирование структуры образцов стекол осуществлялось с помощью установки на базе фемтосекундного лазера Pharos SP с рабочей длиной волны излучения 1030±2 нм. Запись велась лазерным пучком, сфокусированным объективом Olympus LCPLNIR 20X (N.A.=0,45) на глубину ~150 мкм относительно поверхности образца. Микроструктуры формировались под действием 10^3 лазерных импульсов с энергией 400 нДж с частотой следования 1 МГц и длительностью ~180 фс. Полученные микроструктуры диаметром 5 мкм обладали желтой окраской и люминесцировали в видимом спектральном диапазоне с максимумом при 675 нм при возбуждении сфокусированным пучком аргонового лазера, работающего на длине волны 488 нм. Формирование наночастиц сульфида кадмия было подтверждено путем изучения записанных микроструктур методом просвечивающей электронной микроскопии. Стирание записанных модификаций лазерным пучком осуществлялось при тех же условиях фокусировки, а также значениях энергии и длительности импульсов, но сниженной до 500 кГц частоте их следования. Записанные в стекле микроструктуры стирались путем перемещения образца стекла относительно лазерного пучка по синусоидальной траектории в плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучка. При этом скорость перемещения вдоль оси синусоиды составляла 20 мкм/с, а размах и частота осцилляций перпендикулярных этой оси, были равны 50 мкм и 20 Гц, соответственно. Стирание записанных микроструктур было достигнуто за счет теплового воздействия лазерного пучка, вызывавшего значительное повышение температуры стекла в модифицируемой области, локальное образование расплава и растворение образованных ранее наночастиц в оплавленной области. Вместе с тем высокая линейная скорость (более 1 мм/с вблизи оси синусоиды) перемещения лазерного пучка препятствовала осаждению новых наночастиц сульфида кадмия в процессе стирания микроструктур. Стирание наночастиц подтверждалось исчезновением сигнала люминесценции. Перезапись люминесцирующих микроструктур в области, где они были стерты, была успешно проведена пучком с теми же параметрами, что и при первоначальной записи.

Продемонстрированный в работе подход к лазерному микромодифицированию силикатного стекла, содержащего добавку сульфида кадмия, может быть использован для реализации долговечной записи информации с возможностью ее многократной перезаписи.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 21-53-12026).

[1] Philips K.C. et. al., *Adv. Opt. Photonics.*, **7**, 686-712, (2015).

[2] Ekimov A., *J. Lumin.*, **70**, 1-20, (1996).

[3] Vetchinnikov M.P. et. al., *Opt. Lett.*, **43**, 2519-2522, (2018).

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК РЬС

Гревцева И.Г., Чирков К.С., Асланов С.В., Овчинников О.В., Смирнов М.С.

ФГБОУ ВО «ВГУ», г. Воронеж, Россия

Продемонстрирована возможность управления экситонной и дефектной люминесценцией ансамбля коллоидных квантовых точек РЬС в присутствии плазмонных наностержней Au за счет пространственного разделения компонентов смеси путем формирования структур ядро/оболочка РЬС/SiO₂.

Ключевые слова: сульфид свинца, плазмонные наночастицы, ИК люминесценция.

Полупроводниковые коллоидные квантовые точки сульфида свинца (КТ РЬС) обладают размерно-зависимыми спектрально-люминесцентными свойствами в видимой и ближней ИК областях, что делает их перспективными материалами для создания на их основе устройств для биомедицинских, химических, информационных технологий и т.д. [1]. Создание плазмон-экситонных наноструктур на основе коллоидных КТ РЬС открывает возможность направленного управления их люминесцентными свойствами за счет настройки/отстройки пика плазмонного резонанса металлических наночастиц и максимума люминесценции КТ, а также за счет вариации расстояния между компонентами гибридной смеси [2].

В данной работе представлены результаты исследования люминесцентных свойств КТ РЬС (средним размером 2.8 нм) в присутствии плазмонных наностержней Au (НСт Au) со средним значением длины 40 нм и ширины 9 нм. Структурные свойства компонентов гибридной смеси обеспечивали спектральный резонанс пика плазмонного резонанса НСт Au и полосы экситонной люминесценции КТ РЬС в области 930 нм (рисунок).

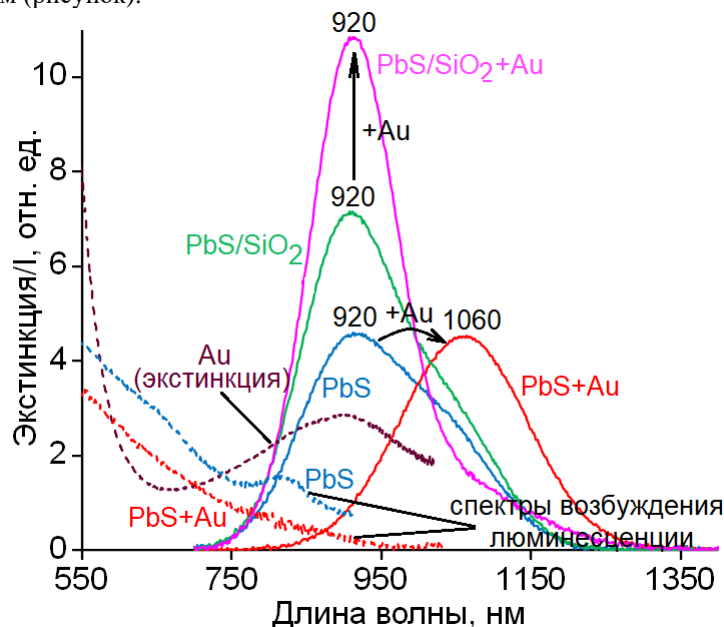


Рисунок. Спектрально-люминесцентные свойства КТ РЬС и НСт Au и плазмон-экситонных наноструктур на их основе

Согласно данным спектров возбуждения люминесценции и спектров стационарной люминесценции показано, что взаимодействие КТ РЬС и НСт Au приводит к тушению экситонной люминесценции в области 920 нм и росту интенсивности ловушечной люминесценции при 1060 нм. Размеры НСт Au обеспечивают значительное перекрытие пика экстинкции НСт Au (900 нм) с экситонной полосой люминесценции КТ РЬС (920 нм), что вероятно обеспечивает условия для резонансного безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения между КТ и НСт. Создание плазмон-экситонных наноструктур на основе КТ РЬС/SiO₂ приводит к двукратному увеличению интенсивности люминесценции экситонной люминесценции при 920 нм. По-видимому, наличие слоя SiO₂ блокирует процесс безызлучательного переноса электронного возбуждения.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-3746.2022.1.2.

[1] Yin Q., Zhang W., Zhou Y., et. al., *Journal of Luminescence.*, **250**, 119065, (2022).

[2] Grevtseva I.G., Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S., et. al., *RSC Adv.*, **12**, 6525-6532, (2022).

**ОПТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ
МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ Nd^{3+} , $\text{Yb}^{3+}:\text{LiYF}_4$**

**Докудовская А.К., Пудовкин М.С., Олейникова Е.И.,
Кораблева С.Л., Морозов О.А.**

Казанский федеральный университет, Институт физики, Казань, Россия

Люминофоры Nd^{3+} (0,3 мол.%), Yb^{3+} (0- 5 мол.%): LiYF_4 выращены методом Бриджмена-Стокбаргера. В качестве температурно-зависимого параметра был выбран параметр LIR. Исследовано влияние кросс-релаксации на температурную чувствительность. Получены рекордные значения S_a и S_r .

Ключевые слова: люминесцентная термометрия, даун- конверсия, кросс- релаксация.

Введение. Перспективными люминофорами для создания температурных сенсоров считаются кристаллические частицы, активированные ионной парой $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$. Целью данной работы было исследование влияния условий возбуждения на температурную чувствительность спектрально-кинетических характеристик люминофоров Nd^{3+} , $\text{Yb}^{3+}:\text{LiYF}_4$.

Материалы и методы. Образцы Nd^{3+} , $\text{Yb}^{3+}:\text{LiYF}_4$ были выращены методом Бриджмена-Стокбаргера в резистивной печи. Образцы измельчали в агатовой ступке. Измерения люминесценции проводились на лазерной установке JV LOTIS TII на длине волны 355 и 520 нм в диапазоне температур 80–320 К.

Результаты и обсуждения. Наиболее перспективной ионной парой для целей температурной сенсорики являются $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ [1]. Возбуждение системы осуществляется при $\lambda_{\text{ex}} = 520$ и 355 нм в диапазоне температур 80–320 К. Все полосы интерпретированы как результат переходов с $^4\text{F}_{3/2}$ (Nd^{3+}) и $^2\text{F}_{5/2}$ (Yb^{3+}) на нижние энергетические уровни. В качестве параметра зависящий от температуры был взят параметр LIR в виде интегрального отношения полос люминесценции Nd^{3+} ($^4\text{F}_{3/2}$) к Yb^{3+} ($^2\text{F}_{5/2}$). При возбуждении на $\lambda_{\text{ex}} = 520$ нм ($^4\text{I}_{9/2} - ^2\text{K}_{13/2}/^2\text{G}_{9/2}$ полоса поглощения Nd^{3+}) заселение уровня Nd^{3+} ($^4\text{F}_{3/2}$ состояния) происходит за счет безызлучательных переходов с верхних энергетических уровней (рис. 1). Однако при возбуждении на $\lambda_{\text{ex}} = 355$ нм ($^4\text{I}_{9/2} - ^4\text{D}_{5/2}$ полоса поглощения Nd^{3+}) заселение уровня $^4\text{F}_{3/2}$ (Nd^{3+}) происходит за счет излучательных и безызлучательных процессов с верхних уровней, и за счет еще одного дополнительного процесса кросс-релаксации. Таким образом, за счет исследования параметра LIR мы хотели оценить вклад процесса кросс- релаксации на температурную чувствительность. Исходя из рис. 2, видно, что форма функции LIR слабо зависят от длины волны возбуждения, следовательно, процесс кросс- релаксации незначительно влияют на температурную чувствительность. Также были получены кинетики затухания люминесценции для Nd^{3+} ($^4\text{F}_{3/2} - ^4\text{I}_{9/2}$) в зависимости от температуры, исходя из анализа, время нарастания люминесценции слабо зависят от температуры, что дополнительно свидетельствует о малом влиянии процесса кросс- релаксации на температурную чувствительность. Максимальные значения абсолютной (S_a) и относительной (S_r) температурных чувствительностей достигаются для Nd^{3+} (0,3%), Yb^{3+} (1,0%): LiYF_4 ($S_a = 0,007 \text{ K}^{-1}$ при 320 К) и для Nd^{3+} (0,3%), Yb^{3+} (5,0%): LiYF_4 ($S_r = 1,03\% \cdot \text{K}^{-1}$ при 260 К), соответственно.

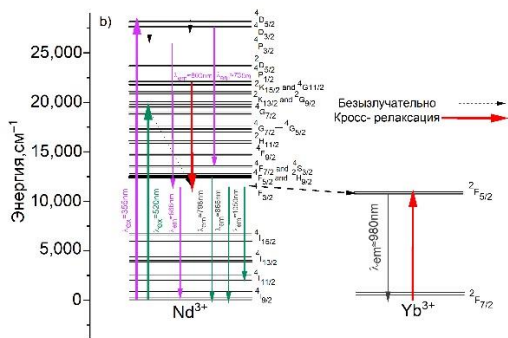


Рис. 1. Схематическая диаграмма энергетических уровней Nd^{3+} и Yb^{3+}

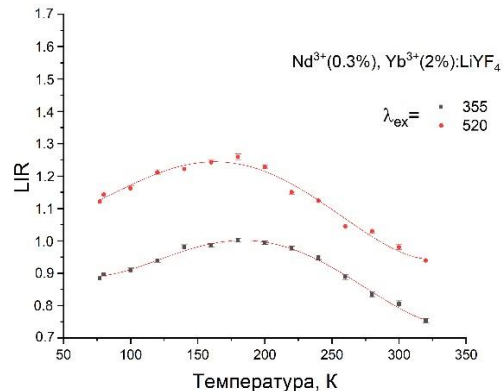


Рис. 2. Функции LIR при различных длинах волн возбуждения $\lambda_{\text{ex}} = 520$ нм и $\lambda_{\text{ex}} = 355$ нм

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-00129.

[1]. Pudovkin M.S., Ginkel A.K., Lukinova E.V., *Optical Materials*, **119**, 111328, (2021).

НЕОБЫЧНЫЕ ВАРИАНТЫ ДИФРАКЦИИ БРЭГГА НА РЕГУЛЯРНОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ В ТАНТАЛАТЕ ЛИТИЯ

Дубиков А.В.¹, Савченков Е.Н.¹, Шандаров С.М.¹,
 Чувакова М.А.², Ахматханов А.Р.², Шур В.Я.²

¹ТУСУР, г. Томск, Россия

²Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

Описаны результаты экспериментов по дифракции Брэгга на регулярной доменной структуре в кристалле танталата лития, при которой одновременно наблюдалась анизотропные процессы первого и второго порядков и изотропная дифракция первого порядка.

Ключевые слова: танталат лития, регулярные доменные структуры, дифракция Брэгга.

Исследуемая регулярная доменная структура (РДС) с периодом $\Lambda = 7.99$ мкм была сформирована методом электрической переполяризации в образце стехиометрического $1\% \text{MgO}:\text{LiTaO}_3$ с размерами $6 \times 2 \times 1$ мм³ вдоль осей X, Y и Z, соответственно. На рис. 1 а) и 1 б) соответственно представлены схема экспериментальной установки, позволяющей наблюдать дифракцию Брэгга на РДС, подобную вырожденным процессам в акустооптике [1], и включающей элементы для нагрева и охлаждения и контроля температуры кристалла T_{cr} , а также поясняющая этот необычный вариант дифракции векторная диаграмма.

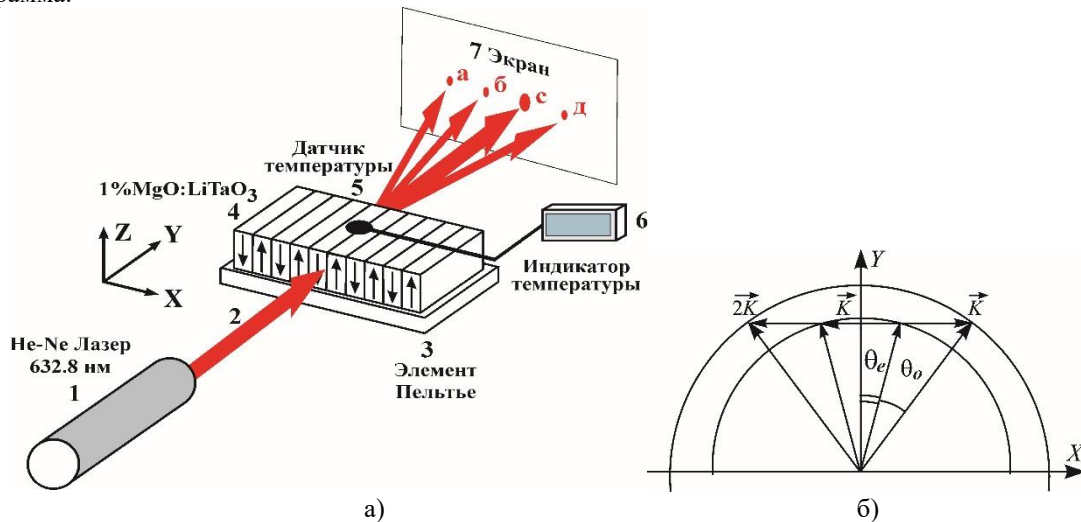


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, а) и векторная диаграмма эксперимента при необыкновенном зондирующем пучке, реализуемая при температуре $10,5$ °C, б); θ_e – угол между волновым вектором зондирующего пучка и осью Y кристалла

Фотография наблюдаемых дифракционных максимумов показана на рис. 2.

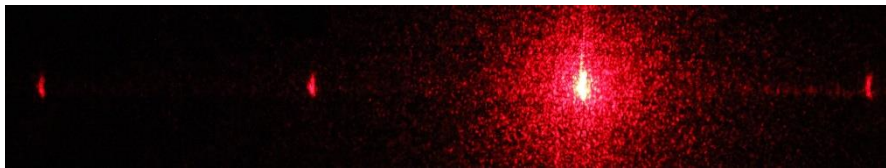


Рис. 2. Картина дифракционных максимумов при $T_{cr} = 10,5$ °C. Справа налево: обыкновенный пучок (анизотропная дифракция первого порядка с эффективностью $\eta \approx 0,11\%$); необыкновенный зондирующий пучок; необыкновенный пучок (изотропная дифракция первого порядка, $\eta \approx 0,08\%$); обыкновенный пучок (анизотропная дифракция второго порядка, $\eta \approx 0,22\%$)

Для $T_{cr} = 108$ °C, превышающей температуру изотропной точки исследуемого кристалла $T_i = 66$ °C, подобный вид дифракции наблюдался при обыкновенном зондирующем пучке. В этом случае поляризация всех пучков изменялась на ортогональную.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023-2025 годы (задание FEWM-2023-0012).

[1] Xu J., Stroud R., *Acousto-optic devices: principles, design, and applications*, Wiley, (1992).

**ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ
LiNb_{0.88}Ta_{0.12}O₃ МЕТОДОМ ПРОТОННОГО ОБМЕНА»**

**Сосунов А.В.¹, Петухов И.В.¹, Корнилицын А.Р.¹,
Мололкин А.А.², Фахртдинов Р.Р.³**

¹ПГНИУ, г. Пермь, Россия

²Фомос-Материалы, Москва, Россия

³ИИТМ РАН, Москва, Россия

Впервые проведены исследования по формированию планарных волноводов методом протонного обмена в сегнетоэлектрических кристаллах на основе твердых растворов ниобата-танталата лития X-среза и показана возможность получения высоких значений $\Delta n_e = 0.129$ непосредственно после протонного обмена.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические кристаллы, планарный волновод, протонный обмен.

Интегральная оптика, как аналог электронных интегральных микросхем требует создания волноводных систем с максимально низкими оптическими потерями, высокой стабильностью и минимальными размерами. Наиболее актуальными методами формирования оптических волноводов для интегрально-оптических схем являются протонный обмен и диффузия титана [1], а в качестве материала подложки, чаще всего, используются монокристаллы ниобата лития (НЛ) X- и Z-срезов. Недавно в работе [2] было продемонстрировано получение монокристаллов [3] кристаллов с изоморфным замещением в катионной подрешетке Nb на Ta, LiNb_(1-x)Ta_xO₃ с температурой Кюри 1105 °С, соизмеримой с T_к ниобата лития. Показано, что изменение параметров элементарной ячейки носит линейный характер в зависимости от состава кристаллов. Данные кристаллы могут быть перспективны для создания оптических волноводов.

Целью работы является изготовление и исследование характеристик планарных протонообменных волноводов в сегнетоэлектрических кристаллах на основе твердых растворов ниобата-танталата (НЛ-ТЛ) лития (LiNb_{0.88}Ta_{0.12}O₃) X- среза.

Протонный обмен проводили в закрытом циркониевом реакторе в расплаве бензойной кислоты при температуре 190 °С в течение 2 часов с последующим отжигом на воздухе при температуре 370 °С в течение 8 часов. Профиль показателя преломления (Δn_e) и глубину волноводов (X) определяли методом призмного ввода.

Непосредственно после протонного обмена формируется ступенчатый профиль показателя преломления волновода и имеет место деградация электрооптических коэффициентов. Последнее устраняется постобменным отжигом. Прямой протонный обмен в исследуемом кристалле НЛ-ТЛ приводит к увеличению приращения показателя преломления на поверхности волновода до $\Delta n_e = 0.129$ и глубине волновода X = 2.1 мкм (рисунок). Эти параметры существенно превышают аналогичные параметры для конгруэнтного НЛ ($\Delta n_e = 0.113$; X = 1.6 мкм). Проведенный постобменный отжиг при одинаковых условиях указывает на увеличение глубины залегания протонов и снижения Δn_e по сравнению с НЛ (НЛ- ТЛ: $\Delta n_e = 0.018$; X = 9.8 мкм; НЛ: $\Delta n_e = 0.026$; X = 8.0 мкм). Полученные результаты открывают возможность получения более качественных волноводов и интегрально-оптических-схем с улучшенными характеристиками на основе таких материалов.

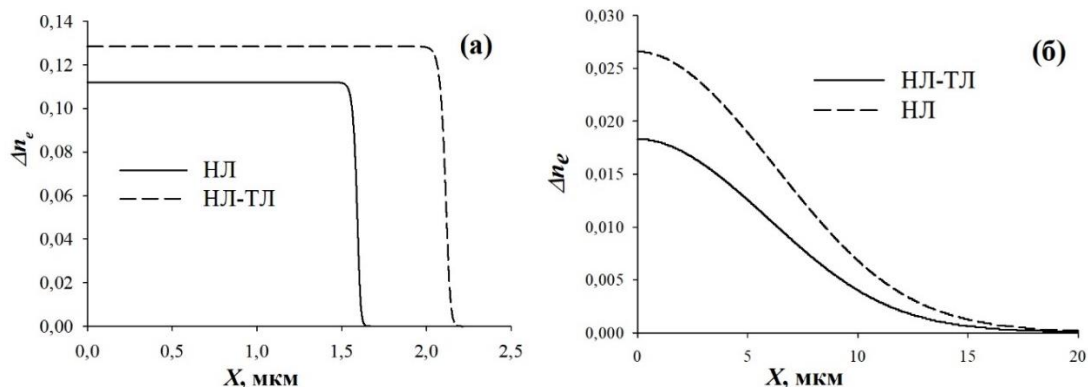


Рисунок. Приращение показателя преломления образцов после протонного обмена (а) с последующим постобменным отжигом (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания № 121101300016-2.

[1] Bazzan M., Sada C., *Appl. Phys. Rev.*, **2**, 040603-24, (2015).

[2] Roshchupkin E. et. al., *Acta Crystallogr. B Struct. Sci. Cryst. Eng. Mater.*, **76**, 1071-1076, (2020).

[3] Мололкин А.А., Рошупкин Д.В., Емелин Е.В., Фахртдинов Р.Р., *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*, **24**, 34-39, (2021).

**ГЕКСАФЕРРИТЫ М-ТИПА, ЛЕГИРОВАННЫЕ ИОНАМИ Al^{3+} , КАК
МАГНИТОТВЕРДЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ, ПРОЯВЛЯЮЩИЕ
СУБТЕРАГЕРЦОВЫЙ ЕСТЕСТВЕННЫЙ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС**

**Султановская А.С.¹, Горбачев Е.А.¹, Козлякова Е.С.²,
Алябьева Л.Н.¹, Асмаа Ахмед¹, Трусов Л.А.¹**

¹Лаборатория терагерцовой спектроскопии, центр фотоники и двумерных материалов, московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт), Москва, Россия

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

Установлена температурная зависимость магнитных свойства и частоты естественного ферромагнитного резонанса для гексаферритов, легированных алюминием. Все образцы в интервале температур 5 – 300 К избирательно поглощают электромагнитное излучение в субтерагерцовом диапазоне частот.

Ключевые слова: естественный ферромагнитный резонанс, поглощение субтерагерцового излучения, гексаферриты М-типа в спинтронике.

Гексаферриты М-типа – это оксидные соединения с общей формулой $MFe_{12}O_{19}$ ($M^{2+} = Ba^{2+}, Sr^{2+}, Pb^{2+}$). Они проявляют высокую коэрцитивную силу при комнатной температуре и состоят из доступных и недорогих элементов в составе. На сегодняшний день гексаферриты массово используются в производстве лент для магнитной записи информации и являются многообещающей альтернативой дорогостоящим сплавам на основе редкоземельных элементов (Nd-Fe-B, SmCo), поскольку химически и термически более стабильны. Кроме того, они обладают высоким электрическим сопротивлением и высокой магнитной восприимчивостью. Вследствие совокупности данных характеристик гексаферриты являются перспективным материалом для использования в качестве магнитоактивной среды в электронных устройствах для избирательного поглощения электромагнитного излучения за счет естественного ферромагнитного резонанса (то есть ферромагнитного резонанса в отсутствие внешнего магнитного поля). Магнитные свойства гексаферритов могут быть прецизионно настроены посредством частичного замещения ионов Fe^{3+} на другие ионы. В работе [1] было показано, что однодоменные частицы гексаферритов, сильно легированных ионами Al^{3+} проявляют естественный ферромагнитный резонанс в субтерагерцовой области частот f_r (160 – 250 ГГц) и гигантские значения коэрцитивной силы H_C (20 – 36 кЭ) при комнатной температуре. Выдающиеся магнитодинамические свойства и возможность промышленного производства открывают возможности для широкого спектра применений этого материала. Например, на основе гексаферритов могут быть созданы субтерагерцовые детекторы и другие устройства спинтроники, работающие по механизму спиновой накачки даже в отсутствие приложенного магнитного поля [2].

Для того чтобы оценить потенциальные возможности применения данного материала, в представленной работе показано исследование естественного ферромагнитного резонанса и магнитных гистерезисов однофазных однодоменных частиц гексаферритов состава $Sr_{1-x/12}Ca_{x/12}Fe_{12-x}Al_xO_{19}$ ($x = 1.5 - 5.5$) в диапазоне температур 5 – 300 К.

Было установлено, что для всех образцов характерны поглощение субтерагерцового излучения и высокая магнитотвердость во всем температурном интервале. Максимальное значение $H_C(T)$ смещается в низкотемпературную область с увеличением содержания алюминия. Частота естественного ферромагнитного резонанса возрастает с увеличением концентрации алюминия, и максимум $f_r(T)$ также смещается в область низких температур. Для образца $Sr_{0.54}Ca_{0.46}Fe_{6.5}Al_{5.5}O_{19}$ была достигнута наивысшая частота естественного ферромагнитного резонанса – 297 ГГц и наибольшее значение коэрцитивной силы – 42 кЭ при 180 К. Данный образец обладает самой высокой частотой естественного ферромагнитного резонанса среди всех известных на сегодняшний день материалов и самым высоким значением коэрцитивной силы среди нетекстурированных ферритов. Согласно теоретическим расчетам, полученные гексаферриты за счет ЕФМР должны генерировать на несколько порядков более высокие спиновые токи, чем антиферромагнетики, даже при комнатной температуре и даже в отсутствие внешнего магнитного поля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ № 21-79-10184.

[1] Gorbachev E.A. et al., *Materials today*, **32**, 13–18, (2020).

[2] Gorbachev E.A. et al., *Materials today*, **63**, 99–107, (2023).

ВЛИЯНИЕ СКРЫТЫХ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЕНОК В СПЕКТРЕ СУПЕРСВЕРХТОНКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИМЕСНЫХ ИОНОВ Yb^{3+} В МОНОКРИСТАЛЛЕ Y_2SiO_5 НА ЭФФЕКТ МОДУЛЯЦИИ ОГИБАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОГО СПИНОВОГО ЭХО

Соловаров Н.К.¹, Суханов А.А.¹, Тарасов В.Ф.¹, Заварцев Ю.Д.², Кутовой С.А.²

¹КФТИ – ОСП ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

²ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, Москва, Россия

Обнаружены коллапс и возрождение сигналов двух-импульсного электронного спинового эха Хана, возбуждаемого на электронно-ядерных спиновых уровнях примесного иона $^{173}Yb^{3+}$ в ортосиликате иттрия (Y_2SiO_5). Обсуждается физическая природа явления.

Ключевые слова: спиновое эхо, Y_2SiO_5 , Yb^{3+} .

В последнее время большой научный и практический интерес представляет проблема создания подходящей материальной базы для практической реализации устройств квантовой информатики. В качестве перспективной основы для твердотельной квантовой памяти рассматриваются примесные редкоземельные ионы, внедренные в диэлектрические кристаллы. Особое внимание привлекают нечетные изотопы редкоземельных ионов, электронно-ядерные состояния которых обладают большим временем сохранения когерентности. Для определения этого времени широко используются импульсные методы электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), в которых измеряется зависимость амплитуды электронного спинового эхо от временной задержки между возбуждающими резонансными импульсами. Мы использовали двух-импульсную последовательность Хана для измерения времени сохранения когерентности в электронно-ядерной спиновой системе примесных ионов $^{173}Yb^{3+}$ в моноизотопно легированном монокристалле Y_2SiO_5 (YSO). При этом обнаружена аномальная зависимость интенсивности сигналов эхо от времени задержки между импульсами, имеющая характер коллапса и возрождения сигналов эхо.

Для измерений использовался монокристалл YSO, выращенный из изотопически чистых окислов $^{28}SiO_2$ и $^{173}Yb_2O_3$ методом Чохральского. Измерения проводились на спектрометре ЭПР ELEXSYS E680 производства фирмы Bruker BioSpin в X-диапазоне при температуре 7 К.

При измерении времени релаксации когерентности электронных спиновых систем методом двух-импульсного эхо Хана было обнаружено, что зависимость амплитуды сигнала эхо от времени задержки между импульсами существенно отличается от обычного экспоненциального спада. В малых магнитных полях при увеличении времени задержки между резонансными импульсами амплитуда сигнала эхо быстро уменьшается, и в течение какого-то времени эхо не регистрируется. При дальнейшем увеличении времени задержки сигнал эхо вновь регистрируется в определенном, очень коротком диапазоне времен задержек. Ранее такое поведение сигналов эхо наблюдалось в оптическом диапазоне и получило название коллапс (collapse) и возрождение (revival) сигнала эхо [1].

Аналогичная зависимость амплитуды сигналов эхо от времени характерна для одноимпульсного возбуждения периодических частотных гребенок, представляющих дискретные поглощающие зубцы с частотным интервалом Δ . В этом случае сигналы эхо от частотной гребенки после первого импульса возникают в моменты $T = n/\Delta$ ($n=1,2,3,\dots$). Мы полагаем, что в нашем случае коллапс и возрождение сигналов эхо возникают благодаря существованию эквидистантной частотной гребенки электронных уровней иона Yb^{3+} , сформированной вследствие суперсверхтонкого взаимодействия ионов иттербия с ядерными спинами ^{89}Y . Эти частотные гребенки не проявляются в стационарных спектрах ЭПР ионов ^{173}Yb в YSO, так как частотный интервал между зубцами гребенки значительно меньше неоднородной ширины линии. В двух-импульсной последовательности Хана поперечные компоненты электронных спинов всего неоднородно уширенного резонансного перехода сфазированы в момент времени, равный удвоенному времени задержки между возбуждающими импульсами. Если это время совпадает со временем формирования эхо от частотной гребенки, то формируется сигнал эхо. В противном случае эхо Хана после второго импульса не возникает. Этот эффект является специфическим проявлением эффекта модуляции огибающей электронного спинового эха (electron spin echo envelope modulation, ESEEM).

В сильных магнитных полях эффект коллапса-возрождения электронного спинового эхо ионов ^{173}Yb в монокристалле YSO сменяется обычной модуляцией огибающей электронного спинового эхо, в которой период модуляции определяется частотой зеемановского расщепления уровней энергии ядерного спина ^{89}Y во внешнем магнитном поле. Это изменение связано изменением относительной роли внешнего магнитного поля и поля суперсверхтонкого взаимодействия ядерного спина с электронным спином ^{173}Yb . Поэтому изменение величины внешнего магнитного поля приводит существенному изменению относительного влияния внешнего и сверхтонкого магнитных полей на структуру сверхтонкого расщепления электронных уровней иона $^{173}Yb^{3+}$.

[1] Соловаров Н.К., Суханов А.А., Тарасов В.Ф., Заварцев Ю.Д., Кутовой С.А., *Письма в ЖЭТФ*, **115**, №6, 394-400, (2022).

**ПРОЗРАЧНЫЕ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
ЛИТИЕВОАЛЮМОСИЛИКАТНОЙ СИСТЕМЫ, ДОПИРОВАННЫЕ ИОНАМИ
ЖЕЛЕЗА: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Труханова К.А.^{1,2}, Дымшиц О.С.^{1,3}, Запалова С.С.³,
Попков В.И.^{1,2}, Алексеева И.П.³ Жилин А.А.⁴

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²СПБГТИ(ТУ), Санкт-Петербург, Россия

³АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия

⁴АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

Впервые получены прозрачные титансодержащие стеклокристаллические материалы литиевоалюмосиликатной системы, допированные ионами железа, широкополосное поглощение которых в спектральной области 1,5–2,5 мкм обусловлено ионами Fe²⁺ в тетраэдрических позициях в нанокристаллах γ -Al₂O₃.

Ключевые слова: наноразмерные кристаллы шпинели, ионы Fe²⁺, широкополосное поглощение в средней ИК области спектра.

Прозрачные стеклокристаллические материалы (СКМ) литиевоалюмосиликатной системы обладают высокой термостойкостью, механической и лучевой прочностью, что позволяет рассматривать их как перспективные матрицы для создания насыщающихся поглотителей лазеров, работающих в режиме пассивной модуляции добротности.

Исходное литиевоалюмосиликатное стекло массой 400 г. с добавкой TiO₂ в качестве нуклеатора кристаллизации [1] и FeO в качестве активатора было синтезировано в слабовосстановительных условиях в тигле из кварцевой керамики при температуре 1600 °С с гомогенизацией расплава, отлито на металлическую плиту и отожжено при температуре 640 °С. Температура стеклования и температурные интервалы кристаллизации исходного стекла были определены методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). На основе данных ДСК была выбрана оптимальная температура предситализации, 680 °С. Стекло было термообработано по двухстадийным режимам в интервале температур 680–1100 °С. Получены прозрачные СКМ, фазовый состав которых был определен методом рентгенофазового анализа (РФА), рисунок (а, б). Спектры поглощения образцов стекла и СКМ толщиной 1 мм приведены на рисунке (в).

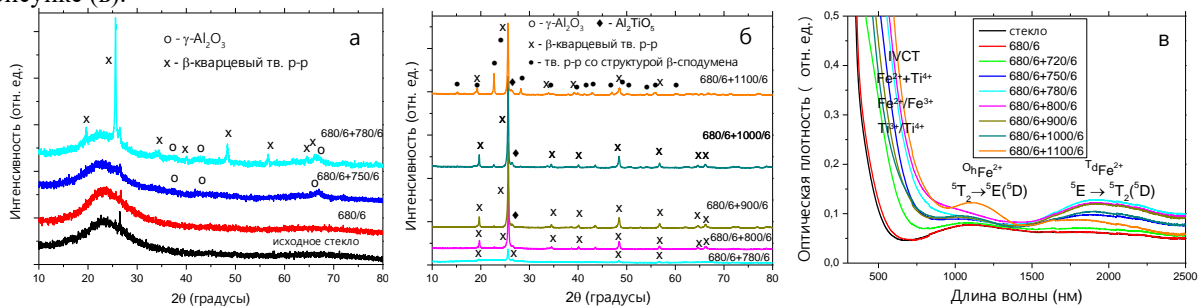


Рисунок. Дифрактограммы (а, б) и спектры поглощения (в) исходного и термообработанных стекол. Режимы термообработки (°С/ч) приведены на рисунках

Исходное стекло и стекло, термообработанное на стадии предситализации, рентгеноаморфны. В ходе термообработки в интервале температур 720 – 750 °С выделяются кристаллы γ -Al₂O₃ со структурой шпинели в качестве единственной кристаллической фазы (рисунок а). При повышении температуры дополнительно кристаллизуются твердые растворы (тв. р-ры) со структурой β -кварца, а затем и β -сподумена (рисунок а, б), что приводит к уменьшению коэффициента термического расширения материала с $\sim 50 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ до $\sim 5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ и повышению его термостойкости. Рост температуры термообработки от 750 до 1000 °С вызывает рост размера кристаллов γ -Al₂O₃ от ~ 2 до ~ 20 нм; параметр элементарной ячейки a изменяется сложным образом от 7.93 до 7.98 Å. Плотность материала возрастает от $\sim 2.49 \text{ г/см}^3$ до $\sim 2.56 \text{ г/см}^3$ при выделении кристаллов γ -Al₂O₃, достигает величины $\sim 2.63 \text{ г/см}^3$ при кристаллизации β -кварцевого тв. р-ра и снижается до $\sim 2.59 \text{ г/см}^3$ при дополнительном выделении менее плотных тв. р-ров β -сподумена.

Поглощение исходного стекла в диапазоне длин волн ~ 1000 – 1400 нм обусловлено ионами Fe²⁺ в октаэдрической координации, переход (${}^5T_2 \rightarrow {}^5E({}^5D)$). Рост интенсивности поглощения в области ~ 1550 – 2300 нм при термообработке обусловлен поглощением ионов Fe²⁺ в тетраэдрической (${}^5E \rightarrow {}^5T_2({}^5D)$) координации в выделяющихся кристаллах γ -Al₂O₃, (рисунок в). Полученные СКМ перспективны для создания насыщающихся поглотителей—лазеров, излучающих в среднем ИК спектральном диапазоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Грант 23-23-00446).

[1] Alekseeva I., Dymshits O., Tsenter M., Zhilin A., *J. Non-Cryst. Solids*, **357**(11–13), 2209-2214, (2011).

ЭПР И ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КРИСТАЛЛА $\text{CaMoO}_4:\text{Er}^{3+}$

Шакуров Г.С.¹, Зарипов Р.Б.¹, Герасимов К.И.^{1,2}, Миннегалиев М.М.²,

Моисеев С.А.², Исаев В.А.³, Лебедев А.В.³, Аванесов С.А.³

¹Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

²Казанский квантовый центр, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия

³Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия

Представлены результаты исследований двух примесных центров Er^{3+} в кристалле CaMoO_4 методами многочастотного электронного парамагнитного резонанса, оптической и магнитооптической лазерной спектроскопии высокого разрешения.

Ключевые слова: $\text{CaMoO}_4:\text{Er}^{3+}$, электронный парамагнитный резонанс, магнитооптическая спектроскопия.

Создание эффективной квантовой памяти на кристаллах, активированных редкоземельными ионами, является актуальной задачей наших дней. Для практических применений кроме больших времен когерентности необходимым условием является возможность сохранения в квантовой памяти фотонов с длиной волны в телекоммуникационном диапазоне (1.5 μm) для использования такой памяти в квантовом повторителе. Таким требованиям удовлетворяют оксиды с примесными центрами ионов эрбия, которые интенсивно изучаются в последние годы [1, 2]. В настоящей работе мы исследовали кристаллы $\text{CaMoO}_4:\text{Er}^{3+}$, используя методы многочастотного электронного парамагнитного резонанса и оптической спектроскопии.

Из литературных данных известно, что выращенные кристаллы содержат ионы Mo^{5+} , которые придают им окраску [3], но после отжига на воздухе кристаллы становятся прозрачными. Мы исследовали эти кристаллы до и после отжига. В обоих образцах регистрировались известные спектры ЭПР ионов Er^{3+} . Кроме резонансных переходов внутри основного крамерсового дублета мы наблюдали переходы с основного на первый и второй возбужденный дублеты, что позволило уточнить имеющиеся данные по штарковским расщеплениям. В окрашенных кристаллах мы обнаружили центры, которые идентифицировали, как димеры $\text{Er}^{3+} - \text{Mo}^{5+}$, поскольку они демонстрировали характерную для димеров сверхтонкую структуру. В рамках теории эффективного спин-гамильтониана, включающей зеемановское, диполь-дипольное и обменное взаимодействия мы получили набор спектроскопических параметров, описывающих полученные экспериментальные данные.

Одиночные примесные центры Er^{3+} в отожженных кристаллах исследовались методами оптической спектроскопии. Из наблюдаемых спектров поглощения и люминесценции при температурах 4-30 К были получены энергии штарковских уровней 8-ми мультиплетов. Наиболее узкие оптические линии поглощения между некоторыми уровнями мультиплетов $^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{13/2}$, $^4\text{I}_{9/2}$ исследовались методами лазерной спектроскопии высокого разрешения. Обнаружены рекордно узкие (160 МГц) линии поглощения для ионов Er в оксидных кристаллах на переходах между нижними крамерсовыми дублетами мультиплетов $^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{13/2}$ и вследствие этого хорошо спектрально разрешенная сверхтонкая структура спектров поглощения $^{167}\text{Er}^{3+}$. Из спектров поглощения четных изотопов Er в магнитных полях 0-700 мТ определены g-факторы пяти крамерсовых дублетов.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения кристаллов $\text{CaMoO}_4:\text{Er}^{3+}$ в квантовых устройствах, например, в оптической квантовой памяти.

В Казанском физико-техническом институте ФИЦ КазНЦ РАН работа выполнена в рамках Госзадания. В Казанском квантовом центре КНИТУ-КАИ работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России, рег. номер НИОКТР 121020400113-1.

[1] Thiel C.W., Böttger T., Cone R.L., *J. Lumin.*, **131**, 353–361, (2011).

[2] Chanelière T., Hétet G., Sangouard N., *Atomic, Molecular, and Optical Physics.*, **67**, 77–150, (2018).

[3] Subbotin K.A., Titov A.I., Lis D.A., Sani E., Smirnov V.A., Alimov O.K., Zharikov E.V., Shcherbakov I.A., *Phys. Stat. Sol. A.*, **217**, 1900659 (1-8), (2020).

INTRIGUING ENERGY TRANSFER PHENOMENA IN SCINTILLATING GLASSES: A BREAKTHROUGH

Rajaramakrishna R.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Tailoring the luminescence intensity made possible by choosing the best glass host. When gadolinium as an activator is added with rare-earth ions and co-doped in the glasses, they show energy transfer characteristics. The energy transfer from $Gd^{3+} \rightarrow Dy^{3+}/Ce^{3+}$ ions, and back transfer from $Dy^{3+} \rightarrow Ce^{3+}$ ions are observed.

Keywords: photoluminescence, X-ray luminescence, EXAFS analysis.

Rare-earth ions doped in oxide or oxyfluoride glasses are being topic of interest for researchers around the world due to their superior transparent/translucent behaviour for solid state lighting device applications. The lanthanides are promising oxides to show $f-f$ transition irrespective to the host. In this paper we focus on the two primary-colored luminescent transitions to obtain pure white light. Introduction of Gd^{3+} ions act as a sensitizer and enhances the luminescence intensity and influences for energy transfer characteristics [1, 2]. Many literatures show energy transfer phenomenon (Fig. 1) when co-doped with two or more rare-earth ions [3] and host itself in the form of charge transfer band (CTB) [4]. Introduction of Ce^{3+} ions which were co-doped in gadolinium dysprosium alkaline earth borate glasses show back transfer as shown in Fig.1 which affects photoluminescence emission and tailor their white luminous due to Y/B ratio from Dy^{3+} doped glasses under the appropriate excitation suggesting a promising and efficient optical devices for laser illumination as well as the color coordinates which are evaluated from CIE color coordinate diagram [4] and correlated color temperature (CCT) of white fluorescence to anticipate their cool warm temperature by the color due to the rare-earth ions. Glasses illuminated with normal and UV lamp as observed in Fig. 2. The detailed understanding of Inter-atomic distance, co-ordination number and oxidation states of the rare-earth ions were analysed using XANES and EXAFS.

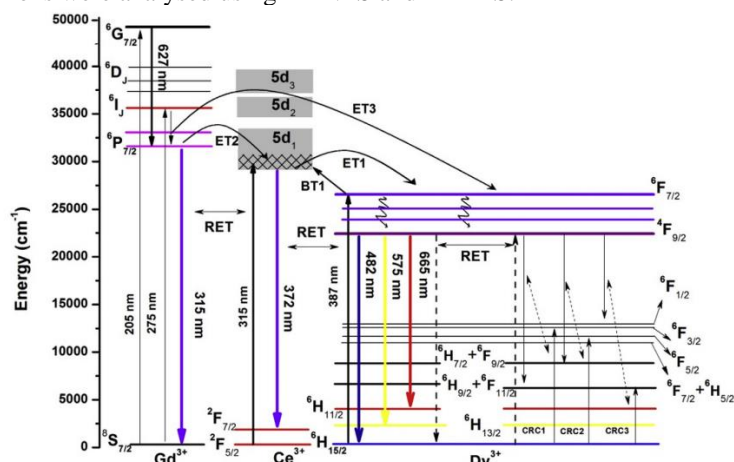


Fig. 1. Complete Energy Transfer Mechanism of $Gd^{3+}+Ce^{3+}+Dy^{3+}$ ions in the glass system

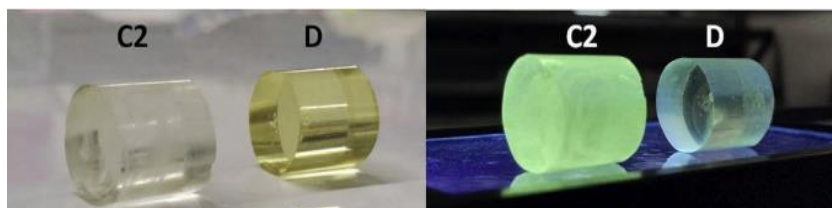


Fig. 2. Photographs of glass sample when illuminated with normal and UV lamp

The research work was supported by the Strategic Academic Leadership Program “Priority-2030” in Siberian Federal University.

[1] Rajaramakrishna R., Nijapai P., Kidkhunthod P., Kim H.J., Kaewkhao J., Ruangtaweep Y., *J. Alloy. Comp.*, **813**, 151914, (2020).

[2] Ravangvong S., Chanthima N., Rajaramakrishna R., Kim H.J., Kaewkhao J., *J. Lumin.*, **219**, 116950, (2020).

[3] Zheng Y., Chen B., Zhong H., Sun J., Cheng L., Li X., Zhang J., Tian Y., Lu W., Wan J., Yu T., Huang L., Yu H., Lin H., *J. Am. Ceram. Soc.*, **94**, 1766–1772, (2011).

[4] Tian B., Chen B., Tian Y., Li X., Zhang J., Sun J., Haiyang Z., Cheng L., Fu S., Hua Z., Wang Y., Zhang X., Xia H., Hua R., *J. Mater. Chem. C*, **1**, 2338–2344, (2013).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ДИФРАКЦИЯ СВЕТОВЫХ ВОЛН С ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ НА ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММАХ В КУБИЧЕСКИХ ГИРОТРОПНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Шандаров С.М.¹, Буримов Н.И.¹, Злобин А.О.¹, Шмаков С.С.¹, Шмидт А.А.¹, Симонян Р.А.¹, Костеников М.А.¹, Навныко В.Н.²

¹ТУСУР, г. Томск, Россия

²Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, г. Мозырь, Беларусь

Рассмотрены особенности процессов взаимодействия и дифракции лазерных пучков с циркулярной поляризацией на пропускающих и отражательных фоторефрактивных голограммах в кубических гиротропных кристаллах класса силленитов.

Ключевые слова: фоторефрактивные голограммы, кубические гиротропные кристаллы, циркулярная поляризация.

Эффекты фазовой демодуляции сигнального лазерного излучения при его взаимодействии со стационарным опорным пучком на динамических голограммах, формируемых в кубических фоторефрактивных кристаллах, имеют высокую чувствительность к измеряемым механическим и акустическим колебаниям [1–4]. Кубические гиротропные кристаллы класса силленитов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, принадлежащие к классу симметрии 23, успешно используются в таких интерферометрических системах, обладающих адаптивностью к медленным вариациям внешних условий, благодаря удачному сочетанию величины и скорости фоторефрактивного отклика, а также возможности изготовления образцов различной ориентации с необходимыми размерами [1–3, 5]. Естественная оптическая активность силленитов обуславливает циркулярную поляризацию собственных волн, левую и правую, в отсутствие приложенных к образцам внешних электрических полей. Для обычно используемых в лазерных интерферометрических системах сигнальной и опорной волн с линейной поляризацией гиротропия приводит к зависимости коэффициентов их взаимной связи от координат и существованию оптимальной толщины кристалла [6], обеспечивающей максимум эффективности их взаимодействия. В настоящем сообщении рассматриваются эффекты попутного и встречного взаимодействия на динамических голограммах для циркулярно поляризованных опорной и предметной волн с одинаковыми и противоположными знаками вращения соответственно, когда коэффициенты двухпучковой связи являются неизменными по всей толщине гиротропного кристалла.

Рассматриваются наводимые полями фоторефрактивной решетки возмущения компонент диэлектрического тензора, обусловленные линейным электрооптическим эффектом Поккельса, и вторичным вкладом фотоупругости, совместно с пьезоэлектрическим и флексоэлектрическим эффектами. Получено, что вследствие электрогирации и флексогирации электрическими и упругими полями соответственно наводятся возмущения компонент псевдотензора гирации кристалла симметрии 23. На основе анализа волнового уравнения, учитывающего фазовые возмущения диэлектрического тензора и псевдотензора гирации фоторефрактивной решеткой и ее абсорбционную компоненту, а также условия синхронизма, выводятся уравнения связанных волн для амплитуд взаимодействующих опорной и сигнальной волн с циркулярной поляризацией, при попутной и встречной геометрии двухволнового взаимодействия. Подробно рассмотрены решения этих уравнений для попутного взаимодействия волн с правой и левой циркулярной поляризацией в кристалле среза (110) при ориентации вектора решетки вдоль кристаллографических направлений $[001]$ и $[00\bar{1}]$. Встречное взаимодействие подробно рассмотрено для ориентации векторов световых волн и вектора решетки вдоль кристаллографических направлений $[111]$ и $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023-2025 годы (задание FEWM-2023-0012).

[1] Petrov V., Hahn J., Petter J., Petrov M., Tschudi T., *Opt. Lett.*, **30**, 3138-3140, (2005).

[2] Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N., *J. Appl. Phys.*, **105**, 031101, (2009).

[3] Колегов А.А., Шандаров С.М., Симонова Г.В. и др., *Квант. электрон.*, **41**, 847-852, (2011).

[4] Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н., Безрук М.Н., Ермолаев С.А., *Квант. электрон.*, **46**, 277-280, (2016).

[5] Georges M.P., Scaufaire V.S., Lemaire P.C., *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, **72**, 761-765, (2001).

[6] Шепелевич В.В., *ЖЛС*, **78**, 493-515, (2011).

**ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА
ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ В ДИФфуЗИОННО ЛЕГИРОВАННЫХ
КРИСТАЛЛАХ LiNbO₃:Cu**

Анисимов Р.И., Темерева А.С., Колмаков А.А., Шандаров С.М.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований и теоретического анализа формирования объемных пропускающих голограмм картиной интерференции лазерных пучков с высоким контрастом в пластине X-среза LiNbO₃:Cu, созданной диффузионным легированием медью из металлической пленки.

Ключевые слова: фоторефрактивная голограмма, ниобат лития, дифракционная эффективность.

Представлены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований особенностей формирования фоторефрактивных голограмм картиной интерференции записывающих лазерных пучков в пластине X-среза LiNbO₃:Cu для случая различающихся распределений ионов меди в зарядовых состояниях Cu⁺ и Cu²⁺, каждое из которых описывается суммой двух функций Гаусса. Такие распределения наблюдались в [1] в образце LiNbO₃:Cu, предназначенном для реализации фотовольтаических пинцетов и созданным диффузионным легированием из металлической пленки меди.

С использованием подхода, развитого в [2], получено общее уравнение, описывающее временную эволюцию преобладающей компоненты электрической напряженности поля пространственного заряда $E_z(x,z,t)$ фоторефрактивной голограммы в приближении заданной интенсивности света $J(x,z)$ в интерференционной картине с периодом Λ , созданной двумя записывающими световыми волнами, распространяющимися симметрично относительно оси X в разомкнутом вдоль оси Z кристалле LiNbO₃:Cu. Решение этого уравнения, полученного для начального условия $E_z(x,z,0) = 0$, соответствующего включению записывающих световых пучков при $t = 0$, было получено в виде суперпозиции пространственных гармоник с периодами Λ/n , ($n = 0, 1, 2, \dots$). На начальном участке записи первая пространственная гармоника определяет квадратичную зависимость дифракционной эффективности от времени записи голограммы, а ее дальнейшая эволюция выражается с использованием модифицированной функции Бесселя первого порядка.

Для формирования динамических фоторефрактивных голограмм с $\Lambda = 10$ мкм использовалась методика, описанная в [2]. Два записывающих обыкновенных пучка с длиной волны 532 нм и мощностью 1,2 мВт и апертурой 1,1 мм обеспечивали среднюю интенсивность интерференционной картины около 47 мВт/см² на входной образца LiNbO₃:Cu, описанного в [1]. Наблюдаемая экспериментально временная зависимость дифракционной эффективности формируемой голограммы, показанная точками на рисунке для начального участка, аппроксимировалась функцией $\eta_{in}(t) = bt^2 + ct^3$ с параметрами $b = 7.63 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-2}$ и $c = -2.66 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-3}$, изображенной как сплошная кривая.

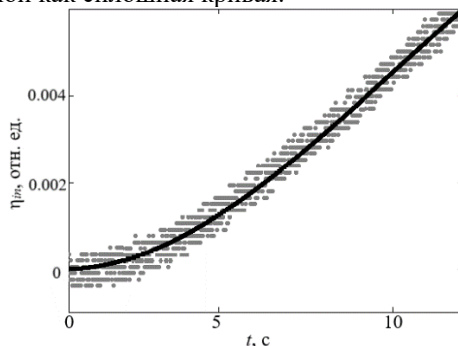


Рисунок. Временная зависимость дифракционной эффективности фоторефрактивной голограммы

Использование полученных соотношений для $E_z(x,z,t)$ и измеренного параметра b позволило оценить значение константы Гласса для исследуемой диффузионной структуры LiNbO₃:Cu, как $G = 8.4$ пм/В. Полученное значение является близким по порядку величины к приведенной в [3] константе Гласса для кристаллов LiNbO₃:Cu с объемным легированием, равной 5.5 пм/В.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках программы «Приоритет 2030» и Госзадания FEWM-2023-0012.

[1] Колмаков А.А., Темерева А.С., Анисимов Р.И., Михайленко А.В., Шандаров С.М., Тимофеев И.В., Пятнов М.В., XXXIII Всероссийская школа-семинар «волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова («Волны-2022»), 58-61, (2022).

[2] Мамбетова К.М., Шандаров С.М., Орликов Л.Н., Арестов С.И., Смирнов С.В., Серебряников Л.Я., Краковский В.А., *Опт. и спектр.*, **126**, №6, 856-861, (2019).

[3] Volk T., Wöhlecke M., Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, 247 p.

**ОПТИЧЕСКИЕ, РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ И ЛАЗЕРНО-АКУСТИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА КРИСТАЛЛОВ LiCaAlF₆**

**Желева Е.Б.^{1,2}, Семашко В.В.^{1,2}, Шавельев А.А.¹, Шакиров А.А.¹,
Низамутдинов А.С.¹, Морозов О.А.^{1,2}, Кяшкин В.М.³, Карабутов А.А.²,
Бродниковский Ю.П.²**

¹ФГАОУ ВО КФУ, Казань, Россия

²КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

³ФГБОУ ВО МГУ им. Н.П. Огарёва, г. Саранск, Россия

При выращивании кристаллов LiCaAlF₆ методом Бриджмена формируются разориентированные до 0.15° микроблоки, являющиеся причиной оптического анизотропного рассеяния света и затухания ультразвука в области частот 1-15 МГц, устраняемые процедурой отжига образцов.

Ключевые слова: лазерные кристаллы, рентгеноструктурный анализ, лазерная акустика.

Активированные ионами Ce³⁺ кристаллы LiCaAlF₆ (LiCAF) являются уникальными лазерными средами УФ диапазона спектра [1], а при активации ионами Cr³⁺ – составляют конкуренцию таким активным средам, как Cr³⁺:BeAl₂O₄ и Ti³⁺:Al₂O₃. При этом время жизни верхнего лазерного уровня ионов Cr³⁺ достигает 170 мкс, что позволяет осуществлять накачку этих кристаллов излучением импульсных Хе-ламп и лазерных диодов и реализовать перестраиваемую лазерную генерацию в диапазоне 720-887 нм с эффективностью до 69% [2]. Однако разработка технологии выращивания совершенных кристаллов LiCAF до сих пор остается актуальной задачей.

В настоящей работе приводятся результаты комплексных исследований выращиваемых кристаллов LiCAF традиционными оптическими методами и методами рентгеновской дифракции, а также осуществлена оценка возможности оперативной и количественной характеристики их качества методом лазерной акустики.

Неактивированные и активированные ионами Ce³⁺ и Cr³⁺ кристаллы LiCAF выращивались из расплава методом Бриджмена. Для уменьшения числа дефектов кристаллической структуры выращенных кристаллов дополнительно применяется их отжиг в атмосфере Ar-CF₄. Установлено, что в синтезированных кристаллах, не подвергнутых процедуре отжига, наблюдается микроблочность с размерами блоков около 10 мкм, разориентированных друг относительно друга на углы до 0.15 градусов. После процедуры отжига кристаллов в атмосфере CF₄ в течение 48 часов при температуре 790°C микроблочность устранялась. Аналогичное улучшение совершенства синтезируемых кристаллов после процесса отжига отразилось на их оптических свойствах: уменьшилась интенсивность рассеяния лазерного излучения внутри объема кристаллов и неоднородность показателя преломления составила менее 1.2×10^{-5} . Методами абсорбционной и оптоакустической спектроскопии были также исследованы зависимости концентраций ионов Ce³⁺ и Cr³⁺ вдоль направления роста кристаллов LiCAF и рассчитаны коэффициенты распределения этих ионов. Показано, что активация, вероятно, не оказывает существенного влияния на формирование микроблочной структуры при синтезе кристаллов LiCAF.

Также были проведены лазерно-акустические исследования кристаллов LiCAF с помощью дефектоскопа УДЛ-2М. Измерения осуществлялись вдоль направления оптической оси кристаллов в области частот ультразвуковых волн 1-15 МГц. Были определены зависимости скоростей продольных и сдвиговых волн и рассчитаны механические константы в различных областях кристаллов LiCAF. Кроме того, измерялся коэффициент затухания ультразвука в образцах. Коэффициент потерь ультразвуковых колебаний на границах раздела кристалла с воздухом и иммерсионной средой рассчитывались в соответствии с работой [3]. Результаты показывают, что коэффициент затухания для неотожженных образцов составил около 0.78 см⁻¹, а для отожженных – более чем в полтора раза меньше (около 0.45 см⁻¹).

Основываясь на результатах комплексных исследований, логично предположить, что образование центров рассеяния лазерного излучения, наблюдаемое в неотожженных образцах, связано с микроблочностью кристаллов LiCAF, а метод лазерной акустики измерения коэффициента затухания ультразвука может быть успешно использован для оперативной оценки качества синтезированных лазерных материалов.

Исследование акустических характеристик кристаллов LiCAF было проведено в рамках государственного задания ФИЦ «Казанский научный центр РАН».

[1] Semashko V.V., *Phys. Solid State*, **47**, 1507–1511, (2005).

[2] Demirbas U., *Progress in Quantum Electronics*, **68**, 100227, (2019).

[3] Справочник по технической акустике /ред. М. Хекла и Х.А. Мюллера, Ленинград: Судостроение, 440 с., (1980).

СТРУКТУРЫ С МНОГОУРОВНЕВЫМ УПОРЯДОЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ХИРАЛЬНЫХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Бакланова К.Д.^{1,2}, Долганов В.К.¹, Долганов П.В.¹

¹Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна Российской академии наук, г. Черноголовка, Россия

²Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Москва, Россия

Приводятся результаты исследований периодических структур с упорядочением различной размерности, образующихся на основе хирального жидкокристаллического фотонного кристалла. Обсуждаются нетривиальные спектральные свойства структур с двумерной периодичностью.

Ключевые слова: жидкокристаллические фотонные кристаллы, хиральность.

Хиральные жидкие кристаллы образуют ряд фотонно-кристаллических структур с различным типом упорядочения. Сравнительно простым примером является холестерический (хиральный нематический) жидкий кристалл, в котором хиральность молекул индуцирует образование одномерной спиральной структуры. Периодическое изменение ориентации молекул в пространстве приводит к модуляции показателя преломления и появлению фотонной запрещенной зоны для света, распространяющегося вдоль оси спирали.

В работе изучено поведение холестерических жидких кристаллов с различной периодичностью в оптических ячейках. Вблизи температуры перехода холестерика в изотропную жидкость наблюдалось спонтанное образование трех типов периодических структур [1, 2]. В холестерике с малым шагом спирали $p < 0.32$ мкм образуются так называемые Голубые фазы с трехмерным кубическим упорядочением. Для промежуточных значений шага спирали $0.32 \text{ мкм} < p < 1 \text{ мкм}$ наблюдается структура с двумерным квадратным упорядочением в плоскости образца. При большом шаге спирали $p > 1 \text{ мкм}$ образуется одномерная полосчатая структура в плоскости образца, период которой сопоставим с шагом спирали.

Основное внимание в работе уделено изучению модулированных структур с двумерным упорядочением в плоскости образца и периодичностью, существенно превышающей величину шага холестерической спирали [1]. Показано, что модулированная структура является стабильной вблизи перехода в изотропную фазу и может сохраняться как метастабильное состояние при охлаждении.

Изучены оптические свойства многоуровневых структур, полученных на основе холестерического жидкого кристалла с фотонной зоной в видимой области спектра (рисунок). Наблюдается сложная зависимость вида структуры от поляризации света. Нетривиальные оптические свойства связаны с селективным отражением в области фотонной запрещенной зоны и с вращением плоскости поляризации света. Вблизи фотонной зоны вращение плоскости поляризации света имеет гигантскую величину и сильно зависит от частоты.

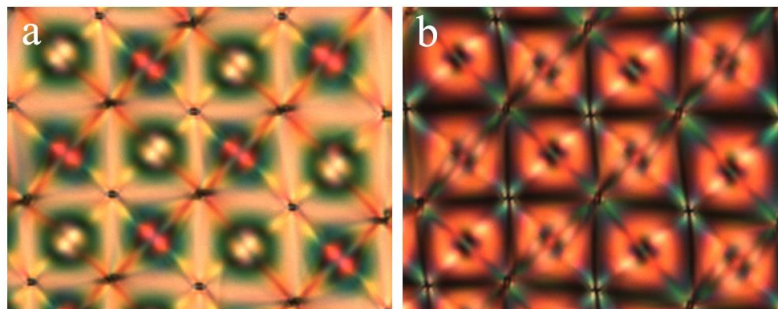


Рисунок. Фотографии двумерной модулированной структуры в проходящем свете. Поляризатор и анализатор параллельны (а), поляризаторы скрещены (б). Толщина образца 20 микрон, горизонтальный размер фотографий 90 микрон

Исследованы спектральные характеристики полученных структур и их трансформация при изменении внешних условий. Продемонстрировано, что индуцированное температурой смещение спектрального положения фотонной запрещенной зоны приводит к синхронному изменению оптических свойств двумерной структуры. Обсуждается связь наблюдавшихся периодических структур с другими упорядоченными структурами в жидкокристаллических средах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-12-00200.

[1] Dolganov P.V., Baklanova K.D., Dolganov V.K., *Phys. Rev. E*, **106**, 014703, (2022).

[2] Бакланова К.Д., Долганов В.К., Кац Е.И., Долганов П.В., *Письма в ЖЭТФ*, **117**, №7, 537-542, (2023).

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОМОДОВОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ДЕЛИТЕЛЯ НА ТОНКОПЛЕНОЧНОМ НИОБАТЕ ЛИТИЯ

Москалев Д.Н.^{1,2}, Козлов А.А.^{1,2}, Салгаева У.О.¹, Криштоп В.В.^{1,2,3}, Волинцев А.Б.¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

²ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь, Россия

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

Представлены результаты численного моделирования многомодовых интерференционных делителей (Multimode interference coupler, MMI-делитель) на основе анизотропных волноводов неглубокого травления на X-срезе тонкопленочного ниобата лития (LNOI).

Ключевые слова: MMI-делитель, анизотропные волноводы, тонкопленочный ниобат лития.

Одним из широко применяющихся в фотонике материалов является ниобат лития (LiNbO_3), однако существующие технологии изготовления фотонных интегральных схем (ФИС) на LiNbO_3 не позволяют создавать ФИС с большим числом элементов [1]. В статье [2] была показана технология Smart-Cut для получения LNOI, на основе которого могут быть изготовлены высококонтрастные волноводы для последующего создания ФИС с большим количеством интегрированных элементов [3].

Моделирование элементов ФИС на X-срезе LNOI осложняется его анизотропией и зависимостью тензора диэлектрической проницаемости от угла поворота элемента в плоскости ФИС. Обычно, с целью моделирования элементов ФИС на анизотропных материалах используются точные методы моделирования (Finite Difference Time Domain - FDTD, Finite Difference Frequency Domain - FDFD и другие.) к недостаткам которых относятся большое потребление вычислительных ресурсов и долгое время выполнения одной итерации моделирования. Нами была разработана методика упрощения сложного моделирования анизотропной структуры [4]. В настоящей работе данная методика применялась для моделирования MMI-делителей 1×2 и 2×2 . В качестве входных и выходных волноводов MMI-делителей использовались линейные адиабатические тейперы, позволяющие снизить оптические потери на рассеянии.

Моделируемые делители были направлены вдоль Y-кристаллографической оси X-среза LNOI. Трехмерная задача была сведена к двумерной с помощью метода эффективного показателя преломления, после чего использовался метод распространяющегося пучка с целью моделирования распределения интенсивности излучения в топологии MMI-делителя 1×2 (рис. (а)) и MMI-делителя 2×2 (рис. (б)).

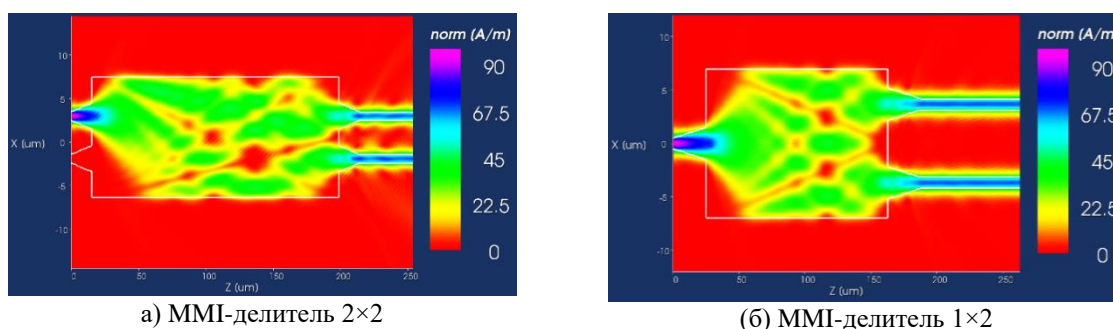


Рисунок. Распределение интенсивности ТМ-моды в топологии MMI-делителей

Потери в топологии оценивались с помощью расчета интеграла перекрытия входной моды излучения и мод в каждом выходном волноводе и составили не более 2 % от входной мощности. Таким образом, в настоящей работе была апробирована методика, предложенная в статье [4], для быстрого прототипирования MMI-делителей на основе анизотропного LNOI. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

[1] Bazzan M., Sada C., *Applied Physics Reviews*, **2**, №4, 040603-1–040603-25, (2015).

[2] Feng X. Q., Huang Y., *International Journal of Solids and Structures*, **41**, №16-17, 4299-4320, (2004).

[3] Wang Y., Chen Z., Hu H., *Crystals*, **8**, №5, 191, (2018).

[4] Moskaev D., Kozlov A.A. et al., *Applied Sciences*, **13**, №11, 6374, (2023).

**ФОТОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ГЕНЕРАЦИЯ КОРОТКИХ
ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В АКТИВНОЙ СРЕДЕ $\text{LiLu}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}$**

**Низамутдинов А.С.¹, Макарова Д.А.¹, Сидоров И.Д.¹, Хамдан Я.¹,
Шавельев А.А.¹, Кораблева С.Л.¹, Семашко В.В.^{1,2}**

¹ФГАОУ ВО Казанский федеральный университет, Казань, Россия

²КФТИ им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

В настоящей работе продемонстрирована лазерная генерация коротких импульсов (400 пс) в активной среде $\text{LiLu}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}$ в режиме модуляции потерь, обусловленных фотодинамическими процессами и центрами окраски в активной среде. Показано, что при факторы внешней подсветки и температуры активной среды являются каналами управления уровнем внутрирезонаторных потерь и, следовательно, характеристиками лазерной генерации, а именно величиной дифференциального КПД и формой импульса.

Ключевые слова: лазерная генерация, модуляция внутрирезонаторных потерь, фотодинамические процессы.

Актуальным для технологических применений является переход к лазерам, обеспечивающим генерацию в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне спектра и имеющим короткую длительность импульса. Одним из перспективных методов получения УФ-генерации является использование в качестве активных сред фторидных кристаллов, легированных ионами Ce^{3+} [1]. Но проблемой этого подхода является сложная картина фотодинамических процессов в УФ активной среде, приводящих к образованию центров окраски [1]. Как было показано ранее [1, 2], уровень потерь за счет центров окраски не является постоянным и в процессе лазерной генерации определяется факторами их обесцвечивания, т.е. интенсивностью излучения внутри резонатора, внешней подсветки, температурой активной среды. Таким образом, центры окраски являются физической основой для организации модуляции добротности или даже синхронизации мод.

Целью данной работы является достижение лазерной генерации на кристалле $\text{LiLu}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}$ ($\text{Ce}:\text{LLYF}$) в УФ диапазоне в форме коротких импульсов и демонстрация модуляции динамических процессов излучением накачки, дополнительным облучением и температурой.

Мы получили лазерную генерацию в форме одиночных коротких импульсов длительностью 400 ± 50 пс в кристаллах $\text{Ce}:\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$ на длине волны 311 нм. Импульсы накачки от лазера $\text{Ce}:\text{LiCaAlF}_6$ на длине волны 289 нм имели длительность 6 нс при частоте следования 10 Гц. Была продемонстрирована модуляция внутрирезонаторных потерь, подобно модуляции добротности, за счет обесцвечивания центров окраски в активной среде $\text{Ce}:\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$. Дополнительная подсветка активной среды лазерным светом 532 нм увеличивает дифференциальный КПД лазерной генерации за счет обесцвечивания центров окраски [3]. Варьированием температуры активной среды удалось управлять количеством коротких импульсов в последовательности импульсов, по-видимому, за счет управления населенностью центров окраски.

Интерпретация процессов, обуславливающих влияние фотодинамических процессов на генерационные характеристики активной среды была проведена на основе моделирования. Была разработана математическая модель активной среды с вероятностными уравнениями, включающими процессы поглощения из возбужденного состояния, образования и разрушения центров окраски [4]. Экспериментальные данные были аппроксимированы результатом численного решения системы дифференциальных уравнений за счет варьирования параметров фотодинамических процессов. Например, значительная вероятность захвата электрона дефектом из зоны проводимости $((7,1\pm 0,9)10^9 \text{ c}^{-1})$ свидетельствует о высокой скорости исчезновения состояния насыщения. Таким образом, образование центров окраски превращает УФ-активную среду в многофункциональный материал, работающий как усиливающая среда и модулятор одновременно.

Результаты аппроксимации показывают, что изменения дифференциального КПД и формы импульса лазерной генерации хорошо описываются эволюцией внутрирезонаторных потерь, обусловленных фотодинамическими процессами. Возникающий контраст потерь определяется температурой активной среды, а также интенсивностью обесцвечивающей центры окраски подсветки, и достигает значений 50 %.

Работы выполнены за счет субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету в рамках Государственного задания на научные исследования FZSM-2023-0012.

[1] Sarukura N., *Optics Letters*, **20**, 599, (1995).

[2] Nurtdinova L., Korableva S., *Laser Physics Letters*, **11**, 12580, (2014).

[3] Kaczmarek S.M., Bensalah A., Boulon G., *Optical Materials*, **28**, 1, 123-128, (2006).

[4] Низамутдинов А.С., Рахимов Н.Ф., Чиркова М.В., Фарухшин И.И., Мадиров Э.И., Марисов М.А., Кораблева С.Л., Семашко В.В., *XIII международные чтения по квантовой оптике (IWQO – 2019): Сборник тезисов*, Москва: Тривант, 352-354, (2019).

ВСТРЕЧНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В КРИСТАЛЛАХ ТИТАНАТА ВИСМУТА И СИЛИКАТА ВИСМУТА СРЕЗА (111)

Симонян Р.А., Костеников М.А., Шмаков С.С., Шандаров С.М., Буримов Н.И.
ТУСУР, г. Томск, Россия

Исследовано встречное взаимодействие сильной стационарной волны накачки со слабой фазово-модулированной сигнальной волной, имеющих круговые поляризации противоположных знаков вращения, в кристаллах силиката и титаната висмута среза (111).

Ключевые слова: встречное взаимодействие, кристалл класса силленитов, флексоэлектрический эффект.

Экспериментальные исследования проводились на экспериментальной установке, аналогичной используемой в работе [1]. В качестве регистрирующей отражательную голограмму среды использовался кристалл титаната висмута, а после силикат висмута среза (111). Аппроксимация и анализ экспериментальных данных сигнала фазовой демодуляции адаптивного голографического интерферометра на основе встречного взаимодействия в кристаллах проводилась на ЭВМ с использованием программы [2].

Для анализа амплитуд гармоник сигнала фазовой демодуляции использовались выражения, представленные ниже:

$$M^{(0)} = 1 + J_0^2(\varphi_m) \left\{ \exp(\Gamma_a d) - 1 + \frac{\Gamma_{il}^2}{\Gamma_a^2 + (4\rho - \Gamma_f)^2} \times \right. \\ \left. \times \left(1 + \exp(\Gamma_a d) - 2 \exp\left(\frac{\Gamma_a}{2} d\right) \sin\left(2\rho - \frac{\Gamma_f}{2} d\right) \right) \right\}, \quad (1)$$

$$M^{(1)} = -4J_0(\varphi_m)J_2(\varphi_m) \exp\left(\frac{\Gamma_a}{2} d\right) \sin\left(\frac{\Gamma_f}{2} d\right), \quad (2)$$

$$M^{(2)} = 4J_0(\varphi_m)J_2(\varphi_m) \left[\exp\left(\frac{\Gamma_a}{2} d\right) \sin\left(\frac{\Gamma_f}{2} d\right) - 1 \right], \quad (3)$$

где $J_n(\varphi_m)$ – функция Бесселя n -го порядка от амплитуды синусоидальной фазовой модуляции $\varphi_m \approx 4\pi l/\lambda$; l – амплитуда колебаний зеркала, задающего модуляцию сигнального пучка [1]; ρ – удельное оптическое вращение; d – толщина кристалла.

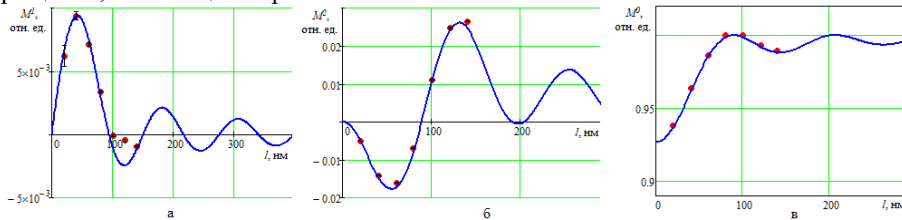


Рис. 1. Графики относительных амплитуд первой (а), второй (б) и нулевой (в) гармоник сигнала фазовой демодуляции

Сплошные линии на графиках, представленных на рис. 1, соответствует расчёту, выполненному при помощи соотношений (1)-(3) с использованием коэффициентов $\Gamma_a = 25 \text{ см}^{-1}$, характеризующий вклад абсорбционной составляющей голограммы в фоторефрактивный отклик, $\Gamma_f = -44 \text{ см}^{-1}$ и $\Gamma_{il} = 3,4 \text{ см}^{-1}$, характеризующие вклады обратного флексоэлектрического и линейного электрооптического эффектов в фоторефрактивный отклик соответственно.

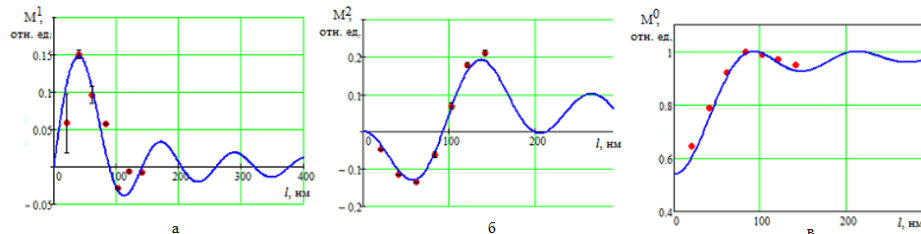


Рис. 2. Зависимости относительных амплитуд для первой (а), второй (б) и нулевой (в) гармоник сигнала фазовой демодуляции от амплитуды колебаний отражающей поверхности

В ходе проведения экспериментальных исследований титаната висмута среза (111) нами было получено, что амплитуды первой и второй гармоник (рис. 2) сигнала фазовой демодуляции не стабильны во времени проведения эксперимента.

[1] Шандаров С.М., Шмаков С.С., Буримов Н.И. и др., *Письма в ЖЭТФ*, **95**, №12, 699-702, (2012).

[2] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022668192. Нейронная сеть для анализа сигнала фазовой демодуляции адаптивного голографического интерферометра / С.С. Шмаков, Р.А. Симонян, М.А. Костеников и др. – Заявка №2022666990. Дата поступления 19 сентября 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 4 октября 2022 г.

ЕДИНИЧНЫЕ ЦЕНТРЫ ОКРАСКИ В ШИРОКОЗОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Мартынович Е.Ф., Дресвянский В.П.

Иркутский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Россия

Реализованы методы создания единичных центров окраски в широкозонных кристаллах, измерены параметры траекторий интенсивности люминесценции, определены вероятности различных переходов, рассматриваются возможности конструирования массивов кубитов на центрах окраски в различных кристаллах методами лазерных и лучевых технологий, обнаружены новые центры.

Ключевые слова: пространственно-селективный время-коррелированный счет фотонов, люминесценция, единичный центр.

Интерес к изучению люминесценции одиночных центров определяется потребностями развития теоретических представлений о взаимодействии света и вещества, а также разработкой различных приложений [1, 2]. Центры окраски в различных кристаллах широко используются в качестве рабочих центров детекторов различных излучений, оптических носителей для записи и хранения визуальной и цифровой информации [3-5], в методах исследования высоконелинейного взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом [6, 7]. Актуальна разработка новых принципов спектроскопической дифференциации радиационных дефектов и других квантовых систем по характеристикам люминесценции единичных центров [8, 9]. В последние годы стали актуальными исследования, направленные на развитие квантовых технологий с применением единичных центров [10].

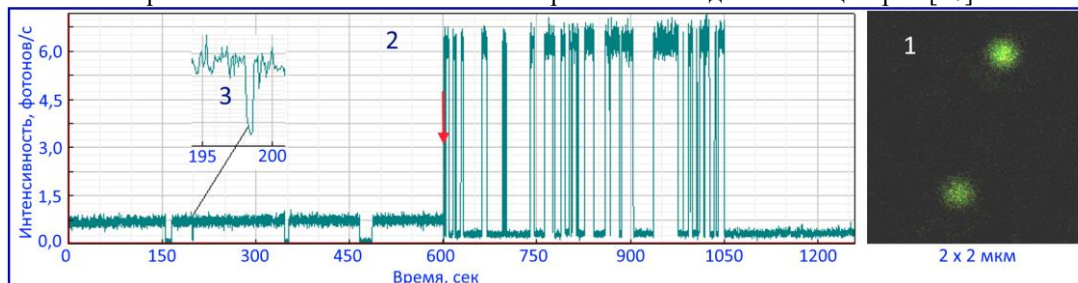


Рисунок. Конфокальные сканированные люминесцентные изображения единичных центров окраски (1).

Траектория интенсивности люминесценции единичного центра при двух разных значениях интенсивности возбуждающего излучения (2). Растянутый во времени фрагмент траектории (3). Момент переключения интенсивности возбуждения показан красной стрелкой

Исследования проведены, в основном, с помощью конфокального сканирующего люминесцентного микроскопа MicroTime 200, работающего в режиме время-коррелированного счета одиночных фотонов. Впервые исследована проблема изменения характеристик траекторий интенсивности люминесценции и величин постоянных времени затухания люминесценции одиночных квантовых систем в конденсированных средах неоднородными внутрикристаллическими полями в условиях, когда невозможно зарегистрировать неоднородное уширение их спектральных линий, вследствие их огромного электронно-колебательного уширения. Доказано, что обобщенные временные характеристики траекторий интенсивности (рисунок), такие как средняя продолжительность on- и off-интервалов или их отношения могут служить дополнительными спектроскопическими признаками для идентификации и дифференциации электронно-колебательных квантовых систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Плана фундаментальных исследований РАН на период до 2025 г. (проект № 0243-2021-0004).

[1] William E. Moerner, Nobel Lecture, December 8, (2014).

[2] Ерёмчев И.Ю., Ерёмчев М.Ю., Наумов А.В., *УФН*, **189**, №3, 312-322, (2019).

[3] Martynovich E.F., Chernova E.O., Dresvyansky V.P., et. al., *Optics & Laser Technology*, **131**, 106430, (2020).

[4] Мартынович Е.Ф., Патент РФ на изобретение № 2781512 С1, 12.10.2022.

[5] Мартынович Е.Ф., Патент РФ на изобретение № 2758567 С1, 29.10.2021.

[6] Martynovich E.F., Dresvyansky V.P., Rakevich A.L., Lazareva N.L., et. al., *Applied Physics Letters*, **114**, №12, 121901, (2019).

[7] Martynovich E.F., Lazareva N.L., Zilov S.A., *Journal of Luminescence*, **234**, 117989, (2021).

[8] Krivosheev N.D., Zilov S.A., Dresvyanskiy V.P., Martynovich E.F., *Journal of Luminescence*, **257**, 119688, (2023).

[9] Мартынович Е.Ф., Зилов С.А., Дресвянский В.П., *Опт. и спектр.*, **131**, №5, 667-675, (2023).

[10] Smith J.M., Meynell S.A., Bleszynski Jayich A.C., Meijer J., *Nanophotonics*, **8**, №11, 1889–1906, (2019).

**СИНТЕЗ И ПЛАЗМОННАЯ НАСТРОЙКА ЗОЛОТЫХ И ГИБРИДНЫХ
НАНОЧАСТИЦ И РАМАНОВСКИХ МЕТОК С УСИЛЕНИЕМ ПОЛЯ
В СУБНАНОМЕТРОВЫХ ЗАЗОРАХ**

Хлебцов Н.Г.^{1,2}, Хлебцов Б.Н.¹, Дыкман Л.А.¹

¹Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов,
ФИЦ Саратовский научный центр Российской академии наук» (ИБФРМ РАН), г. Саратов, Россия

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

Обсуждаются методы плазмонной настройки золотых и гибридных наночастиц, синтезируемых в лаборатории нанобиотехнологии ИБФРМ РАН, а также гибридные наночастицы золота и золота/серебра, в которых молекулы комбинационного рассеяния (RM) встроены в зазоры ~1 нм между металлическими слоями Au@RM@Au, Au@RM@Ag.

Ключевые слова: плазмоника, синтез наночастиц, рамановские метки.

Плазмонные частицы являются бурно развивающимся материалом нанотехнологий для применения в биомедицине в качестве фототермических, сенсорных, биоимиджинговых и терапевтических агентов [1-4]. В большинстве тераностических приложений используются уникальные оптические свойства золотых или гибридных наночастиц, в которых видимый или ближний инфракрасный свет возбуждает локализованные плазмонные резонансы. В данной работе обсуждаются последние достижения в области синтеза наиболее популярных плазмонных наночастиц, включая золотые наносферы, наностержни, золотые наноболочки на силикатных сферах, золотые наноклетки, нанозвезды, а также наностержни Au@Ag и нанокубоиды [4]. Наше рассмотрение сосредоточено на принципах контроля размера, формы и структуры частиц, что позволяет осуществлять желаемую настройку оптических свойств, таких как длина волны плазмонного резонанса и сечения поглощения и рассеяния. Представлена галерея синтезируемых в лаборатории нанобиотехнологии ИБФРМ РАН наноструктур 20 типов, включая частицы различных форм и неоднородные гибридные частицы (AuNP@Ag, AuNP@mSiO₂, mSiO₂@AuNP, AuNP@polyAb, AuNP@PEG-SH@mAb и т.п.), мгновенно растворимые порошки наночастиц и атомарные флуоресцентные нанокластеры (1-2 нм) [1, 5].

В заключительной части работы рассматриваются слоистые наночастицы золота и золота/серебра, в которых молекулы комбинационного рассеяния (рамановские молекулы, RM) встроены в зазоры ~1 нм между металлическими слоями (Au@RM@Au, Au@RM@Ag) [6]. Эти композиты называются рамановскими метками с усилением поля в зазоре (gap-enhanced Raman tags, GERTs), и они имеют большой потенциал в биомедицинских приложениях в качестве высокоэффективных зондов SERS для визуализации биообъектов [7, 8]. По сравнению с обычными метками SERS с внешними RM, возбуждаемыми плазмонным ближним полем, встроенные RM новых зондов защищены от условий окружающей среды и возбуждаются значительно усиленным локальным полем в зазоре, превышающим локальное поле около частиц более чем на порядок. Благодаря сильному отклику метки GERTs существенно расширяют возможности биовизуализации, вплоть до уровня отдельных частиц [9]. Кроме того, эти метки значительно повышают чувствительность иммуноанализа в иммунохроматографии [10].

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 19-14-00077).

[1] Dykman L.A., Khlebtsov N.G., *Chem. Soc. Rev.*, **41**, 2256-2282, (2012).

[2] Dykman L., Khlebtsov N., *Gold Nanoparticles in Biomedical Applications*, CRC Press: Boca Raton and London, (2017).

[3] Khlebtsov N., Dykman L., Khlebtsov B. *Russ. Chem. Rev.*, **91**, no. 10, art. RCR5058, (2022).

[4] Khlebtsov N.G., Dykman L.A., Khlebtsov B.N., *Light, Plasmonics, and Particles* / Eds. Mengüç M.P., Francoeur M., Amsterdam, Oxford UK, Cambridge MA: Elsevier, Chapter 13, pp. 249-270, (2023).

[5] Dykman L.A., Khlebtsov N.G., *Russ. Chem. Rev.*, **88**, no. 3, 229-247, (2019).

[6] Khlebtsov B.N., Khlebtsov N.G., *J. Phys. Chem. C*, **120**, 15385-15394, (2016).

[7] Khlebtsov N., Lin L., Khlebtsov B., Ye J., *Theranostics*, **10**, 2067-2094, (2020).

[8] Khlebtsov B., Burov A., Pylaev T., Savkina A., Prikhozhenko E., Bratashov D., Khlebtsov N., *J. Biophotonics*, **15**, no. 3, e202100281, (2022).

[9] Khlebtsov B.N., Burov A.M., Bratashov D.N., Tumskiy R.S., Khlebtsov N.G., *Langmuir*, **36**, 5546-5553, (2020).

[10] Khlebtsov B.N., Bratashov D.N., Byzova N.A., Dzantiev B.B., Khlebtsov N.G., *Nano Research*, **12**, 413-420, (2019).

ПЛАВНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ШАГА СПИРАЛИ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ХОЛЕСТЕРИКА ПРИ ПЛАНАРНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Абдуллаев А.С.¹, Крахалев М.Н.^{1,2}, Зырянов В.Я.¹

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

²Институт инженерной физики и радиоэлектроники, СФУ, г. Красноярск, Россия

Исследовалась ячейка светочувствительного холестерика с планарными граничными условиями: однонаправленными на одной подложке и азимутально вырожденными на второй. Светочувствительный холестерик при исследуемых граничных условиях позволяет реализовать плавное изменение шага спирали.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, светочувствительная хиральная добавка.

Холестерические жидкие кристаллы (ХЖК) обладают уникальным свойством периодической модуляции показателя преломления, их еще называют мягкими одномерными фотонными кристаллами. Это обусловлено геликоидальным ориентационным упорядочением молекул с шагом спирали p на котором директор (единичный вектор, направленный вдоль преимущественной ориентации длинных осей молекул) поворачивается на угол 2π . При этом ХЖК крайне чувствительны к внешним стимулам, таким как электрические (магнитные) поля, температура, механические напряжения. Именно поэтому ХЖК широко применяются в оптике и фотонике, например, в настраиваемых дифракционных решетках [1], лазерах [2] и во вращателях поляризации света [3]. В последнее время возросшим интересом обладают светочувствительные ХЖК, которые при воздействии света изменяют шаг спирали. Такие системы имеют преимущества пространственного, удаленного и временного контроля, при этом актуальной проблемой является скачкообразное изменение шага спирали светочувствительных холестериков при гомогенных тангенциальных граничных условиях. Данная работа посвящена исследованию тонкой и непрерывной перестройки шага спирали в слое светочувствительного холестерика при тангенциальных граничных условиях, которые азимутально вырождены на одной из подложек.

В работе исследовалась ХЖК ячейка, склеенная из двух стеклянных подложек и заполненная холестериком. Для формирования однонаправленного (гомогенного) тангенциального сцепления на одну подложку наносился тонкий слой поливинилового спирта (ПВС) и механически натирался. Другая подложка покрывалась пленкой политретбутилметакрилата (ПТБМА). В качестве ХЖК использовался нематик ЛН-396 (Белорусский государственный технологический университет), допированный левозакручивающей хиральной добавкой S5011 (Macklin) и светочувствительной правозакручивающей хиральной добавкой cChD (ИХНМ НАН Беларуси) [4] в концентрациях 0,45 % и 1,20 %, соответственно. У добавки cChD закручивающая сила уменьшается при освещении УФ-светом ($\lambda = 365$ нм) и увеличивается при освещении синим светом ($\lambda = 430$ нм). Это позволяет изменять шаг спирали холестерика. При этом, за счет азимутального вырождения ориентации директора на пленке ПТБМА в ХЖК ячейке реализуется плавный поворот угла закрутки директора в диапазоне от -180° до $+180^\circ$, где на всем интервале изменения закрутки ориентационная структура остается однородной и бездефектной (рисунок). Изменяя баланс между управляющим УФ и синим излучениями, угол закрутки структуры может быть зафиксирован в любом положении в интервале от -180° до $+180^\circ$. Таким образом, исследуемая система обеспечивает тонкое и плавное управление шагом спирали, что может быть использовано для создания фотоуправляемых вращателей поляризации света или дифракционных решеток.

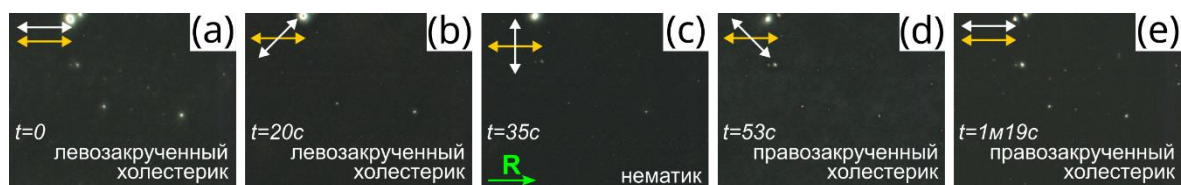


Рисунок. Фотографии слоя ХЖК с тангенциальными граничными условиями в исходном состоянии (а), и сделанные в процессе воздействия белого света осветительной системы микроскопа в моменты, когда минимум пропускания соответствовал углу между анализатором и поляризатором -45° (b), -90° (c), -135° (d), -180° (e). Направление поляризатора и анализатора показаны двойной желтой и белой стрелками, соответственно. Направление натирки R пленки ПВС обозначено одинарной стрелкой

Участие в Конференции «Невская Фотоника – 2023» обеспечено при поддержке Красноярского краевого фонда науки (проект № 20230614-03784).

- [1] Zola R.S., Bisoyi H.K., Wang H., Urbas A.M., Bunning T.J., Li Q., *Adv. Mater.*, **31**, 1806172, (2019).
- [2] Marshall K.L., Kafka K.R.P., Urban N.D., Wallace J.U., Demos S.G., *Sci Rep*, **12**, 10969, (2022).
- [3] Sutormin V.S. et al., *Opt. Mater. Express*, **11**, 1527-1536, (2021).
- [4] Chepeleva D.S. et al., *Doklady BGUIR.*, **7** (125), 28-31, (2019).

**ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ ДАММАННА СОЗДАННЫЕ
КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ФОТООРИЕНТАЦИИ И
ТРАВЛЕНИЕМ ИОННЫМ ПУЧКОМ**

Барма Д.Д.^{1,2}

¹ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН, Москва, Россия

²Сколковский Институт Науки и Технологий, Москва, Россия

Электрически управляемые жидкокристаллические решетки Дамманна находят применение в устройствах дополненной и виртуальной реальности. В данной работе представлена технология создания таких структур, сформированных сфокусированным ионным пучком (ФИП) на слое азокрасителя с одномерной решеткой, выполненной методом фотоориентации.

Ключевые слова: решетки Дамманна, жидкие кристаллы, дифракция.

За последние десятилетия метаповерхности стали одним из наиболее перспективных элементов фотонных устройств. Они представляют собой двумерные аналоги метаматериалов, которые способны контролировать поляризацию, форму волновых фронтов и направление распространения света [1]. Поскольку жидкие кристаллы (ЖК) обладают оптической анизотропией и могут изменять свои параметры под действием приложенного электрического поля, то их комбинация с метаповерхностями открывает новые возможности для создания перестраиваемых оптических элементов. Для создания метаповерхностей применяется метод обработки ориентирующей поверхности при помощи ФИП [2]. И далее собираются ЖК ячейки толщиной 4 мкм, в которых первая подложка была обработана ФИП, а вторая содержала вертикально ориентирующий слой.

В данной работе представлена технология создания ЖК метаповерхностей сформированных сфокусированным ионным пучком на слое азокрасителя *Brilliant Yellow* (BY). На пленку красителя была спроецирована голографическая решетка (длина волны лазера $\lambda=457$ нм) с периодом 2 мкм, возникающая в результате интерференции двух пучков с ортогональными круговыми поляризациями. Подготовленная подложка подвергалась обработке ФИП. Также, как и в работе [2], после подготовки подложек была собрана ячейка с зазором 4 мкм и ЖК марки E7. В ЖК смесь была добавлена хиральная добавка гексасорбит 0.02%, что позволило значительно подавить образование двойниковых дефектов ориентации директора ЖК.

На рисунке представлены изображения, полученные на оптическом микроскопе в неполяризованном белом свете. Первое изображение – это дифракция, полученная на решетке Дамманна (множественные максимумы, имеющие распределение во всех направлениях), и дифракция от голограммы с периодом 2 мкм (горизонтальное распределение максимумов) записанной на ориентирующем слое BY. Второе изображение – это фото двумерной структуры в ЖК ячейке.

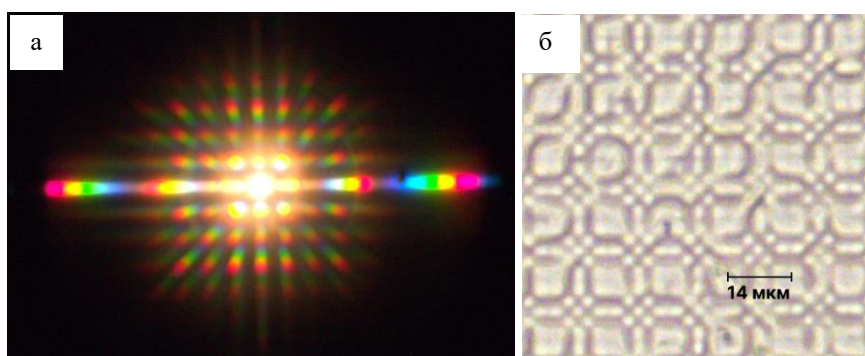


Рисунок. Дифракция от ЖК ячейки с 2D решеткой Дамманна с периодом 14 мкм (а) и микрофотография полученной текстуры (б)

[1] Kildishev A.V., Boltasseva A., Shalaev V.M., *Science*, **339**, 1289-1295, (2013).

[2] Mamonova A.V., Simdyankin I.V., Kasyanova I.V., Artemov V.V., Geivandov A.R., Palto S.P., Ezhov A.A., Gorkunov M.V., *Liquid Crystals*, **49**, (2022).

ОСОБЕННОСТИ ЭКСИТОНОПОДОБНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В НЕИДЕАЛЬНОЙ 1D ФОТОННОЙ СТРУКТУРЕ – ЦЕПОЧКЕ МИКРОПОР

Безус Ю.А., Румянцев В.В., Федоров С.А.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, ДНР, Россия

Исследована зависимость дисперсионных характеристик экситоноподобных квазичастичных возбуждений в неидеальной 1D решетке микропор от концентрации дефектов структуры, связанных с вариацией положений микропор.

Ключевые слова: экситоноподобные возбуждения, фотонная 1D решетка, дефекты структуры.

Появление новых оптоэлектронных устройств, использующих различные приложения современной фотоники, начиная от сбора света нанофотонными волноводами до квантовой обработки информации, предполагает формирование соответствующих наноконструктивных материалов, как источников когерентного излучения. В частности, в последнее время большой интерес проявляется к фотонным решеткам Лайбеа [1], обеспечивающих сильное удержание света таких кристаллических системах и открывающих пути для разработки новых схем захвата света. Привлекательными объектами для целей квантовой обработки информации может быть массив микропор – микрорезонаторов [2].

Особое внимание в настоящее время уделяется развитию фотоники несовершенных структур (см., например, работу [3]). В частности, проведенные в рамках неидеальной фотоники исследования показали, что наличие в исследуемом объекте определенных дефектов приводит к необходимым изменениям энергетического спектра элементарных электромагнитных возбуждений и оптических его свойств, обусловленных перестройкой структуры. Таким образом, выполненное в данной работе исследование квазичастичных возбуждений фотонной подсистемы в одном из типов пористых структур - неидеальной 1D цепочке микропор со случайной вариацией расстояний между ними, представляет интерес.

В данной работе на основе общей теории [4] рассмотрены электромагнитные возбуждения (так называемые экситоноподобные возбуждения [5]) в двухподрешеточной 1D решетке микрорезонаторов. Получены соответствующие дисперсионные соотношения $\omega_{\pm}(k, C_1, C_2)$ для возбуждений фотонной подсистемы исследуемой пористой структуры. Поверхности, описывающие дисперсионную зависимость частот исследуемых коллективных возбуждений от концентрации C_1, C_2 структурных дефектов (вариации положений микропор в первой и второй подрешетках) в неидеальной решетке микрорезонаторов, представлены на рисунке а, б).

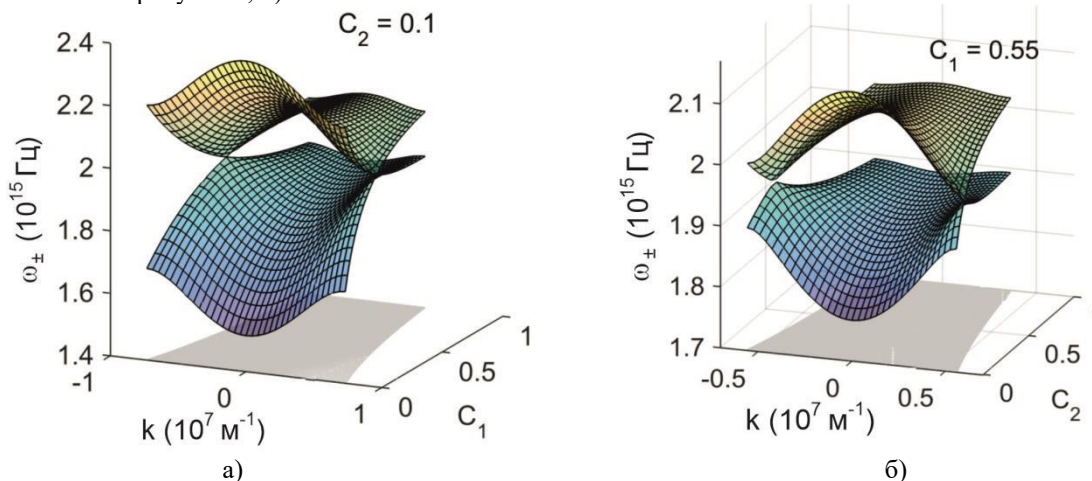


Рисунок. Концентрационная зависимость $\omega_{\pm}(k, C_1, C_2)$:

а) при $C_1 = 0.3, C_2 = 0.1$; б) при $C_1 = 0.55, C_2 = 0.4$

- [1] Xia S., Ramachandran A., Xia S., et al., *Phys Rev Lett.*, **121**, 263902, (2018).
- [2] Sedov Ye.S., Alodjants A.P., Arakelian S.M., Chuang Y.-L., Lin Y.Y., Yang W.-X., Lee R.-K., *Phys. Rev. A.*, **89**, 033828, (2014).
- [3] Rumyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V., Gurov D.A., Kavokin A.V., *Superlattices and Microstructures*, **120**, 642-649, (2018).
- [4] Rumyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V., Paladyan Yu.A., *Physica B*, **571**, №15, 296-300, (2019).
- [5] Rumyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V., Sychanova M.V., Kavokin A.V., *Nature. Scientific Reports*, **4**, 6945, (2014).

НОВЫЕ ФОТОПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ИНДОЛИНОВЫХ СПИРОПИРАНОВ С ПОГЛОЩЕНИЕМ В БЛИЖНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ

Дмитриев В.С., Пугачев А.Д., Козленко А.С., Быкусов В.В., Макарова Н.И., Ростовцева И.А., Ожогин И.В., Лукьянов Б.С.

НИИ ФОХ ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Изучены спироциклические соединения на основе индолина с винил-3*H*-индолиевым заместителем в 2*H*-хроменовом фрагменте. Рассмотрено равновесие между формами в зависимости от заместителей, проведен молекулярный докинг для выявления способности связываться с молекулами ДНК.

Ключевые слова: спиропираны, флуоресценция, фотохромизм.

В настоящее время значительное внимание уделяется разработке динамических материалов на основе спиропирана (СП). Это обусловлено способностью данного класса молекул претерпевать структурные изменения, сопровождающиеся крайне резким изменением свойств, в ответ на различные внешние раздражители (рисунок) [1]. Такое обратимое превращение в мероцианиновую форму (МЦ) позволяет увеличить полярность молекул и вызвать фотолуминесценцию, что делает их перспективными для использования в фотохромных наночастицах с фотоуправляемой флуоресценцией в биовизуализации [2].

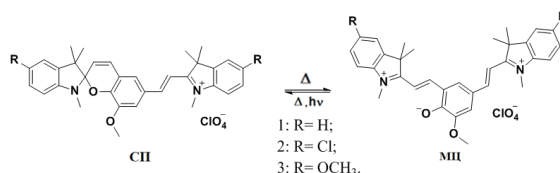


Рисунок. Фотоизомеризация спиропиранов **1-3**

Отдельный интерес вызывают спиропираны на основе индолина с сопряженным винил-3*H*-индолиевым заместителем в 2*H*-хроеновой части молекулы, потенциально обладающие флуоресценцией в ближнем ИК-диапазоне в одной или нескольких изомерных формах. Такие соединения используются при создании оптических материалов с высокой чувствительностью к изменению окружающей среды, а также для разработки новых методов обнаружения биомолекул.

Полученные спиропираны **1-3** в растворе находятся в равновесии между двумя формами - СП и МЦ, причем равновесие смещается в зависимости от заместителей в 5 и 5' положениях. Введение метоксигруппы в индолиновый гетероцикл и катионный фрагмент соединения **3** приводит к значительному сдвигу равновесия в сторону МЦ изомера, а атомов хлора в соединении **2** - в сторону СП формы. Это подтверждается изменением интенсивности максимумов в спектре поглощения в диапазоне 670-683 нм, характерных для МЦ изомера. Введение атома хлора и метоксигруппы в положения 5 и 5' приводит к батохромному сдвигу максимумов МЦ изомера на 13 и 8 нм соответственно. Соединения **1-3** обладают флуоресценцией в диапазоне биологического окна при 744, 755 и 748 нм соответственно. Введение метоксигруппы в положение 8' приводит к батохромному сдвигу максимума флуоресценции на 29 нм по сравнению с фторзамещенным структурным аналогом, полученным ранее [3]. Введение атома хлора и метоксильной группы в положения 5 и 5' увеличивает значения батохромного сдвига фотолуминесценции еще на 11 и 4 нм соответственно, однако квантовый выход флуоресценции уменьшается или увеличивается в зависимости от заместителя.

Проведен молекулярный докинг спиропиранов **1-3** с молекулами ДНК в качестве потенциальной мишени для фотовизуализации при помощи программного пакета Autodock 4.2.6. Исследования были выполнены для каждого соединения, включая изомеры СП, а также изомеры МЦ с конфигурациями ТТЦ и ТТТ. Результаты исследования показали, что все изомеры спиропиранов **1-3** могут образовывать интеркаляционные комплексы и связываться в малых бороздках двойной спирали ДНК, что согласуется с предыдущими исследованиями цианиновых красителей [4]. По результатам исследования можно сделать вывод, что спиропираны **1-3** могут быть перспективны для визуализации ДНК в биоопленках.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-73-00330, <https://rscf.ru/project/22-73-00330/> в Южном федеральном университете.

[1] Klajn R, *Chem Soc Rev.*, **43**, 148–184, (2014).

[2] Kozlenko A.S., Ozhogin I.V., Pugachev A.D., Lukyanova M.B., El-Sewify I.M., Lukyanov B.S., *Top. Curr. Chem.*, **381**, №1, 8, (2023).

[3] Pugachev A.D., Ozhogin I.V., Makarova N.I., Rostovtseva I.A., Lukyanova M.B., Kozlenko A.S., Borodkin G.S., Tkachev V.V., El-Sewify I.M., Dorogan I.V., Metelitsa A.V., Aldoshin S.M., Lukyanov B.S., *Dyes Pigm.*, **199**, 11043, (2022).

[4] Pronkin P.G., Tatikolov A.S., *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.*, **269**, 120744, (2022).

ФОТО- И ЭЛЕКТРОУПРАВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ СВЕТА ХИРАЛЬНЫМ НЕМАТИКОМ С ТАНГЕНЦИАЛЬНО-КОНИЧЕСКИМ СЦЕПЛЕНИЕМ

Костиков Д.А.¹, Абдуллаев А.С.¹, Крахалев М.Н.^{1,2}, Зырянов В.Я.¹

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

²Институт инженерной физики и радиоэлектроники, СФУ, г. Красноярск, Россия

Представлен метод точной настройки параметров поляризации проходящего излучения посредством электрического и оптического воздействия на структуру фоточувствительного хирального нематика с тангенциально-коническим сцеплением.

Ключевые слова: жидкий кристалл, фоточувствительная хиральная добавка, управление поляризацией света.

Хирально-нематические жидкие кристаллы (ХЖК) нашли широкое применение в фотонике и оптике за счет своих уникальных физических свойств. Ориентационная структура ХЖК характеризуется директором (единичным вектором, направленным вдоль преимущественной ориентации длинных осей молекул), ориентация которого зависит от граничных условий, соотношения шага спирали p (расстояние на котором директор претерпевает поворот на 2π) и толщины ХЖК слоя d . Граничные условия задаются за счет ориентирующих полимерных пленок, наносимых на подложки, а величина шага спирали зависит от концентрации хиральной добавки. В представленной работе исследована фото- и электроиндуцированная плавная перестройка структуры фоточувствительного ХЖК с тангенциально-коническим сцеплением, показана возможность точного управления поляризацией белого света.

В работе исследовались ХЖК на основе нематической смеси ЛН-396, допированной левозакручивающей хиральной добавкой S5011 (Macklin) и фоточувствительной правозакручивающей композитной хиральной добавкой cCdP (ИХНМ НАН Беларуси) [1]. В ячейках на одной подложке тангенциальные граничные условия задавались натертой пленкой поливинилового спирта (ПВС), а для формирования конического сцепления с углом наклона директора $47,7^\circ$ использовалась пленка полиизобутилметакрилата (ПиБМА), которой покрывалась вторая подложка. Поляризация прошедшего через ячейку света исследовалась спектральным методом в геометрии параллельных поляризаторов, ориентированных перпендикулярно направлению натирки пленки ПВС. Свет на образец падал нормально со стороны подложки с тангенциальными граничными условиями.

Угол закрутки директора в ХЖК ячейке контролировался одновременным воздействием ультрафиолетового (365 нм) и синего (430 нм) света. Черная кривая на рисунке (а, б) показывает спектр пропускания света, прошедшего слой ХЖК с углом поворота директора примерно -45° . В этом случае на длинах волн, для которых $T = 0,5$, в соответствии с [2], свет будет линейно- (в случае, когда касательная к спектру имеет отрицательный наклон) или эллиптически-поляризованным (если касательная к спектру имеет положительный наклон). Длина волны, для которой поляризация прошедшего света остается линейно-поляризованной, определяется соотношением $2d\Delta n/\lambda$, где Δn – анизотропия показателя преломления, которой можно управлять электрическим полем. Электрическим напряжением можно трансформировать параметры эллиптичности ξ поляризации для любой длины волны света во всем видимом диапазоне, трансформировать ее из линейной (ξ_{\min}) в эллиптическую с максимальным углом (ξ_{\max}) (рисунок а) и наоборот (рисунок б).

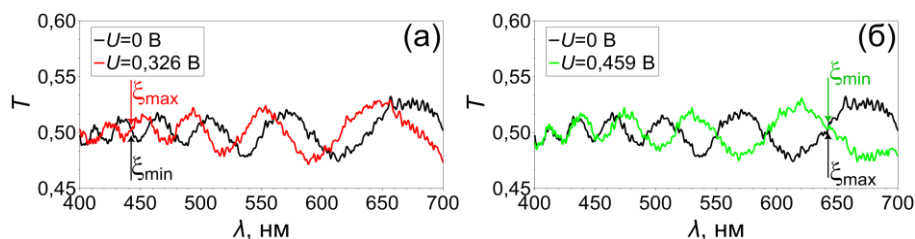


Рисунок. Спектры пропускания T ХЖК слоя при напряжении $U = 0$ (а, б), $U = 0,326$ В (а) и $0,459$ В (б)

Приложение электрического поля совместно с облучением образца позволяет трансформировать поляризацию прошедшего через ХЖК света для любой длины волны в видимом диапазоне. Указанные приложенные поля практически не изменяют угол закрутки структуры (спектры на рисунке остаются на одной и той же высоте) и, следовательно, направление поляризации света не зависит от прикладываемого напряжения. Изменяя баланс ультрафиолетового и синего излучений, можно плавно управлять углом закрутки структуры. Для исследуемой смеси ХЖК он может изменяться в диапазоне от -180° до $+180^\circ$. Показано, что световое излучение и электрическое поле позволяют независимо контролировать ориентацию и эллиптичность поляризации прошедшего излучения, соответственно.

[1] Chepeleva D.S. et. al., Доклады БГУИР, №7(125), 28-31, (2019).

[2] Ong H.L., J. Appl. Phys., **64**, №2, 614-628, (1988).

**ФОТОДЕТЕКТОР ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ
ТАММОВСКОГО ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНА В СТРУКТУРЕ НА
ОСНОВЕ ГЕРМАНИЯ**

Конов Ю.В.^{1,2}, Бикбаев Р.Г.^{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

В работе исследована зависимость фоточувствительности фотодетектора горячих электронов на основе пленки германия в структуре с таммовским плазмон-поляритоном от материала металлической пленки.

Ключевые слова: фотодетектор горячих электронов, фотонный кристалл, таммовский плазмон-поляритон.

В последние годы особое внимание привлекает к себе поверхностное электромагнитное состояние, которое формируется в виде стоячей волны на границе двух отражающих сред, например, на границе фотонного кристалла (ФК) и металлического слоя. Уравнение Максвелла для электрического поля в этом случае является точным аналогом одноэлектронного уравнения Шредингера, решением которого является таммовское электронное состояние. В силу этого, электромагнитный аналог таммовского электронного состояния называется таммовским плазмон-поляритоном (ТПП) [1]. На основе ТПП могут быть созданы такие устройства как: поглотители [2], лазеры [3], сенсоры [4] и фотодетекторы [5], которые лежат в основе твердотельных лидаров. В связи с этим в данной работе была предложена модель фотодетектора горячих электронов на основе ТПП, локализованного на границе ФК, сопряженного с полупроводниковой пленкой германия и пленкой металла. Схематическое изображение структуры представлено на рисунке (а).

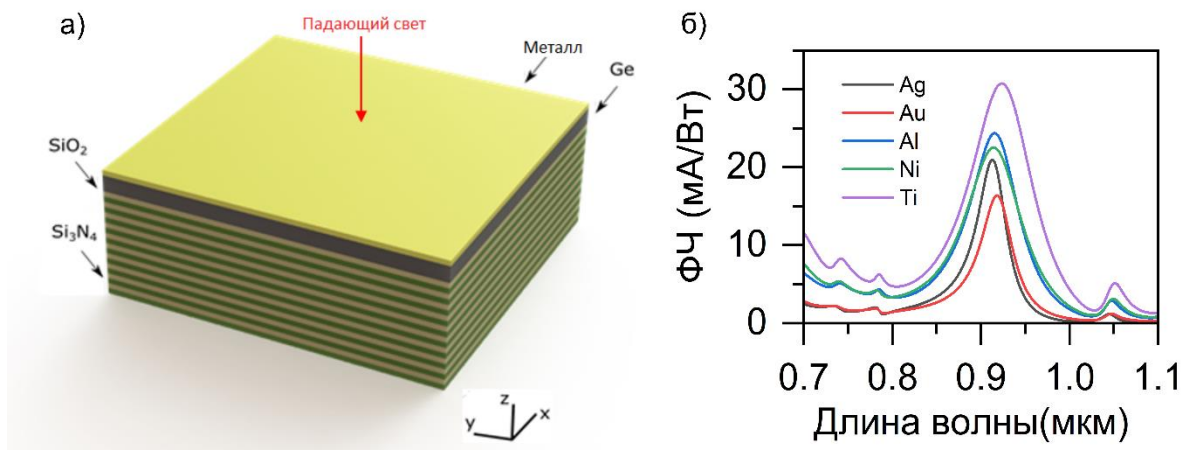


Рисунок. (а) Схематическое изображение исследуемой структуры. Толщины слоев ФК: SiO₂ – 140 нм, Si₃N₄ – 120 нм. (б) Зависимость фоточувствительности предложенного устройства от длины волны света и материала металлической пленки. Толщина слоя германия 50 нм

Фоточувствительность предложенного устройства определяется как:

$$R(\omega) = q * A(\omega) * \eta / \hbar\omega, \eta = \frac{(\hbar\omega - \Delta E_b)^2}{4E_f * \hbar\omega}, \quad (1)$$

где q – элементарный заряд, $A(\omega)$ – поглощение на длине волны ТПП, $\hbar\omega$ – энергия фотона, ΔE_b – величина барьера Шоттки, E_f – энергия Ферми.

Таким образом, наибольшая эффективность будет достигнута при 100%-ом поглощении падающего на структуру излучения и наименьшей величине барьера Шоттки и энергии Ферми. Сравнительные расчеты фоточувствительности устройства представлены на рисунке (б). Из рисунка видно, что замена металлического слоя приводит к уширению спектральной линии и увеличению фоточувствительности на длине волны ТПП. Так замена золотой пленки на титановую обеспечивает увеличение фоточувствительности практически в 2 раза, с 16 до 31 мА/Вт. Данное исследование показывает, что наибольшая фоточувствительность обеспечивается при сопряжении ФК с пленками германия и титана.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-42-08003.

- [1] Kaliteevski M., Iorsh I., Brand S., et al., *Phys. Rev. B*, **76**, 165415, (2007).
 [2] Gong Y., Liu X., Wang L., et al., *Opt. Exp.*, **19**, 9759-9769, (2011).
 [3] Xu Wen-Hui, Chou Yu-Hsun, Yang Zih-Ying, et al., *APR*, **3**, 2100120, (2021).
 [4] Chen Yu-Sheng, Yang Zih-Ying, Ye Ming-Jyun, et al., *APR.*, **3**, 2200094, (2023).
 [5] Huang C.-H., Wu C.-H., Bikbaev R.G., et al., *Nanomaterials*, **13**, 693, (2023).

СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНТИНУУМЕ В ТЕЛЕКОМ ДИАПАЗОНЕ:
МЕТОД СЛУЧАЙНОГО ЛЕСА

Герасимов В.С.¹, Молокеев М.С.^{2,3}, Костюков А.С.³,
Ершов А.Е.¹, Максимов Д.Н.^{2,3}, Полютов С.П.³

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, Россия

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

³МНИЦ СКХ, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

С применением метода машинного обучения «Случайный Лес» предсказаны частоты связанных состояний в континууме (ССК) в ИК области в зависимости от оптических и геометрических параметров метаповерхности. Установлено, что метод машинного обучения превосходит стандартный метод наименьших квадратов при размере набора данных около 4000. Показано, что данный подход может быть применен для предсказания стандартного телеком-диапазона, в который попадает ССК. Идентифицированы важные параметры, влияющие на длину волны ССК.

Ключевые слова: машинное обучение, связанные состояния в континууме, компьютерное моделирование.

Выполнены расчеты длины волны ССК [1, 2] для 4000 случайных наборов параметров структуры представленной на рис. а. Анализ данных выявил отсутствие линейных зависимостей между параметрами (w , h , n_b , n_s) и длиной волны ССК, а погрешность прогноза модели «Случайного Леса» (СЛ) в два раза меньше погрешности нелинейной МНК-модели (см. рис. б), что оправдывает использование машинного обучения для решения рассматриваемой задачи. Регрессионная модель «Случайного Леса» предсказывает длину волны с небольшой погрешностью в 7,35 нм, что достаточно для классификации таких узких стандартных диапазонов, например, С-диапазон (1530-1565 нм). Кросс-валидационная точность прогноза классов составила 83,1%, что означает, что только 16,9% случаев были неправильно классифицированы. Следует отметить, что матрица ошибок тестового набора данных показала, что в случаях неправильной классификации были выбраны только самые близкие смежные классы. Следовательно, ошибка в классификации незначительна. Между тем скорость прогнозирующего расчета намного выше, чем при прямом расчете с использованием методов вычислительно электродинамики, что открывает возможность быстрого получения параметров системы для возбуждения ССК в нужном стандартном телеком-диапазоне. Установлено, что наиболее важными параметрами, влияющие на длину волны ССК является длина оптического пути через диэлектрические стержни.

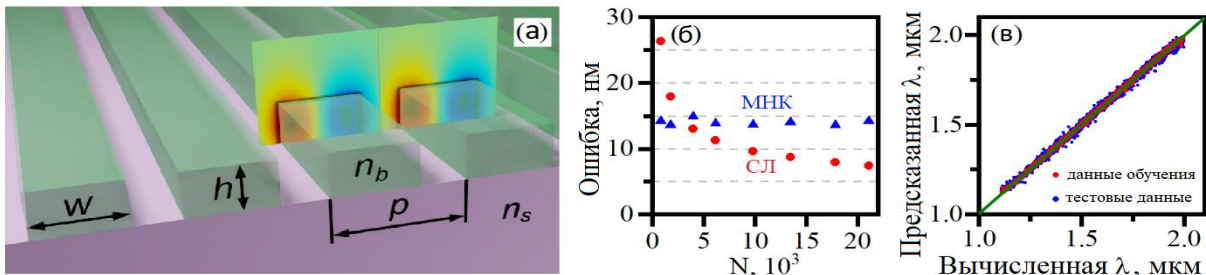


Рисунок. (а) - схематичное изображение метаповерхности с распределением электрического поля ТЕ ССК на вставке, (б) - ошибка прогнозирования, рассчитанная для 30% случайно выбранного тестового набора данных для МНК (синие треугольники) и «Случайного Леса» (красные круги), (в) - сравнительный график наблюдаемых значений длин волн с расчетными длинами волн, полученными из модели машинного обучения

Это обеспечивает определенную свободу в проектировании диэлектрических метаповерхностей, поскольку, например, изменение параметров при условии, что эти две характеристики постоянны, существенно не влияет на длину волны ССК. Таким образом, мы считаем, что метод «Случайного Леса» может оказаться полезным для проектирования оптических ССК на заданной длине волны в телекоммуникационном диапазоне.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (№ 028-2021-0003).

- [1] Maksimov D.N., Gerasimov V.S., Romano S., Polyutov S.P., *Opt. Express*, **28**, 38907, (2020).
[2] Sadreev A.F., Bulgakov E.N., and Rotter I., *Phys. Rev. B*, **73**, 235342, (2006).

УМЕНЬШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ МОД НА ГРАНИЦЕ СЕРДЦЕВИНЫ ПОЛЫХ СВЕТОВОДОВ

Прямиков А.Д.

Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

В работе продемонстрировано резонансное уменьшение энергетической скорости мод воздушной сердцевинки в области границы сердцевинка – оболочка полых микроструктурированных световодов. Это уменьшение связано с возникновением вихревой структуры вектора Пойнтинга этих мод.

Ключевые слова: полые световоды, энергетическая скорость мод, вихри вектора Пойнтинга.

В данной работе рассматриваются полые световоды (ПС) из кварцевого стекла с оболочкой, состоящей из набора капилляров (рис. (а)). ПС такого типа нашли применение в самых различных областях фотоники от передачи высокомощного лазерного излучения до создания высокочувствительных сенсоров. Тем не менее, до сих пор неясна природа столь сильной локализации излучения в поллой сердцевинке, позволяющая слабо “чувствовать” материальные потери оболочки в широком спектральном диапазоне, достигающего до среднего ИК. Наш подход в объяснении механизма локализации основан на существовании сингулярностей и вихрей в поперечной компоненте вектора Пойнтинга мод воздушной сердцевинки на границе сердцевинки и оболочки ПС [1].

Известно, что в планарных волноводах с сердцевинкой из левостороннего метаматериала и оболочкой с отрицательной диэлектрической проницаемостью, возможно получение вихревых мод, приводящих к исчезновению потока мощности моды между областью сердцевинки и областью оболочки волновода [2]. Исчезновение потока мощности моды на границе сердцевинки возникает из – за взаимной компенсации потоков мощности моды, текущих в сердцевинке и оболочке волновода. При этом энергетическая скорость моды стремится к нулю. Энергетическая скорость (ЭС) моды сердцевинки волновода определяется как:

$$\vec{V}_{energ} = \vec{P}/W, \quad (1)$$

где \vec{P} – поток мощности моды воздушной сердцевинки через площадь поперечного сечения волновода и его боковую поверхность; W – погонная энергия моды, т.е. энергия моды на единицу длины волновода. В случае ПС из кварцевого стекла (рис. (а)) с диаметром сердцевинки 50 мкм и толщиной стенок капилляров 750 нм можно рассчитать распределение величины ЭС основной моды воздушной сердцевинки вдоль внешней границы отдельного капилляра оболочки на длине волны 1.03 мкм. Из рис. (б) видно, что в области границы капилляра ближайшей к центру ПС величина проекций ЭС падает на несколько порядков. Максимальное значение для радиальной проекции ЭС достигается в точке крепления капилляра к опорной трубе. Кроме этого, для этой проекции наблюдаются нулевые значения ЭС.

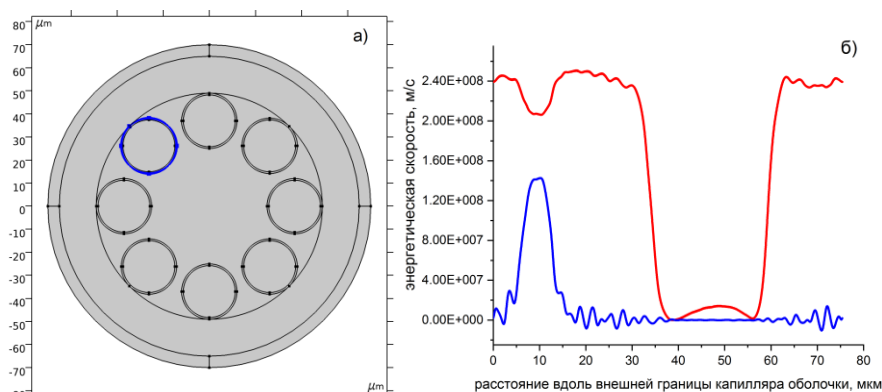


Рисунок. (а) поперечное сечение ПС и граница капилляра оболочки (синий цвет), вдоль которой рассматривается поведение ЭС основной моды воздушной сердцевинки; (б) распределение аксиальной (красный цвет) и радиальной (синий цвет) проекций ЭС основной моды воздушной сердцевинки вдоль внешней границы капилляра оболочки (рис. (а))

Этот результат говорит о вихревом характере движения потока мощности моды воздушной сердцевинки у границ капилляров оболочки и их взаимной компенсации в радиальном направлении. Такая взаимная компенсация потоков мощности приводит к усилению локализации излучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда в рамках проекта № 22 - 22-00575.

[1] Pryamikov A., Alagashev G., Falkovich G., Turitsyn S., *Sci. Rep.*, **10**, 2507, (2020).

[2] Dong J.W., Wang H.Z., *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 111909, (2007).

ПОВЕРХНОСТНЫЕ МОДЫ В ФОТОННОМ ТОПОЛОГИЧЕСКОМ ИЗОЛЯТОРЕ НА ОСНОВЕ МАССИВА ПРИЗМЕННЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Ким П.Н.^{1,2}, Федченко Д.П.^{1,2}, Рудакова Н.В.^{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

Мозаичный фотонный топологический изолятор собран на массиве идентичных призмных резонаторов. Пучок света циркулирует по краю массива, не распространяясь в объеме. Экспериментально полученный пучок устойчив к удалению или присоединению призмных резонаторов.

Ключевые слова: фотонный топологический изолятор, топологически устойчивая траектория.

Топологический изолятор – это материал, являющийся проводником на поверхности и изолятором в объеме [1]. Термин ‘топологический’ говорит об особом типе устойчивости поверхностных проводящих состояний. Ярким примером подобных состояний служат фотонные топологические изоляторы, реализованные на решетке спиральных волноводов [2] и решетке кольцевых резонаторов [3]. В данной работе рассматривается фотонный топологический изолятор, изготовленный из идентичных призмных резонаторов. Лазерный пучок в массиве испытывает полное внутреннее отражение от граней резонаторов не смежных с другими призмами, что превращает его траекторию в ломаную линию.

Предлагается теоретическая модель, в которой пучок преодолевает границу между соседними резонаторами благодаря нарушенному полному внутреннему отражению [4]. Предложенная в работе модель является еще одной практической реализацией игры Руднера, представляющей собой простой топологический изолятор, описанный на языке вторичного квантования [5]. Далее модель модифицируется за счет устранения зазора между соседними призмными резонаторами [6].

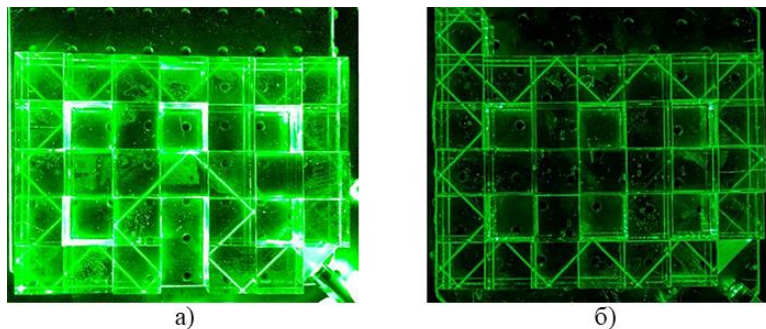


Рисунок. Траектория светового пучка. Траектория устойчива к дефекту, полученному при удалении призмного резонатора (а) или добавлении нового призмного резонатора (б)

В дальнейшем для краткости будем называть такой массив резонаторов мозаикой. Четырехугольная мозаика представляет собой двумерный периодический массив, в квадратной элементарной ячейке которого умещается четыре призмы (2x2), причем одно из четырех мест оставляется пустым. Пучок света циркулирует внутри мозаичного массива, проникая через смежные грани соседних резонаторов и меняя направление распространения за счет эффекта полного внутреннего отражения на открытых гранях. Траектория светового пучка топологически устойчива относительно удаления или присоединения новых призмных резонаторов (рисунок). Подобные фотонные топологические изоляторы теоретически описаны в [3-5, 7] и практически реализованы на нескольких платформах [3, 7]. Исследуемое состояние масштабируется по размеру призмных резонаторов, а также не чувствительно к изменению длины волны.

Четырехугольная мозаика - экспериментальная демонстрация новой платформы, преимущества которой заключаются в устойчивости траектории к дефектам мозаики. В качестве направления для возможных дальнейших исследований стоит отметить практическую реализацию мозаики из треугольных и шестиугольных призмных резонаторов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-42-08003.

- [1] Hasan M.Z., Kane C.L., *Reviews of modern physics*, **82**, №4, 3045, (2010).
- [2] Rechtsman M.C. et al., *Nature*, **496**, № 7444, 196-200, (2013).
- [3] Gao F. et al., *Nature communications*, **7**, №1, 11619, (2016).
- [4] Fedchenko D.P., Kim P.N., Timofeev I.V., *Symmetry*, **14**, №12, 2673, (2022).
- [5] Rudner M.S. et al., *Physical Review X*, **3**, №3, 031005, (2013).
- [6] Kim P.N. et al., *Applied Sciences*, **13**, №6, 4004, (2023).
- [7] Leykam D., Yuan L., *Nanophotonics*, **9**, №15, 4473-4487, (2020).

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ НЕИДЕАЛЬНЫХ 1D ФОТОННЫХ СТРУКТУР В ОКРЕСТНОСТИ ЧАСТОТЫ ЭКСИТОННОГО ПЕРЕХОДА

Рыбалка А.Е., Румянцев В.В., Федоров С.А.

ФГБНУ Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, г. Донецк, ДНР, Россия

В рамках микроскопического подхода получены результаты исследования эффекта электрооптической активности неидеального 1D фотонного кристалла – многослойной структуры с инородными электрооптически активными слоями с вакансиями. Для двух частотных областей в окрестности экситонного резонанса рассмотрена зависимость удельного угла вращения плоскости поляризации света в исследуемой сверхрешетке от концентрации слоев, точечных дефектов и напряженности электрического поля.

Ключевые слова: электрогирация, неидеальный фотонный кристалл, удельный угол вращения.

В настоящее время имеется большое количество сложных кристаллических комплексов (идеальных и неидеальных), которые являются оптически активными вследствие особенностей структуры или оптической активности входящих в их состав молекул [1]. Особый интерес представляет проявление структурных особенностей среды и пространственной дисперсии в поляризационных измерениях спектральных характеристик, изучение возникновения или изменения оптической активности соответствующих сред под действием электрического поля (явление электрогирации).

В работе рассмотрено явление линейной электрогирации в окрестности частоты ω экситонного перехода в неидеальной 1D фотонной структуре – сверхрешетке, одна из подрешеток которой случайным образом замещается на слой электрооптически активного молекулярного кристалла, содержащего вакансии. На основе микроскопического подхода [2, 3] в рамках приближения виртуального кристалла. получена важная характеристика электрооптической активности исследуемой системы – удельный угол вращения $\tilde{\rho}(\vec{s}, \omega, \vec{E}, C_v, C) \simeq \tilde{\rho}^{(0)} + \tilde{\rho}^{(1)}$ плоскости поляризации электромагнитной волны в зависимости от концентрации C слоев, точечных дефектов (вакансий) C_v и напряженности электрического поля \vec{E} для двух частотных областей в окрестности экситонного перехода. В работе показано, что в первом по электрическому полю порядке величина $\tilde{\rho}^{(1)}$ удельного угла вращения имеет вид:

$$\tilde{\rho}^{(1)} = i \frac{4\pi C}{\nu_0 \hbar c^2} s^t \hbar^2 \omega^2 (1 - C_v) \left\{ \frac{R_1^{tp}(\vec{s})}{\hbar^2 \omega^2 - E_0^2(0) - 2E_0(0)V(\vec{s}, 0)(1 - C_v)} + \frac{R_2^{tp}(\vec{s}, C_v)}{[\hbar^2 \omega^2 - E_0^2(0) - 2E_0(0)V(\vec{s}, 0)(1 - C_v)]^2} \right\} \cdot E^p. \quad (1)$$

В (1):

$$R_1^{tp}(\vec{s}) = \left. \frac{\partial \{ Q_{f0}^{tl}(\vec{E}) [\vec{s} \times \vec{P}_{of}(\vec{E})]^l \}}{\partial E^p} \right|_{\vec{E}=0}, \quad R_2^{tp}(\vec{s}, C_v) = Q_{f0}^{tl}(0) [\vec{s} \times \vec{P}_{of}(0)]^l \cdot \left. \frac{\partial E_{ex}^2(\vec{s}, \vec{E}, C_v)}{\partial E^p} \right|_{\vec{E}=0}.$$

$E_0(\vec{E})$ и $V(\vec{s}, \vec{E})$ – зависящие от величины \vec{E} внешнего электрического поля соответственно: энергия возбуждения молекулы и фурье-образ матрицы резонансного межмолекулярного взаимодействия идеального кристалла, E_{ex} – экситонная энергия, перенормированная наличием вакансий, зависящая от электрического поля, $\vec{s} = \vec{k}/k$, ν_0 – объем элементарной ячейки, матричные элементы операторов $\vec{P}_{of}(\vec{E})$ – дипольного момента молекулы – и $Q_{f0}^{tl}(\vec{E})$ приведены в [2]. Первое слагаемое в (1) – молекулярная составляющая электрогирации – обусловлено электрооптической активностью молекул, а второе слагаемое связано с зависимостью экситонной энергии от электрического поля, поэтому оно может быть названо экситонной (кристаллической) составляющей электрогирации.

[1] Mohrig J.R., Hammond C.N., Schatz P.F., *Techniques in Organic Chemistry* / Third ed. // W. H. Freeman and Company, 209-210, (2010).

[2] Рыбалка А.Е., Румянцев В.В., Федоров С.А., *Мониторинг. Наука и технологии*, **44(2)**, 79-86, (2020).

[3] Румянцев В.В., Федоров С.А., Гуменник К.В., Рыбалка А.Е., *Журнал прикладной спектроскопии*, **89(3)**, 354-359, (2022).

СИНХРОНИЗИРОВАННАЯ ФЛЕКСОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ В ЖК-ЯЧЕЙКЕ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЛАНАРНО-ГОМЕОТРОПНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ

Гейвандов А.Р., Симдянкин И.В., Уманский Б.А., Палто С.П.

ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН, Москва, Россия

Исследована индуцированная флексоэлектрическая модуляция в жидкокристаллической ячейке с периодической планарно-гомеотропной ориентацией на одной из границ слоя. Синхронизация периода модуляции с периодической поверхностной ориентацией ускоряет электрооптический эффект и подавляет образование дефектов.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, флексоэлектрический эффект.

В планарном слое нематического жидкого кристалла (ЖК) приложенное электрическое поле может индуцировать периодическую полосатую текстуру, характерную для известного эффекта флексоэлектрической неустойчивости. Мы исследовали флексоэлектрическую неустойчивость в ЖК-слоях с периодической планарно-гомеотропной ориентацией (ПГО) на одной из поверхностей слоя ЖК и сравнили результаты со случаем однородно ориентированного слоя [1].

Установлено, что ПГО более благоприятна для образования флексоэлектрической пространственной модуляции. Флексоэлектрическая решетка формируется значительно быстрее в случае ПГО с малым периодом по сравнению с ячейкой с однородной ориентацией, что связано как с периодичностью ПГО, так и с флексоэлектрической поляризацией, которая в случае ПГО отлична от нуля даже при выключенном внешнем поле. Впечатляющим открытием является то, что флексоэлектрические решетки пространственно синхронизированы с ПГО и свободны от вилкообразных дефектов (рисунок). Фурье-анализ изображений текстур показал, что волновое число флексоэлектрических решетократно волновому числу решетки ПГО, что указывает на пространственный резонанс флексоэлектрической неустойчивости с гармониками ПГО. Улучшенная динамика с синхронизацией открывает перспективы для новых электрооптических и фотонных применений флексоэлектрических решеток.

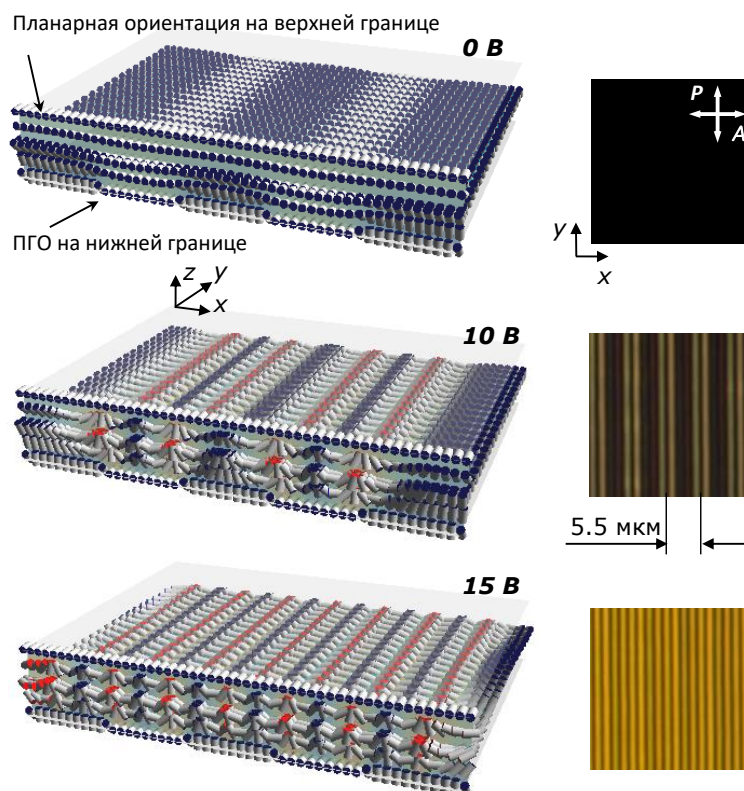


Рисунок. Рассчитанное распределение директора ЖК при напряжениях 0, 10 и 15 В (слева) и соответствующие экспериментальные фотографии ЖК ячейки в скрещенных поляризаторах (справа)

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

[1] Simdyankin I.V., Geivandov A.R., Umanskii B.A., Palto S.P., *Liquid Crystals*, **49**, (2022).

**ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМОЕ СЕЛЕКТИВНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА
ХОЛЕСТЕРИКОМ ПРИ ТАНГЕНЦИАЛЬНО-КОНИЧЕСКИХ
ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ**

Лесной М.А.¹, Крахалев М.Н.^{1,2}, Зырянов В.Я.¹

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Россия

²Институт инженерной физики и радиоэлектроники, СФУ, г. Красноярск, Россия

Рассмотрены структуры холестерика при тангенциально-конических граничных условиях. Исследовано влияние электрического поля на конфигурацию директора и селективное отражение света.

Ключевые слова: холестерик, селективное отражение, тангенциально-коническое сцепление.

Структура холестерика (ХЖК) зависит от граничных условий, материальных параметров ХЖК и соотношения толщины слоя d и шага спирали p ХЖК. На настоящий момент довольно слабо изучены структуры ХЖК, формирующиеся при гибридных тангенциально-конических граничных условиях. В случае тангенциального сцепления на подложке полярный угол наклона директора $\theta_0 \approx 0^\circ$ и азимутальная ориентация директора однородна. При коническом сцеплении угол наклона директора лежит в диапазоне $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$, а его азимутальная ориентация вырождена [1, 2]. В данной работе исследованы структуры холестерика, формирующиеся при тангенциально-коническом сцеплении, рассмотрено влияние электрического поля на структуры и селективное отражение света ячейками холестерика.

Для измерений были изготовлены ячейки типа «сэндвич», состоящие из двух стеклянных подложек, покрытых полимерными пленками, и слоя ХЖК между ними. Нижняя подложка была покрыта поливиниловым спиртом (ПВС), а верхняя – полиизобутилметакрилатом (ПиБМА). В качестве исследуемого ХЖК была использована смесь нематика ЛН-396 с правозакручивающей хиральной добавкой R-5011. Пленка ПВС задает тангенциальное сцепление для нематика ЛН-396, пленка ПиБМА – коническое с углом наклона 48° . Схема исследуемого образца показана на рисунке *a*.

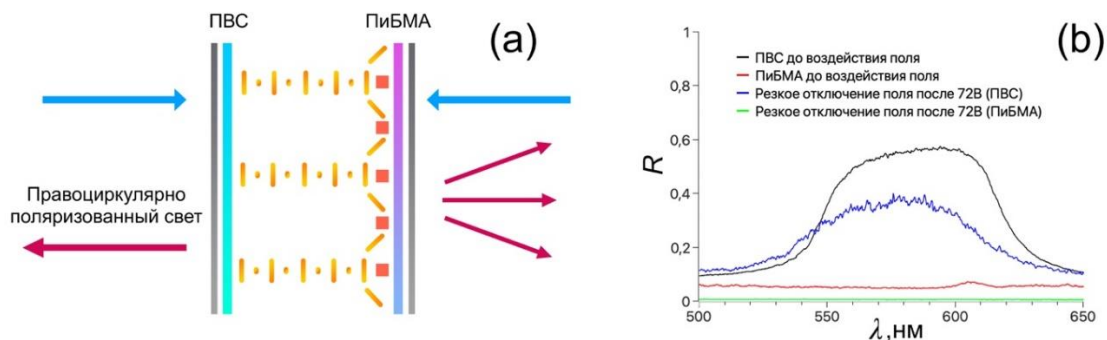


Рисунок. *a*) Схема экспериментальной ячейки (квадратами показаны сечения линейных дефектов);
b) Спектры отражения ХЖК со стороны ПВС и ПиБМА до и после воздействия поля

Исходная ориентационная структура холестерика зависит от значения соотношения d/p . В диапазоне значений $2,5 \leq d/p < 5,5$ наблюдаются структуры, характеризующаяся линейными дефектами, расположенными периодически или в форме спиралей [2]. При соотношении $5,5 \leq d/p \leq 30,0$ в структуре помимо периодически расположенных линейных дефектов наблюдаются домены в форме кругов, упакованных плотно или располагающихся на значительном расстоянии друг от друга. Помимо этого, в образцах с $d/p > 11,0$ наблюдаются линейные дефекты, напоминающие масляные полоски (*oil streaks*).

При приложении электрического поля к структуре без круговых доменов происходит стягивание линейных дефектов и переход, в конечном итоге, к раскрученной нематикоподобной структуре. В структурах с круговыми доменами под действием приложенного напряжения $3,0 < U < 5,0$ В происходит рост круговых доменов и их слияние, что приводит к формированию доменной *fan-shape* структуры. Дальнейшее увеличение напряжения постепенно раскручивает структуру переводя ее в нематическое состояние при $U > 12$ В. После выключения поля в структуре формируется доменная *fan-shape* структура.

Для образца с $p = 342$ нм ($d/p = 26,5$) было изучено влияние электрического поля на селективное отражение света. При нормальном падении света на ХЖК со стороны тангенциальных граничных условий наблюдается селективное отражение, в то время как при нормальном падении излучения со стороны конических граничных условий селективно отраженный свет отсутствует (рис. *b*). Выявлено наличие порогового характера при изменении свойств селективного отражения образца. Показано, что после полной раскрутки ХЖК до нематического состояния, полностью пропускающего свет, ячейка способна вернуться в состояние селективного отражения при резком выключении напряжения.

[1] Krakhalev M., Bikbaev R., Sutormin V., Timofeev I., Zyryanov V., *Crystals.*, **9**, 249, (2019).

[2] Prishchepa O., Krakhalev M., Rudyak V., Sutormin V., Zyryanov V., *Sci. Rep.*, **11**, 8409, (2021).

СВЕРХБЫСТРАЯ ФОТОНИКА И КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИКА

**МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАКОРОТКИХ
ЭЛЛИПТИЧЕСКИ- И ЦИРКУЛЯРНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ВУФ
И РЕНТГЕНОВСКИХ ИМПУЛЬСОВ**

Рябикин М.Ю.^{1,2}

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Дается сравнительный анализ различных подходов к генерации интенсивного короткоимпульсного ВУФ и рентгеновского излучения эллиптической/циркулярной поляризации с использованием источников синхротронного типа и источников, основанных на генерации высоких гармоник оптического излучения.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, циркулярная поляризация, ультракороткие импульсы.

Циркулярно-поляризованное короткоимпульсное ВУФ и рентгеновское излучение является одним из эффективных инструментов диагностики магнитных материалов и структур и хиральных молекул и ультрабыстрых процессов в них. Так, циркулярная поляризация позволяет использовать эффект магнитного кругового дихроизма [1]: поглощение света, распространяющегося вдоль вектора намагнитченности в магнетике, зависит от направления вращения электрического поля; соответствующая техника рентгеновской диагностики носит название XMCD (X-ray circular magnetic dichroism). Использование рентгеновского излучения дает (1) нанометровое пространственное разрешение и (2) элемент-селективность: используется поглощение с глубоких оболочек, для которых края полос поглощения зависят от номера элемента в периодической таблице. Использование ультракоротких импульсов при этом даёт дополнительные возможности, обеспечивая исследования процессов в магнитных материалах с высоким временным разрешением. Такие исследования важны, например, для понимания физики процессов, происходящих при лазерно-индуцированном сверхбыстром перемагничивании ферромагнетиков. Прикладная значимость исследований круга соответствующих явлений [2], называемого фемтомагнетизмом, связана с задачами разработки новых сверхбыстрых устройств магнитной записи. Другим важным применением источников указанного типа является диагностика хиральных сред. Фотоионизации хиральных молекул присуще свойство кругового дихроизма [3], позволяющее с помощью эллиптически- или циркулярно-поляризованных фотонов осуществлять селекцию энантиомеров, а в случае использования ультракоротких импульсов – зондировать динамику сверхбыстрых процессов («фемтохиральность») в таких молекулах [4].

Наиболее широко используемыми в настоящее время мощными источниками ВУФ и рентгеновского излучения являются синхротроны, лазеры на свободных электронах и источники, основанные на генерации гармоник высокого порядка (ГГВП) оптического излучения. Для каждого из этих типов источников разработаны и продолжают развиваться методы получения эллиптически- и циркулярно-поляризованного излучения, в том числе короткоимпульсного. В работе будут представлены основные из этих методов и проведен сравнительный анализ их достоинств и недостатков. Особое внимание будет уделено источникам на основе ГГВП, поскольку такие источники, в силу ряда своих преимуществ (компактность, относительная дешевизна, высокая когерентность, малая длительность импульсов, высокая степень синхронизации между импульсами накачки и гармоник), представляются очень перспективными как для многих приложений, в которых до недавнего времени могли использоваться только крупномасштабные рентгеновские источники синхротронного типа, так и для приложений, ставших возможными только с появлением короткоимпульсных источников на основе ГГВП. С другой стороны, в силу особенностей физического механизма ГГВП, получение на основе этого процесса высокоинтенсивного излучения с большой эллиптичностью представляет собой весьма сложную задачу. В работе будет представлен ряд развиваемых в настоящее время подходов к решению этой задачи, в том числе основанных на использовании многокомпонентных лазерных полей, резонансных механизмов его взаимодействия с атомарными и молекулярными средами и усиления генерируемых высоких гармоник в активных средах плазменных рентгеновских лазеров.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-12-00389).

[1] Schütz G., Wagner W., Wilhelm W. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 737, (1987).

[2] Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T., *Rev. Mod. Phys.*, **82**, 2731, (2010).

[3] Böwering N., Lischke T., Schmidtke B. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 1187, (2001).

[4] Svoboda V., Ram N.B., Baykusheva D. et al., *Sci. Adv.*, **8**, eabq2811, (2022).

**ВОЗБУЖДЕНИЕ И ИОНИЗАЦИЯ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ
УНИПОЛЯРНЫМИ СУБЦИКЛОВЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Архипов Р.М.^{1,2}, Архипов М.В.^{1,2}, Пахомов А.В.¹, Розанов Н.Н.^{1,2}

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

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются особенности возбуждения и ионизации квантовых систем с помощью униполярных предельно коротких световых импульсов. Показано, что вероятности возбуждения и ионизации определяются отношением электрической площади импульса к ее атомной мере, а не энергией импульса.

Ключевые слова: предельно короткие импульсы, униполярные импульсы, электрическая площадь импульса, атомная мера площади.

На сегодняшний день экспериментально получены электромагнитные импульсы фемтосекундной и аттосекундной длительности [1]. Они используются для изучения динамики волновых пакетов в атомах, молекулах и твердых телах [2, 3]. Однако получаемые на практике импульсы содержат несколько полувольт колебаний электрического поля. Пределом сокращения длительности импульса является получения одной полувольты поля, т.е. полупериодного униполярного импульса [4]. Для таких импульсов электрическая площадь, определяемая, как интеграл от напряженности поля по времени в заданной точке пространства $S_E = \int E(t)dt$, может быть отлична от нуля.

Генерация униполярных импульсов представляет интерес в оптике в связи с возможностью быстрого и эффективного возбуждения квантовых систем за счет однонаправленного воздействия на заряды. Вследствие этого в последнее время активно изучается, как возможности получения таких импульсов, так и особенности их взаимодействия с веществом [4]. Вследствие малой длительности в полпериода поля, для униполярных импульсов становятся неприменимы стандартные теории взаимодействия коротких импульсов с квантовыми системами, такие как теория фотоионизации Келдыша. И теряют смысл представления об интерференции света, справедливые в случае длинных многоцикловых импульсов.

В данной работе изучаются особенности возбуждения и ионизации квантовых систем (атомов, молекул, наноструктур) униполярными субцикловыми предельно короткими импульсами. Показано, что в случае, когда длительность импульса короче кеплеровского периода оборота электрона по боровской орбите в атоме (характерного времени, связанного с энергией основного состояния квантовой системы), вероятности возбуждения и ионизации определяется электрической площадью импульса, а не его энергией [5-7].

Обсуждается введенное недавно понятие атомной меры площади, определяющей эффективность воздействия предельно короткого импульса на квантовую систему и обратно пропорциональную размеру системы. Рассматривается введенное недавно в оптику понятие интерференции площадей сверхкоротких импульсов [8, 9].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 21-72-10028.

[1] Krausz F., Ivanov M., *Reviews of modern physics*, **81**, №1, 163, (2009).

[2] Midorikawa K., *Nature Photonics*, **16**, 267, (2022).

[3] Hassan M. T. et al., *Nature*, **530**, 66, (2016).

[4] Архипов Р.М. и др. *Квант. электроника*, **50**, №9, 801, (2020).

[5] Архипов Р.М. и др., *Письма в ЖЭТФ*, **114**, №3, 156, (2021).

[6] Rosanov N. et al., *Physical Review A*, **104**, №6, 063101, (2021).

[7] Pakhomov A. et al., *Physical Review A*, **43103**, №4, 043103, (2022).

[8] Архипов Р.М. и др., *Письма в ЖЭТФ*, **114**, №5, 298, (2021).

[9] Arkhipov R., Arkhipov M., Pakhomov A., Rosanov N., *Laser Physics*, **32**, №6, 066002, (2022).

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕСКОЛЬКИХ ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ
С РЕЗОНАНСНЫМИ СРЕДАМИ**

Дьячкова О.О.^{1,2}, Архипов Р.М.^{1,2}, Архипов М.В.^{1,2}, Пахомов А.В.^{1,2}, Розанов Н.Н.^{1,2}

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

²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается воздействие предельно коротких импульсов (ПКИ) на атомные системы, особое внимание уделено возможности создания периодических решеток разности населенностей в среде при когерентном взаимодействии двух и более ПКИ.

Ключевые слова: предельно короткие импульсы, униполярные импульсы.

Униполярные предельно короткие импульсы (ПКИ), содержащие полуволну напряженности поля одной полярности, являются пределом сокращения длительности импульса в соответствующем спектральном диапазоне [1], обладают ненулевой электрической площадью, и оказывают однонаправленное воздействие на заряженные частицы, т.е. могут использоваться для более быстрого управления состояниями квантовых систем [2], при изучении сверхбыстрых процессов [3] и др. приложений. В последнее время поднимается вопрос генерации униполярных импульсов (УИ) негармонической (прямоугольной) формы напряженности электрического поля. Ранее подобные импульсы рассматривались только в радиотехнике, в ТГц диапазоне, и недавно в оптическом диапазоне [4].

Изучение ПКИ привело к пересмотру ряда традиционных представлений о взаимодействии света с веществом в нелинейной оптике. Так, для униполярных ПКИ воздействие на микрообъекты определяется электрической площадью импульса [5]. Исследование свойств таких импульсов, их взаимодействия с резонансными средами привело к обнаружению закона сохранения электрической площади импульса [6, 7], введению понятие атомной меры электрической площади импульса [8], теоретически сделаны предсказания новых нелинейных эффектов – самокомпрессии [9] и самоостановки ПКИ [10].

Показана возможность формирования светоиндуцированных поляризационных структур и решеток разности населенности в среде [11]. Данные решетки возникают вследствие интерференции волны поляризации, созданной первым импульсом, со вторым падающим импульсом [11] или за счет интерференции площадей импульсов [12]. Так, при когерентном воздействии ПКИ на среду, прошедший импульс, помимо изменения населенностей уровней, оставляет после себя бегущую волну поляризации, существующую в среде в течение времени релаксации поляризации T_2 , и если в среду ввести второй ПКИ, возможно возникновение решетки; каждый последующий импульс будет менять ее структуру.

Целью данной работы является рассмотреть воздействие нескольких ПКИ на атомные системы, уделяя особое внимание возможности создания периодических решеток разности населенностей в среде при когерентном взаимодействии двух и более ПКИ. В работе приводятся результаты оригинальных работ авторов, связанных с исследованием и возможными применениями понятия интерференции площадей. Приведены результаты теоретического исследования возможности формирования и последующего управления решеток разности населенности в многоуровневой резонансной среде с помощью пары неперекрывающихся аттосекундных УИ прямоугольной формы [13, 14]. Показано, что глубиной модуляции возникающей решетки на заданном переходе можно управлять, изменяя длительность импульсов, их амплитуды и время задержки между ними.

Как одно из следствий интерференции площадей УИ, в работе описывается способ голографической записи со сверхвысоким временным разрешением в отсутствие взаимной когерентности между падающими пучками [15]; способы экспериментального определения электрической площади.

Проведенные исследования поддержаны грантом РФФИ 21-72-10028.

[1] Архипов Р.М. и др., *Письма в ЖЭТФ*, **117**, №1, 10, (2023).

[2] Pakhomov A. et al., *Phys. Rev. A*, **105**, 043103, (2022).

[3] Hassan M.T. et al., *Nature*, **530**, 66, (2016).

[4] Архипов Р.М. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **117** №8, 580, (2023).

[5] Архипов Р.М. и др. *Квант. электроника*, **50**, №9, 801, (2020).

[6] Розанов Н.Н., *Опт. и спектр.*, **107**, №5, 761, (2009).

[7] Розанов Н.Н., Архипов Р.М., Архипов М.В., *УФН*, **188**, 1347, (2018).

[8] Архипов Р.М. и др., *Письма в ЖЭТФ*, **114**, №3, 156, (2021).

[9] Arkhipov R. et al., *Opt. Express*, **29**, 10134, (2021).

[10] Arkhipov R.M. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **128**, 203901, (2022).

[11] Архипов Р.М., *Письма в ЖЭТФ*, **113**, №10, 636, (2021).

[12] Архипов Р.М. и др., *Письма в ЖЭТФ*, **114**, №5, 298, (2021).

[13] Diachkova O.O. et al., *Laser. Phys.*, **33**, 045102, (2023).

[14] Diachkova O.O. et al., *Opt. Comm.*, **538**, 129475, (2023).

[15] Архипов Р.М., Архипов М.В., Розанов Н.Н., *Письма в ЖЭТФ*, **111**, №9, 586, (2020).

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КВАЗИУНИПОЛЯРНЫХ
ТГц ИМПУЛЬСОВ В НЕРАВНОВЕСНЫХ ЗАМАГНИЧЕННЫХ
ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛАХ**

Богацкая А.В.^{1,2}, Волкова Е.А.³, Попов А.М.^{1,2}

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

²ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

³НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Анализируется возможность управления спектральными и поляризационными характеристиками ТГц импульсов, распространяющихся в сильно неравновесных протяженных замагниченных плазменных каналах, образованных интенсивными УФ фемтосекундными лазерными импульсами в азоте (воздухе). Обсуждается формирование квазиуниполярных импульсов с ненулевой электрической площадью и специфическим состоянием поляризации.

Ключевые слова: электрическая площадь импульса, замагниченная плазма, ТГц излучение.

В основе данной работы лежит предложенный в [1, 2] способ управления спектральными и поляризационными характеристиками ТГц импульса, распространяющегося в канале фотоионизационной неравновесной замагниченной плазмы, создаваемой мощным фемтосекундным УФ лазерным импульсом и позволяющий трансформировать линейную поляризацию ТГц импульса в эллиптическую, или круговую. Основная идея основана на возможности усиления ТГц сигнала в плазменном канале с сильно неравновесной функцией распределения электронов по скоростям (ФРЭС) с пиковой структурой, если положение этого пика находится в области растущего с энергией транспортного сечения рассеяния [3, 4]. Такие растущие с энергией электронов транспортные сечения рассеяния в практически важно диапазоне энергий в несколько электронвольт характерны для тяжелых инертных газов, а также для молекулы азота. Дополнительное использование статического магнитного поля, направленного вдоль оси канала, вследствие возможного циклотронного резонанса позволяет перестраивать частоту усиливаемого ТГц излучения, а также существенно изменять его поляризационные свойства [1, 2].

В отличие от плазменного канала в ксеноне, исследованного в [2], азотная (или воздушная) плазма характеризуется большей величиной усиления ТГц поля, но при этом гораздо более быстрой релаксацией первоначально сильно неравновесной ФРЭС, что обусловлено наличием низколежащих колебательных состояний молекулы азота. В [4] было показано, что время релаксации ФРЭС в азоте при атмосферном давлении не превышает 10 – 20 пс. В результате оказывается возможным усиление переднего фронта ТГц импульса, в то время как его задняя часть не усиливается, или даже поглощается. Как результат, оказывается возможным возникновение ТГц импульсов с ненулевой электрической площадью [5, 6] и необычными поляризационными состояниями, которые не могут быть описаны привычными понятиями линейной, круговой или эллиптической поляризации.

Проведенные исследования актуальны для ТГц спектроскопии, поскольку предлагают новые подходы к анализу ударного воздействия на квантовые системы как при поступательном, так и при вращательном движении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-00225).

[1] Bogatskaya A.V., Gnezdovskaia N.E., Popov A.M., *Phys. Rev. E*, **102**, 043202, (2020).

[2] Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **31**, 095009, (2022).

[3] Bogatskaya A.V., Popov A.M., *JETP Lett.*, **97**, 388, (2013).

[4] Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M., *J. Phys. D*, **47**, 185202, (2014).

[5] Pakhomov A.V., Arkhipov R.M., Arkhipov M.V. et al., *Sci. Reports*, **9**, 7444, (2019).

[6] Arkhipov M.V., Arkhipov R.M., Pakhomov A.V. et al., *Opt. Lett.*, **42**, 2189, (2017).

**НОВЫЙ АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ – РАСЩЕПЛЕНИЕ
УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА ПРИ СИЛЬНОЙ
ПЕРЕМОДУЛЯЦИИ**

Юшков К.Б.¹, Молчанов В.Я.¹, Даринский А.Н.^{1,2}

¹Университет МИСИС, Москва, Россия

²ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

Проанализирован новый эффект формирования реплик фемтосекундного лазерного импульса при акустооптическом взаимодействии в сильном поле. Предложенный эффект может быть использован для создания управляемого расщепителя ультракоротких лазерных импульсов на основе акустооптических модуляторов.

Ключевые слова: акустооптика, ультракороткий импульс, модуляция.

Временное расщепление лазерного ультракороткого импульса (УКИ) – так называемое, формирование реплик, – лежит в основе ряда важных приложений, включая генерацию перестраиваемого по частоте терагерцового излучения методом оптического выпрямления [1]. Как правило, программируемое формирование реплик УКИ осуществляется амплитудно-фазовой модуляцией в спектральной области при помощи акустооптической (АО) дисперсионной линии задержки или 4F-шейпера [2, 3]. В настоящей работе предлагается новый способ формирования реплик УКИ при помощи однородной брэгговской решетки.

Как известно, брэгговская АО дифракция описывается системой уравнений связанных мод, причем коэффициент связи q пропорционален амплитуде модуляции показателя преломления акустической волной и частоте оптического излучения ω . В случае АО взаимодействия УКИ уравнения связанных мод можно обобщить с учетом дисперсионного расплывания УКИ в АО материале [4]. С учетом ширины спектра излучения $\Delta\omega$, модель преобразования спектра УКИ показана на рисунке. Коэффициент пропускания первого порядка описывается выражением $T_1(\omega) = \sin^2(\pi\omega/\omega_p)$, следовательно, модуляция спектра как нулевого, так и первого порядков, S_0 и S_1 , имеет место при условии $\Delta\omega > 2\omega_p$. Во временном представлении спектрально-модулированного излучения наблюдаются две реплики исходного импульса, интервал τ между которыми обратно пропорционален величине ω_p .

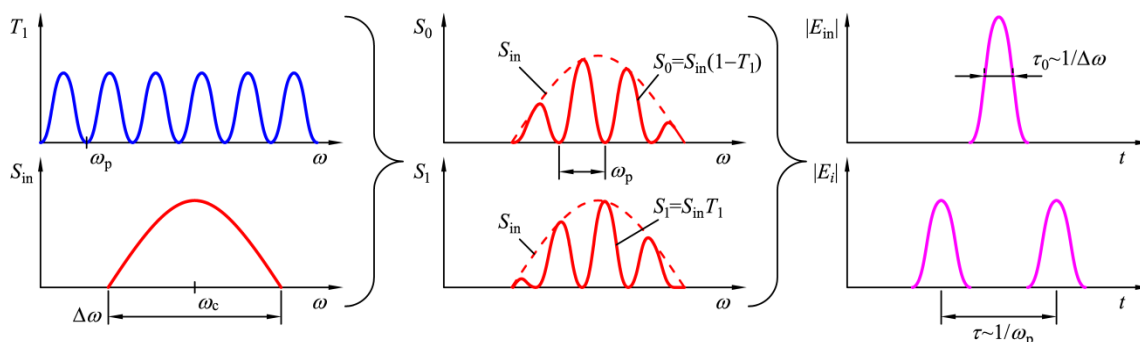


Рисунок. Качественная модель спектральной модуляции при АО дифракции УКИ в сильном акустическом поле и формирования реплик импульса

Представленная модель показывает, что в режиме изотропной АО дифракции возможно осуществить расщепление УКИ на две реплики, причем задержкой между репликами τ можно легко управлять, поскольку она пропорциональна амплитуде ультразвуковой волны. В работе также представлены детальные результаты моделирования описанного эффекта на основании нестационарной теории связанных мод, подтверждающие выводы работы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 21-12-00247, <https://rscf.ru/project/21-12-00247/>).

[1] Овчинников А.В., и др., *Квант. электрон.*, **46**, №12, 1149-1153, (2016).
 [2] Yushkov K.B., Molchanov V.Ya., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V. *Phys. Rev. A*, **96**, 043866, (2017).
 [3] Yushkov K.B., Molchanov V.Ya., *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, **26**, №5, 8700108, (2020).
 [4] Юшков К.Б., Молчанов В.Я., *Квант. электрон.*, **41**, №12, 1119-112053, (2011).

НЕПАРАКСИАЛЬНЫЕ НАКЛОННЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПУЧКИ И ПАКЕТЫ

Плаченев А.Б.¹, Киселев А.П.^{2,3}

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

²ПОМИ им. В.А. Стеклова, Санкт-Петербург, Россия

³ИПМАШ РАН, Санкт-Петербург, Россия

Представлены новые точные решения линейного волнового уравнения, описывающие волновые пучки и пакеты с гауссовой локализацией. В явной форме построены простые аналитические выражения для наклонных астигматических волновых пучков и пакетов.

Ключевые слова: непараксиальная теория, волновые пучки и пакеты.

Наклонные гауссовы пучки возникли в рамках параксиальной теории (например, [1, 2]) и область их применимости была поэтому ограничена малыми значениями углов наклона. Нами, без предположения о параксиальности поля, найдено соответствующее семейство простых точных решений волнового уравнения

$$c^2(u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}) - u_{tt} = 0.$$

Эти решения не являются гармоническими по времени. Конструкция основана на использовании комплексного сдвига по поперечным координатам в решениях бейтменовского типа (см., например, [3, 4]). Те же результаты можно получить и путем применения преобразования Лоренца.

Для простейшего случая, когда исходным решением является осесимметрическая фундаментальная бейтменовская мода, распространяющаяся вдоль оси z , $u = f(\theta)/(\beta - ib)$, где f – произвольная функция (форма волны), $\theta = \alpha + (x^2 + y^2)/(\beta - ib)$ – комплексифицированная фаза Бейтмена, $\alpha = z - ct$ и $\beta = z + ct$ – продольные характеристические переменные, а $b > 0$ – свободный параметр, характеризующий продольную комплексификацию. Примеры форм волны, обеспечивающих пучкообразную и пакетобразную локализацию решения, приведены, например, в [3, 4].

Переход к наклонным решениям осуществляется путем поперечного сдвига $x \mapsto x - ia$ [5], где $a > 0$ – свободный параметр, и последующего сдвига фазы $\theta \mapsto \theta - \theta_0$, где $\theta_0 = -ia^2/b$. В результате получаем решение, где фаза θ принимает вид

$$\theta = \theta_1 + \theta_2,$$

где слагаемые θ_1 и θ_2 содержат линейные и квадратичные по x и y члены соответственно. Обозначив $a/b = \tan\Phi$, можно записать эти слагаемые в виде

$$\theta_1 = (x \sin 2\Phi + z \cos 2\Phi - ct)/\cos^2\Phi, \quad \theta_2 = [(x - (z + ct) \tan \Phi)^2 + y^2]/(z + ct - ib).$$

В случае простейшего пучка (focus wave mode), когда форма волны имеет вид

$$f(\theta) = \exp(ik\theta), \quad k > 0,$$

решение представляет собой произведение двух множителей, из которых один, $\exp(ik\theta_1)$, описывает гармоническую по времени плоскую волну, направление распространения которой составляет угол 2Φ с осью z , а другой, $\exp(ik\theta_2)/(\beta - ib)$, отвечает непараксиальному гауссову пучку, наклонённому под углом Φ к оси z и движущемуся со скоростью c в направлении, противоположном направлению оси z . Пакетообразные решения с конечной энергией, отвечающие другим формам волны (см. например, [4]), описывают импульсы, распространяющиеся под углом 2Φ к оси z .

Нами рассмотрен случай фазы θ , соответствующей самому общему астигматизму [4]. Для форм волны, описывающих локализованные волновые пакеты, с помощью приема, предложенного в [6], найдены и исследованы выражения для не зависящих от времени характеристик таких пакетов – энергии, импульса и орбитального углового момента.

Работа выполнена при участии профессора Педро Чаморро-Посады и подробно изложена в [7].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (Проект №22-11-00338).

[1] Hadad Y., Melamed T., *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **58**, №4, 1164-1172, (2010).

[2] Hadad Y., Melamed T., *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **59**, №10, 3855-3862, (2011).

[3] Киселев А.П., *Опт. и спектр.*, **102**, №4, 661-681, (2007).

[4] Kiselev A.P., Plachenov A.B., Chamorro-Posada P., *Phys. Rev. A*, **85**, 043835, (2012).

[5] Плаченев А.Б., *Зап. научн. сем. ПОМИ*, **393**, 224-233, (2011).

[6] Плаченев А.Б., *Зап. научн. сем. ПОМИ*, **493**, 269-287, (2020).

[7] Plachenov A.B., Chamorro-Posada P., Kiselev A.P., *J. Lightwave Techn.*, **41**, №7, 2212-2224, (2023).

**ФАЗОВО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ И
ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЗАПИСИ
ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ**

Толстик А.Л., Ивакин Е.В.

Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

Приведен обзор экспериментальных и теоретических результатов по использованию динамических голограмм для фазово-поляризационных преобразований световых полей и измерения кинетических, нелинейно-оптических и термооптических характеристик материалов современной фотоники.

Ключевые слова: динамическая голограмма, нелинейная оптика, термооптика.

Динамическая голография, возникшая на стыке нелинейной оптики и классической (статической) голографии, за 50 лет своего развития прошла путь от первых экспериментов по записи голограмм в растворах красителей к созданию систем управления лазерными пучками, преобразования 3D изображений в реальном времени, адаптивной интерферометрии и бесконтактной диагностики светочувствительных сред [1-4].

В настоящей работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований фазового и поляризационного преобразований световых пучков, включая сингулярные, а также диагностики функциональных материалов методами динамической голографии (методы пространственно модуляционной спектроскопии), позволяющими измерить нелинейно-оптические, термооптические и кинетические параметры материалов, используемые в современной фотонике.

Показано, что в условиях нелинейной голографической записи появляется возможность управления фазой и поляризацией дифрагированной волны, включая мультиплицирование топологического заряда сингулярного пучка и визуализацию 3D изображений и пучков со сложной топологической структурой. Дополнительные возможности открывает поляризационная запись динамических голограмм, при которой опорная и сигнальная волны поляризованы ортогонально. Показана возможность записи поляризационных голограмм как за счет эффекта светоиндуцированной анизотропии поглощения, так и за счет зависимости интенсивности насыщения поглощения резонансной среды от поляризации лазерного излучения. Выявленные закономерности представляют интерес для реализации схем динамического фазово-поляризационного преобразования лазерных импульсов и кодирования информации при рассмотрении поляризации и топологического заряда светового пучка в качестве информационных параметров.

С практической точки зрения не менее важно использование динамических голограмм для измерения нелинейно-оптических, термооптических и кинетических характеристик светочувствительных сред. Используя взаимосвязь брэгговской дифракции на отдельных компонентах динамической решетки с нелинейной оптической восприимчивостью соответствующего порядка проведено измерение нелинейностей третьего, пятого и более высоких порядков. Продемонстрированы методики измерения параметров объемных и тонкопленочных полупроводников и активированных кристаллов (термооптический коэффициент, коэффициент температуропроводности, время жизни носителей заряда, время жизни ловушечных уровней полупроводников и возбужденного состояния активированных кристаллов). При этом для люминесцирующих сред решается проблема вторичного поглощения спонтанно испущенных фотонов.

Уникальные возможности появляются для измерения параметров тонких пленок. Рассмотрены тонкие (микронные и субмикронные) пленки алмазоподобного углерода, оксида кремния и термоэлектрика теллурида свинца. Установлено, что при поверхностном поглощении лазерного импульсного излучения наносекундной длительности в тонкопленочном материале формируется динамическая решетка, время релаксации которой позволяет определить параметры теплопереноса и рассчитать коэффициенты радиальной и тангенциальной температуропроводности. Увеличение периода динамической решетки сопровождается переходом от измерения температуропроводности пленки к эффективному значению температуропроводности, в которую начинает вносить вклад подложка, и при большом периоде решетки переходим к измерению температуропроводности подложки. Особый интерес вызывает эффект возбуждения акустической волны в приповерхностном слое воздуха, который ранее рассматривался, как фактор, искажающий динамику дифрагированного сигнала. Показано, что в этом случае появляется возможность измерять частоту и скорость ультразвука, по которой можно оценить температуру приповерхностного слоя воздуха и температуру тонкой пленки при ее нагреве лазерным импульсом.

[1] Rubanov A.S., Tolstik A.L., Karpuk S.M., Ormachea O., *Opt. Communications*, **181**, 183-190, (2000).

[2] Tolstik A.L., *Russian Physics Journal*, **58**, 1431-1440, (2016).

[3] Ромашко Р.В., *Вестник Дальневосточного отделения РАН*, №4, 40-47, (2021).

[4] Ivakin E.V., Tolstik A.L., Gorbach D.V., Stankevich A.A., *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, **95**, 1026-1030, (2022).

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАВЕДЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И
ЗАПИСИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕШЕТОК В КРИСТАЛЛЕ
СИЛИКАТА ВИСМУТА**

Даденков И.Г.¹, Толстик А.Л.¹, Миксюк Ю.И.², Саечников К.А.²

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

²Белорусский государственный педагогический университет, г. Минск, Беларусь

Приведены результаты экспериментальных исследований кинетики фотоиндуцированного поглощения, записи и релаксации динамических решеток лазерными импульсами наносекундной длительности в спектральном диапазоне от 450 до 580 нм.

Ключевые слова: динамическая голограмма, фотоиндуцированное поглощение, силикат висмута.

Важной особенностью фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов является протекание в них различных фотоиндуцируемых процессов, приводящих к изменению коэффициента поглощения (фотохромный эффект) и коэффициента преломления (фоторефрактивный эффект). Поскольку кристалл силиката висмута, исследуемый в данной работе, относится к широкозонным полупроводникам с шириной запрещенной зоны на уровне 3,5 эВ, то при освещении кристалла светом в видимой области спектра происходит фотовозбуждение электронов с различных энергетических уровней, лежащих в запрещенной зоне [1]. Вследствие этого увеличивается заселение зоны проводимости, приводящее к дальнейшему перераспределению электронов по ловушечным уровням. Далее следует рекомбинация свободных носителей заряда по освободившимся ловушечным уровням, которая может носить как локальный, так и диффузный механизмы. Особенностью кристаллов силленитов является одновременное существование как долгоживущих (секунды, часы), так и короткоживущих ловушек (микро – и миллисекунды) [2]. Данная особенность позволяет использовать кристаллы в системах записи, хранения и обработки оптической информации, голографических интерферометрах и в качестве активных элементов адаптивных оптических систем [3].

В настоящей работе с целью оптимизации условий голографической записи, а также разделения вкладов амплитудных и фазовых составляющих динамических решеток, были проанализированы спектральные особенности кинетики фотоиндуцированного поглощения (рис. а), формирования и релаксации динамических голограмм (рис. б) при использовании лазерных импульсов на различных длинах волн в диапазоне от 450 до 580 нм. При меньших длинах волн поглощение происходит в тонкой приповерхностной области кристалла, а при переходе к красной области спектра существенно снижается чувствительность записи динамических решеток вследствие низкого поглощения. Установлено, что если динамика наведенного поглощения проявляется во временном диапазоне до 100 мс, то при записи динамических решеток можно выделить два диапазона - до 100 мкс (короткоживущие решетки) и до 1 с (долгоживущие решетки). Предложена модель, согласно которой короткоживущие решетки обусловлены локальным механизмом нелинейности и заселением ловушечных уровней вблизи зоны проводимости, а долгоживущие решетки связаны с нелокальностью отклика, диффузией электронов и заселением более глубоких уровней в запрещенной зоне кристалла.

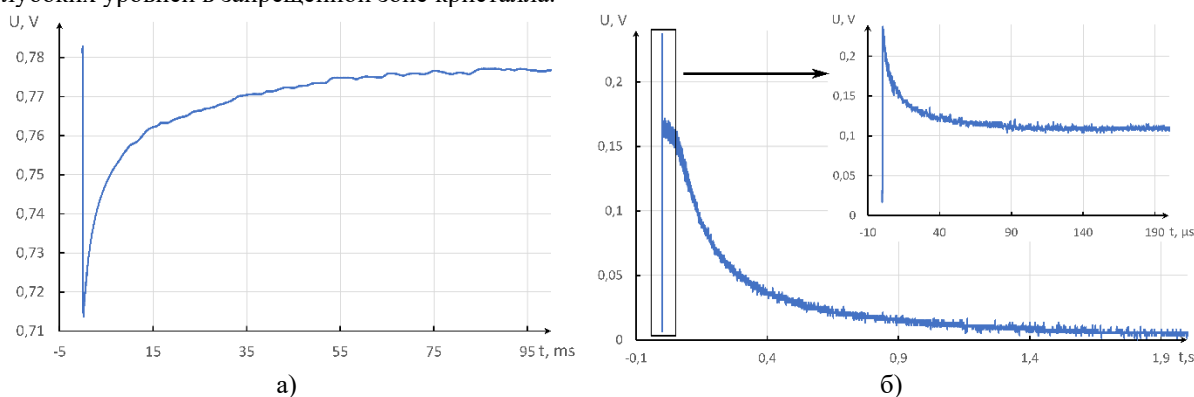


Рисунок. Характерные динамики прошедшего через кристалл зондирующего излучения (а) и дифрагированного излучения в схеме записи динамической решетки (б) при освещении кристалла лазерным импульсом с длиной волны 520 нм и интенсивностью 1 МВт/см²

[1] Каргин Ю.Ф., Бурков В.И., Марьян А.А., Егорышева А.В., *ИОХН РАН*, 312, (2004).

[2] Kornienko T., Kisteneva M., Shandarov S., Tolstik A., *Physics Procedia*, **86**, 105–112, (2015).

[3] Ромашко Р.В., *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*, **4**, 40–47, (2021).

**АНАЛОГ ЭФФЕКТА ТАЛЬБОТА ДЛЯ ДИФРАКЦИИ НА
ВИЛКООБРАЗНЫХ РЕШЕТКАХ**

Иконников Д.А., Мысливец С.А., Архипкин В.Г., Вьюнышев А.М.

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

Исследована дифракция света в ближней зоне на вилкообразных решетках. В области непосредственно за решёткой наблюдалось пространственно упорядоченное вдоль оси распространения распределение интенсивности света, характерное для эффекта Тальбота. Было обнаружено, что совокупность оптических сингулярностей образует две винтовые линии, закрученные вокруг направлений на ± 1 дифракционные порядки.

Ключевые слова: эффект Тальбота, вилкообразные решётки, оптические сингулярности.

Для периодических структур хорошо известен эффект самовоспроизведения картины дифракции в ближнем поле через равные расстояния – эффект Тальбота [1]. Одной из особенностей эффекта является самовосстановление (self-healing), то есть восстановление периодического распределения интенсивности за периодическим объектом с локальным нарушением периодичности структуры [2, 3]. Вилкообразные решетки, часто используемые для генерации оптических вихрей [4, 5], характеризуются наличием дислокации в пространственно-периодической структуре, что позволяет рассматривать их как частный случай упомянутых выше периодических решеток с локальным нарушением периодичности. Наличие трансляционной симметрии вилкообразных решеток приводит к формированию дискретного набора дифракционных максимумов в дальней зоне, а наличие дислокации приводит к тому, что свет в каждом из этих максимумов приобретает топологический заряд, зависящий от номера максимума и величины дислокации. Представляет интерес рассмотреть дифракцию на вилкообразной решетке в ближней зоне и исследовать наличие эффекта Тальбота или его аналога для таких решеток.

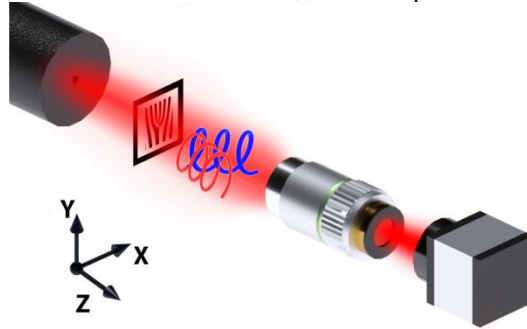


Рисунок. Иллюстрация эксперимента. Ансамбли оптических сингулярностей противоположного знака образуют винтовые линии за вилкообразной решеткой. Распределение интенсивности дифрагированного света проецируется объективом на ПЗС для анализа

В данной работе была теоретически и экспериментально исследована ближнепольная дифракция света видимого диапазона на вилкообразных решетках. Показано, что при дифракции на вилкообразной решетке, в ближней зоне формируется пространственно упорядоченное вдоль оси распространения распределение интенсивности света, характерное для эффекта Тальбота на периодических структурах. Сочетание многих порядков дифракции приводит к образованию набора сингулярностей противоположного знака (рисунок). Было обнаружено, что совокупность оптических сингулярностей образует две винтовые линии, закрученные вокруг направлений на ± 1 дифракционные порядки. Было обнаружено, что эти винтовые линии имеют пространственный период, равный $|p|z_T/2$. Эти результаты показывают, что пространственное поведение оптических сингулярностей, создаваемых вилкообразными решетками, находится в тесной связи с пространственным упорядочением, возникающим из-за эффекта Тальбота.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-12-00203, <https://rscf.ru/project/19-12-00203/>.

- [1] Wen J., Zhang Y., Xiao M., *Adv. Opt. Photon.*, **5**, 83, (2013).
- [2] Dammann H., Groh G., Kock M., *Appl. Opt.*, **10**, 1454, (1971).
- [3] Schnébelin C., de Chatellus H.G., *Opt. Lett.*, **43**, 1467, (2018).
- [4] Bazhenov V., Vasnetsov M., Soskin M., *JETP Letters*, **52**, 429, (1991).
- [5] Heckenberg N., Mcduff R., Smith C., Rubinszteinunlop H., Wegener M., *Optical and Quantum Electronics*, **24**, S951, (1992).

КОНФИГУРИРУЕМЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СУПЕРРЕШЁТКИ

Дармаев Э.Ч.^{1,2}, Иконников Д.А.¹, Мысливец С.А.^{1,2},

Архипкин В.Г.^{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

Исследована дифракция света в ближней зоне амплитудных решёток, полученных методом суперпозиции модуляций. В области непосредственно за решёткой наблюдалось двумерное пространственно-периодическое распределение интенсивности света, которое объяснено эффектом Тальбота для суперпозиционных структур.

Ключевые слова: эффект Тальбота, структурированный свет, оптические решётки.

Управление пространственными характеристиками света является одной из фундаментальных задач фотоники. Многочисленные исследования в этой области привели к формированию нового раздела в фотонике – «структурированному свету». Структурированные световые поля представляют интерес для различных приложений, в том числе микроскопии [1], визуализации [2], фотолитографии [3], оптических манипуляций [4] и других направлений. Используемые на практике периодические структуры, как правило, имеют ограниченный потенциал из-за конечного набора основных параметров. В случаях, когда требуется получение более сложных пространственных распределений светового поля, возникает необходимость поиска альтернативных способов получения световых полей с заданными характеристиками. Поэтому для формирования желаемых распределений светового поля необходимо исследование структур с более широким диапазоном варьируемых параметров.

Требуемыми свойствами обладают так называемые суперпозиционные структуры с трансляционной симметрией. Функция пропускания суперпозиционных структур формируется путем комбинирования нескольких пространственных гармоник, что может быть математически выражено следующим образом

$$T(x) = \text{sgn}(\sum_i A_i \cos(G_i x + \varphi_i)), \quad (1)$$

где sgn – функция знака, A_i – амплитуда гармоники, $G_i = 2\pi/\Lambda_i$ – вектор обратной решётки, Λ_i – период гармонической функции, φ_i – начальная фаза, $i=1,2,\dots$

В работе рассматривается использование суперпозиционных решёток для создания сложных пространственных распределений световых полей в ближней зоне дифракции. Рассматриваемые решётки уникальны тем, что формируются с помощью набора пространственных гармоник, каждая из которых характеризуется вектором обратной решётки, амплитудой и фазой. Суперпозиционные решётки сохраняют периодичность при соблюдении кратности составных периодов. Для описания рассматриваемой концепции введен термин «суперпериод», который определяется как период соответствующей оптической решётки, полученной методом суперпозиции модуляций. Если периоды составляющих суперпозиционную решётку гармоник имеют рациональное соотношение, то целые числа составных периодов будут укладываться в суперпериод [5], в противном случае такая структура будет квазипериодической.

Экспериментально показано, что при наличии периодичности, для суперпозиционных структур наблюдается эффект Тальбота, заключающийся в формировании пространственно-периодических распределений интенсивности (ковров Тальбота), которые, по сути, представляют собой текстурированные оптические решётки. Конфигурации оптических решёток можно варьировать путем изменения параметров отдельных пространственных гармоник в выражении (1). Результаты расчётов находятся в хорошем соответствии с экспериментальными распределениями, что говорит о применимости расчётной модели. Конфигурируемые оптические суперрешётки могут найти применение в оптических манипуляциях, связанных с биомедицинскими приложениями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-12-00203, <https://rscf.ru/project/19-12-00203/>.

[1] Feng S., Wang M., Wu J., *Opt. Letters*, **41**, 3157-3160, (2016).

[2] Sun W., Shatalov M., Deng J., Hu X., Yang J., Lunev A., Gaska R., *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 061102, (2010).

[3] Stuerzebecher L., Harzendorf T., Vogler U., Zeitner U.D., Voelkel R., *Opt. Express*, **18**, 19485-19494, (2010).

[4] Ikonnikov D.A., Myslivets S.A., Volochaev M.N., Arkhipkin V.G., Vyunishev A.M., *Sci. Rep.*, **10**, 20315, (2020).

[5] Novikov A.A., Chirkin A.S., *JETP*, **106**, 415-425, (2008).

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ –
ТЕРАГЕРЦОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
СВЕРХБЫСТРОЙ ДИНАМИКИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В
ФОТОПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ**

**Булгакова В.В.¹, Букин В.В.¹, Гончаров Ю.Г.¹, Ушаков А.А.¹, Зайцев К.И.¹,
Бурданова М.Г.^{2,3}, Пауков М.И.², Красников Д.В.⁴, Насибулин А.Г.⁴, Гарнов С.В.¹**

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

²Центр фотоники и 2D-материалов Московского физико-технического института,
г. Долгопрудный, Россия

³Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка, Россия

⁴Центр фотоники и инженерии Сколковского института науки и технологий, Москва, Россия

Работа презентует новый экспериментальный стенд спектроскопии оптической накачки – терагерцового зондирования, разработанный на базе Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Ключевые слова: фотопроводимость, оптическая накачка-терагерцовое зондирование.

Спектроскопия оптической накачки - терагерцового (ТГц) зондирования (ОНТЗ) в настоящее время используется для получения информации о сверхбыстрой динамике фотовозбужденных носителей в полупроводниках. В экспериментах ОНТЗ сверхкороткий лазерный импульс создает свободные носители заряда, а широкополосные ТГц импульсы (чаще всего в диапазоне 0,3-3 ТГц, что соответствует энергиям фотонов от 1,2 мэВ до 12,4 мэВ) используются для исследования пропускания образца. В отличие от обычных экспериментов с оптической накачкой и оптическим зондированием, метод ОНТЗ позволяет измерять временную зависимость напряженности электрического поля зондирующего импульса. С помощью Фурье анализа можно получить полный комплексный спектр поглощения, описывающий изменение амплитуды и фазовый сдвиг на частотах в пределах спектра зондирующего импульса.

В этой работе мы использовали ОНТЗ-спектроскопию для измерения динамики носителей и переноса заряда в обработанных плазмой углеродных нанотрубках (УНТ) [1]. Влияние дефектов на динамику носителей и перенос заряда в углеродных нанотрубках остается неизученным. В нашем исследовании мы установили корреляцию между количеством дефектов, внесенных контролируемым образом и оптоэлектронными свойствами УНТ. Мы использовали спектроскопию ОНТЗ для измерения времени жизни носителей, определяемого временем захвата в дефектных состояниях, и обнаружили короткие и длинные времена жизни, связанные с дефектами. Мы провели измерения с помощью электронной микроскопии в дополнение к абсорбционной, рамановской, инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье, ТГц и ОНТЗ-спектроскопии. Взаимодополняющий характер этих методов позволяет оценить вклад дефектов в фотопроводимость УНТ. Мы обнаружили, что введение дефектов, добавленных плазменной обработкой, приводит к увеличению рассеяния заряда вдоль созданных плазмой сегментов и, следовательно, к снижению подвижности носителей, фотопроводимости и времени жизни.

[1] Kurtukova T.N., Kopylova D.S., Raginov N.I., Khabushev E.M., Novikov I.V., Serebrennikova S.I., Krasnikov D.V., and Nasibulin A.G., *Appl. Phys. Lett.*, **122**, 093501, (2023).

**НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ
ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ТРЕХМЕРНЫХ
НЕЛИНЕЙНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ**

Вьюнышев А.М.^{1,2}, Архипкин В.Г.^{1,2}, Чиркин А.С.^{1,3}

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

Приводятся результаты рассмотрения генерации второй гармоники фемтосекундных лазерных импульсов в трехмерных нелинейных фотонных кристаллах. Показана возможность мультиплексирования генерируемого излучения. Продемонстрирована роль дисперсии групповых скоростей в формировании частотно-углового спектра генерируемого излучения.

Ключевые слова: фемтосекундные лазерные импульсы, генерация второй гармоники, нелинейный фотонный кристалл.

Трехмерные (3D) нелинейные фотонные кристаллы (НФК) представляют собой среды с модуляцией квадратичной нелинейной восприимчивости $\chi^{(2)}$ вдоль трех пространственных измерений (рис. (а)), что представляет практический интерес, связанный с возможностью структурирования света за счет многообразия возможных нелинейно-оптических взаимодействий в них (рис. (б)). Долгое время 3D НФК были объектом сугубо теоретических исследований ввиду отсутствия технологий их получения. Последние годы ознаменовались значительным прогрессом в области структурирования вещества и развитием методов получения 3D структур различного типа в квадратично-нелинейных средах путем непосредственной записи лазерным пучком (англ. – direct laser writing) [1, 2]. Указанные методы используют лазеры со сверхкороткими импульсами для фотомодификации вещества. Были получены 3D НФК различного типа для формирования двумерного дискретного углового спектра генерируемого излучения второй гармоники [1, 2], а также получения структурированных световых полей [3]. В этих работах рассматривалось нелинейно-оптическое преобразование в квазистатистическом приближении. В тоже время представляет интерес рассмотрение процесса удвоения частоты фемтосекундных лазерных импульсов, которые весьма востребованы в области ультрабыстрой оптики и оптических коммуникациях.

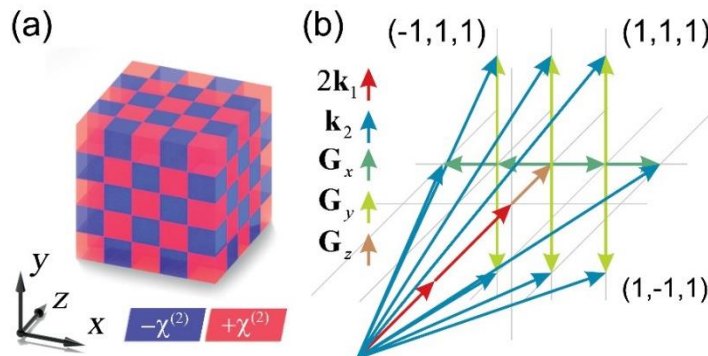


Рисунок. Пространственное распределение $\chi^{(2)}$ в 3D НФК (а) и возможные нелинейно-оптические взаимодействия в обратном пространстве (б)

В настоящей работе приводятся результаты теоретического рассмотрения процесса генерации второй гармоники (ГВГ) фемтосекундных лазерных импульсов в периодических 3D нелинейных фотонных кристаллах. Показана возможность мультиплексирования генерируемого излучения, то есть получения ГВГ в режиме нелинейной дифракции Брэгга для набора порядков нелинейной дифракции. Продемонстрирована роль дисперсии групповых скоростей в формировании частотно-углового спектра генерируемого излучения. Получено выражение для спектральной ширины генерируемого излучения с учетом расстройки обратных групповых скоростей.

3D НФК открывают новые возможности для нелинейно-оптического преобразования частоты света и нелинейного структурирования света и могут оказаться хорошей платформой для реализации нелинейных параметрических взаимодействий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-12-00203, <https://rscf.ru/project/19-12-00203/>.

[1] Xu T. et al., *Nature Photon.*, **12**, 591-595, (2018).

[2] Wei D. et al., *Nature Photon.*, **12**, 596-600, (2018).

[3] Liu S. et al., *Nat. Commun.*, **10**, 3208, (2019).

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ В МАССИВЕ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВОЛНОВОДОВ

Михин А.О.¹, Савельев Р.С.¹, Руцкая В.В.², Синев И.С.¹, Горлач М.А.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Университет Мартина-Лютера Халле-Виттенберг, Халле, Германия

В работе мы экспериментально наблюдаем наличие топологического режима и реализуем когерентное управление в телекоммуникационном диапазоне длин волн в массиве кремниевых наноструктурированных волноводов, используя концепцию случайно вырожденных мод мета-атомов.

Ключевые слова: топологическая фотоника, топологические краевые состояния, когерентное управление.

Повысить локализацию и длину распространения света возможно благодаря топологической фотонике и присущей таким системам глобальной симметрии. В то время как традиционные дизайны топологических структур опираются на симметрию решетки [1], существует альтернативная концепция, основанная на случайно вырожденных модах отдельных мета-атомов. Используя эту концепцию, мы экспериментально реализуем топологическое краевое состояние в массиве кремниевых наноструктурированных волноводов (рис (а)), каждый из которых содержит пару вырожденных мод на телекоммуникационных длинах волн. Используя гибридную природу топологической моды, мы реализуем ее когерентное управление, регулируя фазу между вырожденными модами и демонстрируем выборочное возбуждение объемных или краевых состояний.

Топологическими свойствами нашей структуры можно управлять, изменяя длину волны возбуждения, которая определяет не только длину локализации, но и само существование топологической краевой моды. Визуализация распределения поля осуществляется посредством генерации сигнала третьей гармоники (СТГ). Исследование образца происходит в геометрии пропускания. Линейно поляризованный свет через первый объектив фокусируется на одном из каплеров. Сигнал третьей гармоники, генерируемый в образце, регистрируется через второй объектив. После фильтрации длинноволнового лазерного возбуждения мы получаем изображение образца на ПЗС-камере визуализированное с помощью СТГ (рис. (b-g)).

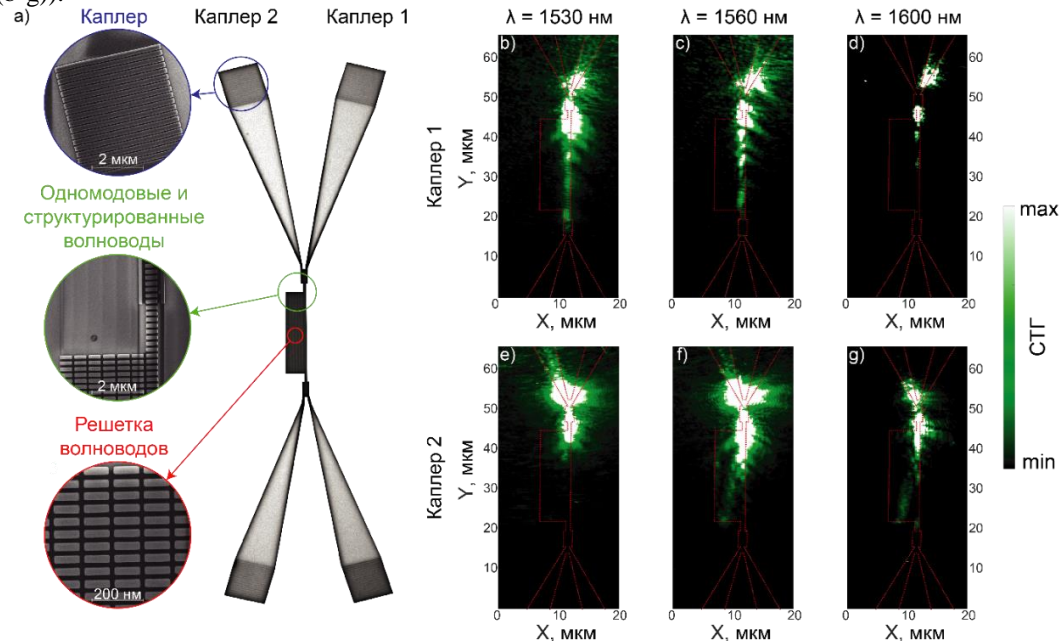


Рисунок. а) Оптическое изображение фотонной структуры и СЭМ-изображения ее основных компонентов: каплера (обведено синим), одномодового и структурированного волноводов (обведено зеленым), решетка связанных волноводов (обведено красным). (b-g) Распространение топологических краевых и объемных мод для различных длин волн возбуждения, визуализированных с помощью сигнала третьей гармоники. (b-d) Возбуждение через каплер 1 (режим краевой моды). (e-g) Возбуждение через каплер 2 (режим объемной моды). Красные пунктирные линии на (b-g) показывают контуры структуры

В заключение, нами был продемонстрирован новый способ управления топологическими состояниями, основанный на концепции случайно вырожденных мод отдельных мета-атомов. Из-за многомодового характера решетки наблюдаемые топологические моды имеют гибридную природу, демонстрируя различную эффективность возбуждения для разных входных портов оптического сигнала.

[1] Wu L.-H., Hu X., *Physical Review Letters*, **114**, 223901, (2015).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ 3D-СЦЕНЫ С ОСЕВОЙ ГОЛОГРАММЫ ПРИ ПОМОЩИ СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОСЕТИ

Свистунов А.С., Рымов Д.А., Козлов А.В., Стариков Р.С., Черёмхин П.А.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В данной работе предлагается нейросетевой метод восстановления набора объектных плоскостей, содержащих фазовые объекты, с одной осевой цифровой голограммы Френеля. Метод использует свёрточную нейросеть с ветвлением декодера.

Ключевые слова: цифровая голография, нейронные сети, глубокое обучение.

Задача реконструкции набора сечений 3D-сцены с цифровой голограммы является крайне важной и интересной, так как находит применение в различных областях науки таких как: биология, медицина, экология и т.д. При решении данной задачи традиционными методами [1], основанными на скалярной теории дифракции, возникают трудности из-за необходимости отделения неинформативных порядков дифракции на восстановленной изображении, а также шумов. Особенно сложным случаем является восстановление информации с голограмм, записанных по осевой схеме [2]. В этом случае используются методы, требующие регистрации нескольких голограмм. Альтернативой является использование нейросетей [3-5]. В работе предлагается метод, использующий нейросеть для восстановления объектных плоскостей с голограмм, тем самым преодолевающий недостатки традиционных методов.

Архитектура нейросети представляет собой модифицированную U-Net с количеством ветвей декодера, соответствующей общему числу реконструируемых плоскостей [6]. В качестве функции потерь использовалось среднеквадратичное отклонение. Нейросеть обучалась на голограммах, записанных от плоскостей, содержащих по 5 объектов. Размер тренировочной выборки составлял 25 тысяч голограмм, тестовый набор содержал 5 тысяч. На рисунке (а) приведён график зависимости метрик оценки качества восстановленных изображений (КК – коэффициент корреляции, ИСС – индекс структурного сходства) от количества восстанавливаемых объектных плоскостей для плоскостей, содержащих по 10 объектов. Видно, что нейросеть эффективно работает для 8 объектов в 3D-сцене и КК составил 0,9. На рисунке (б) представлен пример восстановления 8 плоскостей с 5 объектами в каждой (б1, б2 – оригинальные изображения, б3, б4 – изображения, восстановленные нейросетью).

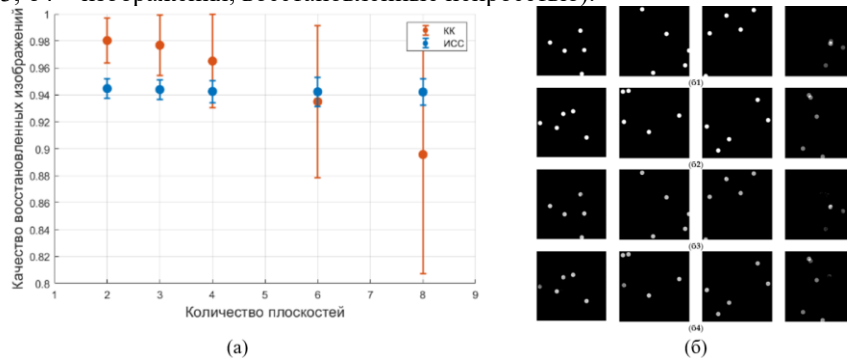


Рисунок. (а) График зависимости качества восстановления объектных плоскостей от их количества (б) Пример качества восстановления 8 плоскостей, содержащих по 5 объектов

Данная архитектура нейросети была протестирована на оптически зарегистрированных голограммах. Исходная 3D-сцена состояла из двух объектных плоскостей, отображенных на фазовых пространственно-временных модуляторах света (ПВМС). Качество восстановления сечений с голограмм, зарегистрированных экспериментально, также оказалось высоким. Среднее значение ИСС составило 0,86.

Таким образом, предложенная модель эффективно справляется с восстановлением набор плоскостей 3D-сцены как в случае модельных голограмм, так и в случае оптически зарегистрированных голограмм.

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

[1] Schnars U., Falldorf C., Watson J., Jüptner W., Digital Holography and Wavefront Sensing; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, (2015).

[2] Yamaguchi I., Zhang T., *Optics Letters*, **22**, №16, 1268, (1997).

[3] Wang K., Kemaq Q., Di J., Zhao J., *Optics Letters*, **45**, №15, 4220-4223, (2020).

[4] Wu Y., Wu J., Jin S., Cao L., Jin G., *Optics Communications*, **493**, 126970, (2021).

[5] Рымов Д.А., Черёмхин П.А., Стариков Р.С., *Оптический журнал*, **89**, №9, 11-19, (2022).

[6] Svistunov A.S., Rymov D.A., Starikov R.S., Cheremkhin P.A., *Appl. Sci.*, **13**, №10, 6125, (2023).

**ВЛИЯНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ НА КАЧЕСТВО
ИЗОБРАЖЕНИЯ, ВОССТАНАВЛИВАЕМОГО ТЕХНИКОЙ
МУЛЬТИПЛЕКСНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ФАНТОМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

Исмагилов А.О., Лаппо-Данилевская А.К., Цыпкин А.Н.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В данной работе представлены результаты численного моделирования восстановления изображений методом мультиплексной терагерцовой фантомной визуализации при использовании различных частотных диапазонов широкополосного терагерцового излучения и оценки их качества.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, фантомная визуализация, мультиплексирование.

Методы фантомной визуализации, основанные на корреляции пространственного распределения поля, взаимодействующего с измеряемым объектом, и значениями прошедшей через объект или отражённой от него интенсивности, имеют ряд преимуществ, таких как возможность работы с излучением низкой интенсивности и устойчивости к шумам [1]. Данные особенности актуальны для систем терагерцовой визуализации, так как позволяют производить измерения без необходимости использования многопиксельных матричных детекторов [2].

При рассмотрении случая визуализации амплитудных объектов, не обладающих спектральными особенностями, например металлических изделий, имеется возможность применения мультиплексирования пространственных распределений поля – спекл-структур – на отдельных спектральных компонентах для ускорения проводимых измерений. Данный эффект возможно достичь при распространении широкополосного терагерцового излучения через диффузор, представляющий из себя прозрачную пластину с фазовой неоднородностью [3]. Однако, из-за значительных изменений в диаметре спеклов, формируемых на отдельных спектральных компонентах, при использовании различных спектральных диапазонов, качество изображений может меняться. На рисунке (а) представлены результаты зависимости коэффициента SSIM, полученного при восстановлении изображения объекта радиальной миры “Siemens star” методом мультиплексной фантомной визуализации от количества диффузоров (итераций), использованных для формирования спекл структур, и от частотного диапазона широкополосного ТГц поля.

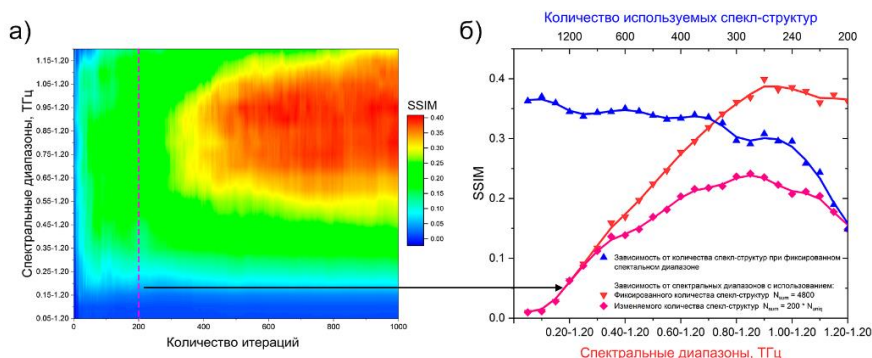


Рисунок. а) Зависимость коэффициента SSIM от количества итераций при условии выбора различных спектральных диапазонов используемого широкополосного излучения; б) Сечение полученного распределения при 200 итерациях – розовая кривая, зависимость от спектрального диапазона с фиксированным количеством спекл-структур – красная кривая, зависимость от количества спекл-структур при фиксированном спектральном диапазоне – синяя кривая

Наличие максимума у значения индекса структурного сходства между эталонным и восстановленным изображениями в мультиплексной терагерцовой фантомной визуализации при фиксированном количестве измерений обусловлено его увеличением при сдвиге длинноволновой границы спектра псевдотеплового источника широкополосного терагерцового излучения в коротковолновую область за счёт соответствия среднего диаметра спекл-структур размеру минимальных деталей восстанавливаемого объекта (рисунок (б) красная кривая), и при этом его уменьшением в корень из количества спекл-структур, формируемых на разных частотных компонентах, отбрасываемых при сужении спектрального диапазона (рисунок (б) синяя кривая).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт No 2019-0903).

[1] Bromberg Y., Katz O., Silberberg Y., *Phys. Rev. A*, **79**, №5, 053840, (2009).
 [2] Shen H., Gan L., Newman N., Dong Y., Li C., Huang Y., Shen Y. C., *Opt. Lett.*, **37**, №1, 46-48, (2012).
 [3] Ismagilov A., Lappo-Danilevskaya A., Grachev Y., Nasedkin B., Zalipaev V., Petrov N.V., Tsyrkin A.N., *JOSA B*, **39**, №9, 2335-2340, (2022).

ВОЛНОВОДНЫЙ Tm^{3+} :YAP ЛАЗЕР С ГИГАГЕРЦОВОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ

Понарина М.В.¹, Охримчук А.Г.^{1,2}, Рыбин М.Г.¹, Букин В.В.¹, Образцов П.А.³

¹Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

²Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия

³Университет Восточной Финляндии, Йоэнсуу, Финляндия

На основе волновода в кристалле Tm^{3+} :YAP и графена в качестве насыщающегося поглотителя создан твердотельный лазер с частотой повторения импульсов 8 ГГц, работающий в диапазоне длин волн 1925-1950 нм.

Ключевые слова: волноводный лазер, гигагерцовая частота повторения импульсов, синхронизация мод.

Лазерные системы, работающие в диапазоне длин волн около 2 мкм, являются источниками безопасного для глаз излучения и обладают преимуществом для ряда приложений: лидары, системы обнаружения газов, а также за счет высокого поглощения в воде такие лазеры востребованы для медицинских применений. Генераторы лазерных импульсов с частотой повторения более 1 ГГц имеют широкий спектр применений, например, для быстрой передачи данных или нелинейных биофотонных приложений [1–3].

В данной работе создан компактный Tm^{3+} :YAP лазер с частотой повторения импульсов 8 ГГц, основанный на использовании графена в качестве насыщающегося поглотителя и волноводной структуры [4]. Для накачки активного элемента используется излучение диодного лазера с длиной волны 804 нм и средней мощностью 5 Вт. Излучение накачки фокусируется в волноводную структуру, созданную внутри кристалла Tm^{3+} :YAP методом прямой записи пучком фемтосекундного лазера [5]. Волновод трубчатого типа образован 64–72 параллельными треками с уменьшенным показателем преломления на 0.0067 относительно необлученной сердцевины волновода (кристалла Tm^{3+} :YAP) диаметром 30 мкм (рисунок).

Резонатор образован двумя зеркалами: дихроичным зеркалом с коэффициентами отражения $R > 99,5\%$ в диапазоне 1.9-2.0 мкм и $R < 10\%$ на 0.8 мкм, нанесенным на входной торец кристалла, и выходным зеркалом $R = 85\%$ в диапазоне 1.9-2.0 мкм, $R = 30\%$ на 0.8 мкм. Насыщающийся поглотитель на основе графена был синтезирован методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) и нанесен непосредственно на выходное зеркало резонатора. Длина резонатора составила 9.7 мм, что обеспечивает частоту повторения импульсов 8 ГГц. Для прецизионного контроля длины резонатора выходное зеркало с графеном оснащено пьезоэлектрическим элементом.

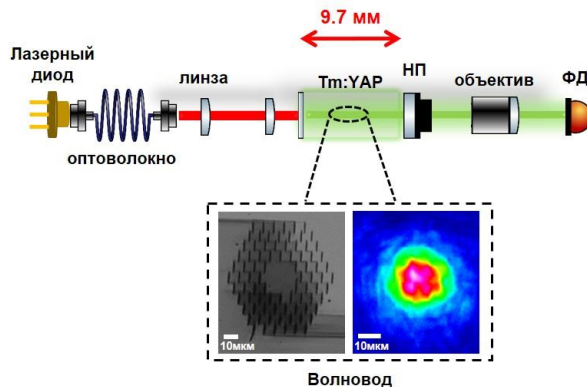


Рисунок. Схема волноводного Tm^{3+} :YAP лазера: НП – выходное зеркало с нанесенным насыщающимся поглотителем на основе графена, ФД – фотодиод

В работе продемонстрирована возможность управляемого переключения между одно- и двухволновой генерацией в компактном твердотельном Tm^{3+} :YAP лазере, работающем в режиме пассивной синхронизации мод с модуляцией добротности, с частотой повторения импульсов 8 ГГц. За счет контролируемого изменения внутррезонаторных потерь наблюдается непрерывная перестройка центральной длины волны излучения лазера в диапазоне от 1925 до 1950 нм.

[1] Chu S.-W., Liu T.-M., Sun C.-K., Lin C.-Y., and Tsai H.-J., *Opt. Express*, **11**, 933, (2003).

[2] Bartels A., Gebbs R., Kirchner M.S., and Diddams S.A., *Opt. Lett.*, **32**, 2553, (2007).

[3] Jones D.J. et. al, *Science*, **288**, 635-639, (2000).

[4] Ponarina M.V, Okhримчук A.G., Rybin M.G., Bukin V.V, and Obratsov P.A., *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **49**, 229, (2022).

[5] Okhримчук A., Mezentsev V., Shestakov A., and Bennion I., *Opt. Express*, **20**, 3832, (2012).

СОЛИТОННЫЕ РЕЖИМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОДНООСНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Сазонов С.В.

НИИ Курчатовский институт, Москва, Россия

Представлен теоретический обзор по генерации широкополосного терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами в одноосных кристаллах за счет квадратичной оптической нелинейности. При этом акцент сделан на самосогласованных солитонных режимах генерации в результате эффекта оптического выпрямления. В числе прочего рассмотрены процессы генерации лазерными импульсами с наклонными волновыми фронтами, что приводит к выполнению условия синхронизма и, как следствие, к повышению эффективности генерации.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, оптико-терагерцовый солитон.

Механизм генерации широкополосного терагерцового излучения лазерными импульсами основан на механизме оптического выпрямления в средах, обладающих квадратичной оптической нелинейностью (оптически одноосных кристаллах). Данный механизм генерации был впервые предложен в работе [1]. Экспериментальная реализация была проведена в работах [2, 3]. Длительность лазерного импульса составляет от нескольких сотен до нескольких десятков фемтосекунд. Поэтому спектральная ширина такого импульса простирается от нескольких десятков до сотен терагерц. В спектре лазерного сигнала имеются частоты, разности которых попадают в терагерцовый диапазон. Так как данные частоты образуют мощность континуума, то генерируемые терагерцовые импульсы являются широкополосными, а их временная длительность порядка длительности входного лазерного импульса. Таким образом, терагерцовый сигнал содержит порядка одного периода электромагнитных колебаний, т.е. является предельно коротким импульсом.

Генерация происходит в черенковском режиме при выполнении условия

$$c / n_T = v_g \cos \theta, \quad (1)$$

где c - скорость света в вакууме, n_T - терагерцовый показатель преломления среды, v_g - групповая скорость входного оптического импульса, соответствующая его несущей частоте, θ - угол между направлениями распространения оптического и генерируемого терагерцового импульсов.

При условии (1) происходит отрыв терагерцового излучения от оптического импульса, что является причиной низкой эффективности генерации. Чтобы повысить эффективность, в экспериментах используют импульсы с наклонными волновыми фронтами [4, 5]. В этом случае угол θ имеет смысл угла между фазовыми и групповыми фронтами лазерного импульса. Вследствие этого эффективность генерации по энергии удастся повысить вплоть до одного процента по энергии.

Рассматриваемый механизм соответствует процессу, при котором каждый оптический фотон распадается на терагерцовый фотон и другой оптический фотон более низкой частоты. Условие синхронизма (1) является следствием законов сохранения энергии и импульса при данном элементарном процессе. Это выражается в обратном влиянии генерируемого терагерцового сигнала на оптический импульс, несущая частота которого испытывает смещение в красную область [6, 7].

Интенсивности генерируемых терагерцовых сигналов составляют порядка $\sim 10^8$ Вт / см² [8]. Следовательно, появилась настоятельная необходимость в развитии нелинейной «терагерцовой оптики».

При теоретическом рассмотрении оптический импульс описывается в терминах огибающей его электрического поля, в то время как терагерцовый сигнал – в терминах самого поля. Наклон волновых фронтов приводит к переопределению параметра дисперсии групповой скорости оптического импульса за счет дифракции. Это существенно расширяет возможности формирования оптико-терагерцовых солитонов [9]. В частности, появляется возможность их генерации в бездисперсионном режиме.

[1] Абдуллин У.А., Ляхов Г.А., Руденко О.В., Чиркин А.С., *ЖЭТФ*, **66**, №4, 1295 – 1304, (1974).

[2] Багдасарян Д.А., Макарян А.О., Погосян П.С., *Письма в ЖЭТФ*, **37**, №10, 498 – 500, (1983).

[3] Auston D.H., Cheung K.P., Valdmanis J.A., and Kleinman D.A., *Phys. Rev. Lett.*, **53**, 1555 – 1558, (1984).

[4] Hebling J., Almasi G., Kozma I.Z., and Kuhl J., *Optics Express*, **10**, 1161 – 1166, (2002).

[5] Степанов А.Г., Мельников А.А., Компанец В.О., Чекалин С.В., *Письма в ЖЭТФ*, **85**, 279 – 282, (2007).

[6] Hattori T. and Takeuchi K., *Optics Express*, **15**, 8076 – 8093, (2002).

[7] Бугай А.Н., Сазонов С.В., *Письма в ЖЭТФ*, **87**, №8, 470 – 476, (2008).

[8] Tsupkin A.N., Melnik M.V., Zhukova M.O., Vorontsova I.O., Putilin S.E., Kozlov S.A., and Zhang X., *Optics Express*, **27**, 10419, (2019).

[9] Sazonov S.V. and Ustinov N.V., *Laser Physics Lett.*, **19**, №2, 025401, (2022).

РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА ОТ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

Оладышкин И.В., Фадеев Д.А.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты аналитического и численного исследования отражения фемтосекундного лазерного импульса от металлической поверхности с учетом тепловых нелинейных эффектов. Показано, что излучение повреждающей интенсивности может распастаться на пару поверхностных плазмон-поляритонов.

Ключевые слова: неустойчивость, тепловая нелинейность, металл.

Тепловая нелинейность металлов существенно влияет на их электромагнитные свойства на субпикосекундных временных масштабах. Рост частоты столкновений электронов при сверхбыстром нагреве приводит к многократному увеличению коэффициента поглощения лазерных импульсов и, таким образом, к сильному изменению комплексной диэлектрической проницаемости. Этот эффект создаёт предпосылки для возникновения неустойчивости при отражении лазерного импульса, исследованию которой и посвящена данная работа. Одним из проявлений неустойчивости такого рода может быть спонтанное образование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (англ. LIPSS) [1, 2].

Механизм распада состоит в следующем. Интерференционное поле падающего импульса и пары поверхностных плазмон-поляритонов неоднородно нагревает среду, что вызывает пространственное возмущение диэлектрической проницаемости и резонансно усиливает конверсию падающего излучения в поверхностные плазмоны. Возникает положительная обратная связь. По аналитическим оценкам [2], время развития неустойчивости для золота составляет 15–50 фс при плотностях лазерного излучения порядка 1 Дж/см², что соответствует условиям реальных одноимпульсных экспериментов, в ходе которых возникают полосовые структуры. Формирование температурной решётки на поверхности металла в нелинейном режиме, полученное в численном моделировании, показано на рисунке.

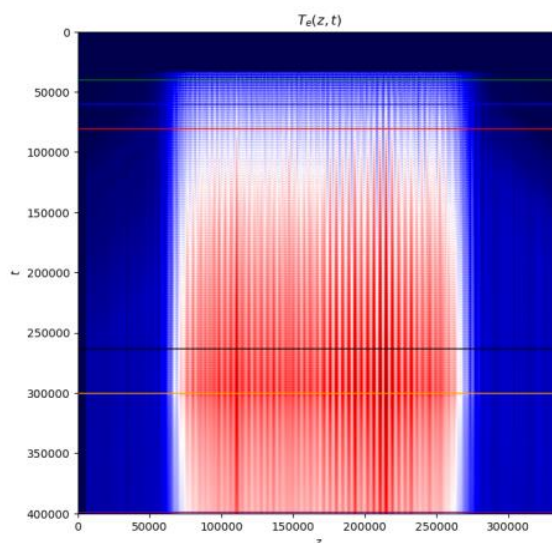


Рисунок. Формирование периодической решётки электронной температуры на шероховатой поверхности металла во время воздействия лазерного импульса. Горизонтальная ось – координата z вдоль поверхности металла, вертикальная ось – время, цвет – электронная температура вблизи поверхности

Важно отметить, что данный эффект приводит не только к неоднородному нагреву поверхности, но и к общему росту коэффициента поглощения оптического излучения в металле. Поле поверхностных плазмонов в режиме насыщения может достигать амплитуд, сопоставимых с амплитудой падающей волны. Таким образом, рассмотренный нелинейный распад является существенным фактором как в общей динамике поглощения оптического импульса в повреждающих условиях, так и в формировании лазерно-индуцированных поверхностных структур (LIPSS).

Исследование выполнено при финансовой поддержке НЦМУ «Центр фотоники» (проект Минобрнауки РФ, контракт №075-15-2020-906). И.В. Оладышкин благодарит за персональную поддержку Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС», грант №22-1-3-49-1.

[1] Bonse J., *Laser & Photonics Reviews*, **14**, 2000215, (2020).

[2] Oladyshkin I., *Physical Review B*, **106**, L081408, (2022).

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ТРЁХКРАТНОЕ ПониЖЕНИЕ ЧАСТОТЫ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КВАДРАТИЧНОЙ СРЕДЕ ЗА СЧЁТ
КАСКАДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Trofimov V.A.¹, Харитонов Д.М.², Федотов М.В.²

¹South China University of Technology, Guangzhou, China.

²Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Обсуждается процесс трёхкратного понижения частоты лазерного излучения в среде с квадратичным нелинейным откликом на основе каскадных процессов. Эффективность, полученная теоретически, составляет более 75%.

Ключевые слова: генерация разностной частоты, каскадные процессы, квадратичная восприимчивость.

Преобразование частоты лазерного излучения в инфракрасную и терагерцовую области спектра является актуальной задачей. Несмотря на последние достижения (в [1] получены фемтосекундные импульсы на длине волны 8 мкм [1]), преобразование частоты оптического излучения в нелинейных средах является надёжным способом генерации ИК и ТГц излучения различной длительности. Самым распространённым процессом является процесс генерации разностной частоты. Обзор работ, в которых он используется, содержится в [2].

В настоящей работе рассматривается случай кратных частот взаимодействующих волн в среде с квадратичной нелинейностью: волны с частотами ω (далее – низкочастотная), 2ω (промежуточная частота) и 3ω (высокочастотная). Предполагается, что основная энергия во входном сечении нелинейной среды сосредоточена на частоте 3ω . При этом, расстройка волновых чисел высокочастотной и низкочастотной волн близка к нулю, а расстройка волновых чисел между промежуточной и низкочастотной волнами велика. В таких условиях в среде с квадратичной нелинейностью возникает отклик среды, подобный Керровской нелинейности.

Для математического обоснования данного утверждения из исходной системы нелинейных уравнений Шрёдингера с квадратичной нелинейностью выведена система (далее – модифицированная) нелинейных дифференциальных уравнений, содержащая слагаемые, пропорциональные третьей степени электрического поля. В приближении длинных импульсов найдено решение модифицированной системы уравнения. В частности, найдено соотношение между входными интенсивностями высокочастотной и промежуточной волн, коэффициентов квадратичной восприимчивости нелинейной среды и расстройками волновых чисел, при котором эффективная генерация низкочастотной волны происходит от уровня шумов на этой частоте:

$$2A_{30}^2 - 5A_{20}^2 + \frac{\Delta_{21}\bar{k}\Delta_{31}\bar{k}n^4}{12(\pi\chi^{(2)}\bar{k})^2} = 0. \quad (1)$$

Здесь A_{20}^2 и A_{30}^2 – квадраты напряжённости входного излучения на частотах 2ω и 3ω . $\Delta_{21}\bar{k}$ и $\Delta_{31}\bar{k}$ – расстройки волновых чисел промежуточной и высокочастотной волн, соответственно, и низкочастотной волны, \bar{k} и n – волновое число и показатель преломления на частоте ω , $\chi^{(2)}$ – коэффициент квадратичной восприимчивости среды. Важно отметить, что данное условие допускает нулевое значение входной интенсивности промежуточной волны. Таким образом, фактически только высокочастотная волна присутствует на входе.

Компьютерное моделирование, выполненное на основе исходной системы уравнений, подтвердило результаты, полученные аналитически. Однако, нужно отметить несколько их особенностей. Так, условие (1), действительно, обеспечивает высокоэффективную генерацию низкочастотной волны (около 62% энергии входной высокочастотной волны переходит в низкочастотную волну), но оно не является оптимальным с точки зрения эффективности генерации. При значениях (ненулевых) входной интенсивности промежуточной волны, меньших, чем требуется соотношением (1), эффективность генерации низкочастотной волны может быть повышена до 75–78% при условии увеличения длины нелинейной среды. Для практики важно подчеркнуть, что эффективная генерация низкочастотной волны реализуется как от уровня шумов, так и при ее нулевом значении.

Компьютерное моделирование показало также возможность эффективного трёхкратного понижения частоты коротких импульсов при учёте дисперсии групповых скоростей второго порядка.

Предлагаемый механизм понижения частоты может быть использован для преобразования частоты лазерного излучения в среднюю и дальнюю инфракрасную область спектра, а также в терагерцовый диапазон частот, учитывая прогресс в проектировании и выращивании нелинейных кристаллов [3].

Д.М. Харитонов и М.В. Федотов благодарят Московский Центр фундаментальной и прикладной математики за поддержку.

[1] Täschler P. et al., *Nature Photonics*, **15**, 919-924, (2021).

[2] Petrov V., *Progress in Quantum Electronics*, **42**, 1-106, (2015).

[3] Chen H. et al., *Coordination Chemistry Reviews*, **470**, 214706, (2022).

СВЕРХИЗЛУЧЕНИЕ И РЕЗОНАНСЫ ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЫ В ПРИСУТСТВИИ ПОПРАВКИ ЛОКАЛЬНОГО ПОЛЯ ЛОРЕНТЦ-ЛОРЕНЦА

Рыжов И.В.

ФГБОУ ВО РГПУ им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

Исследованы квазирезонаторные нелинейные оптические свойства сверхизлучения, возникающие в двухслойной среде, с учётом на поправку локального поля, допированной трехуровневыми Λ -излучателями в зависимости от фазового множителя, характеризующего расстояние между слоями.

Ключевые слова: сверхизлучение, двухслойная среда.

До момента, когда была присуждена Нобелевская премия по получению графена и исследованию его уникальных электрофизических свойств, двумерные кристаллы Браве служили физикам как некоторый вид перспективных объектов для теоретических исследований, например, [1]. В настоящее время эти исследования являются максимально востребованными в связи с развитием микро- и нанотехнологий синтеза двумерных (2D), квазидвумерных объектов с необычными электромагнитными свойствами, так называемые метаматериалы (см. обзор [2]), и двумерные метаматериалы с Ван-дер-Вальсовой сцепкой слоёв [3], а также их излучением в нетривиальных режимах (см. [4] и ссылки в ней).

В работе представлен момент квазирезонансного сверхизлучения в условии безынверсионного сверхизлучения симметрично приготовленных слоёв, с учётом локального поля Лорентц-Лоренца (рисунок).

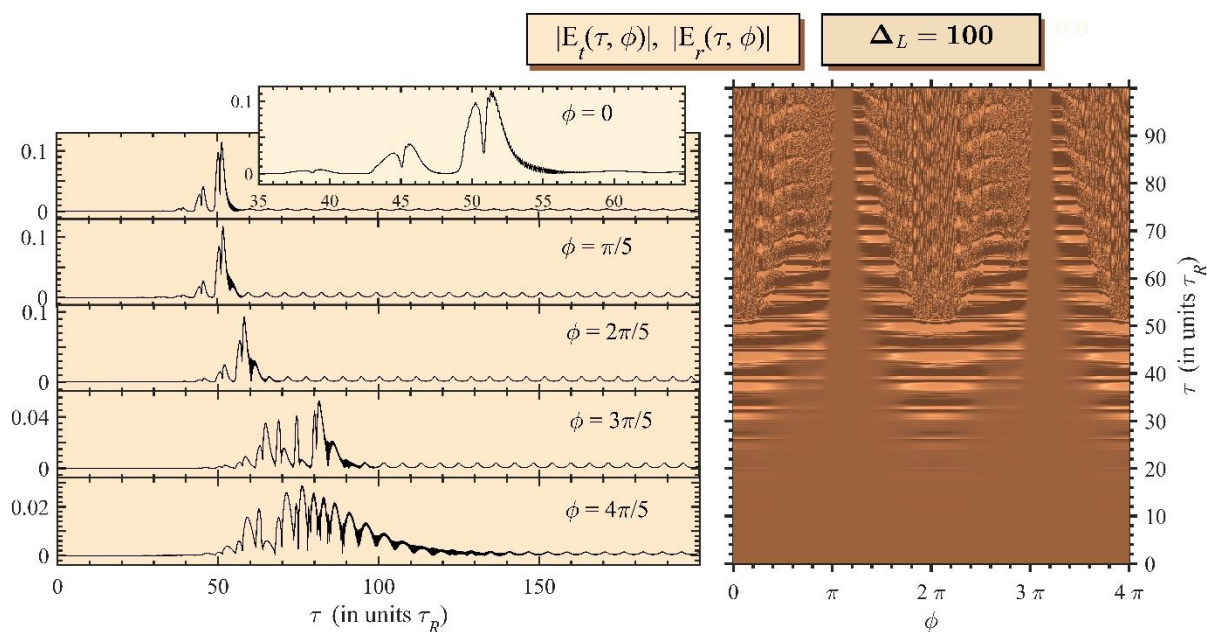


Рисунок. Правая панель: вид сверху поверхности интенсивности сверхизлучения вышедшего влево и вправо ($|E_t|, |E_r|$) двухслойной системы, ϕ – экспоненциальный множитель, характеризующий расстояния между слоями, Δ_L – величина локального поля [1]. На рисунке отчетливо видно, что генерируемые слоями поля находятся в резонанса при условии, если $\phi=2k\pi$, и вне резонанса, если $\phi=(2k+1)\pi$, $k=0,1,2,\dots$. Резонансные точки по ϕ являются локальными минимумами, что соответствует минимальному времени задержки импульсов сверхизлучения вышедшего из среды. Не резонансные (по ϕ) точками разрыва второго рода. Левая панель – срезы временных зависимостей полей от параметра ϕ в безынверсионном режиме ($\rho_{33}(0) = 0.2$)

В условиях безынверсионного сверхизлучения, при достаточно малой интенсивности света, данные источники могут, как альтернативные, быть использованы в медицине при должном подборе параметров излучающего света, его интенсивности и частотных характеристик.

Благодарим за поддержку Российский научный фонд: проект 22-19-00766.

[1] Malyshev V.A., Ryzhov I.V., Trifonov E.D., Zaitsev A.I., *Opt. Commun.*, **180** (1-3), 59-68, (2000).

[2] Soukoulis C.M., Wegener M., *Science*, **330**, 1633, (2010).

[3] Jariwala D., Marks T.J., Hersam M.C., *Nat. Mat.*, **16**, 170, (2017).

[4] Ryzhov I.V., Malikov R.F., Malyshev A.V., Malyshev V.A., *J. Opt.*, **23**, 115102, (2021).

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В
 ГАЗОНАПОЛНЕННОМ ВОЛОКНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
 КВАНТОВОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПИСАНИЮ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Врублевская Н.Р.¹, Шипило Д.Е.^{1,2}, Николаева И.А.^{1,2},

Панов Н.А.^{1,2}, Косарева О.Г.^{1,2}

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

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Самосогласованное моделирование распространения фемтосекундных лазерных импульсов в газонаполненном волокне с нелинейностью, полученной квантовомеханически, показало, что третья гармоника ультрафиолетового (УФ) импульса практически не демонстрирует эффектов фазового синхронизма в отличие от третьей гармоники инфракрасного (ИК) импульса.

Ключевые слова: квантовомеханический расчёт нелинейности, распространение фемтосекундных лазерных импульсов, оптические гармоники.

Для моделирования распространения фемтосекундных лазерных импульсов в газовых средах используется однонаправленное уравнение Максвелла [1]. Для описания нелинейных поляризации и тока, являющегося источником в уравнении распространения, обычно применяют *феноменологический* подход, основанный на представлении нелинейного отклика в виде суперпозиции тока электронов, освободившихся в актах многофотонной/туннельной ионизации, и нелинейной поляризации среды — отклика связанных электронов. Помимо феноменологического, существует квантовомеханический способ описания нелинейности [2], заключающийся в получении нелинейности из численного решения нестационарного уравнения Шрёдингера. В нашей недавней работе [3] проведено сравнение нелинейных откликов, наводимых в газовой среде невзаимодействующих атомов ксенона, полученных согласно феноменологическому и одномерному квантовомеханическому подходам и показано их хорошее согласие для ИК импульсов. Для УФ импульсов феноменологический и квантовомеханический подходы не согласуются даже в низкоинтенсивном пределе, наблюдается запаздывание нелинейной поляризации до четверти оптического периода относительно внешнего поля и асимметричное уширение её спектра в длинноволновую область.

Целью настоящей работы является самосогласованное моделирование распространения фемтосекундного лазерного импульса в газонаполненном волокне с нелинейностью, определяемой квантовомеханически [3] и сравнение нелинейного отклика газовой среды на ИК и УФ импульсы.

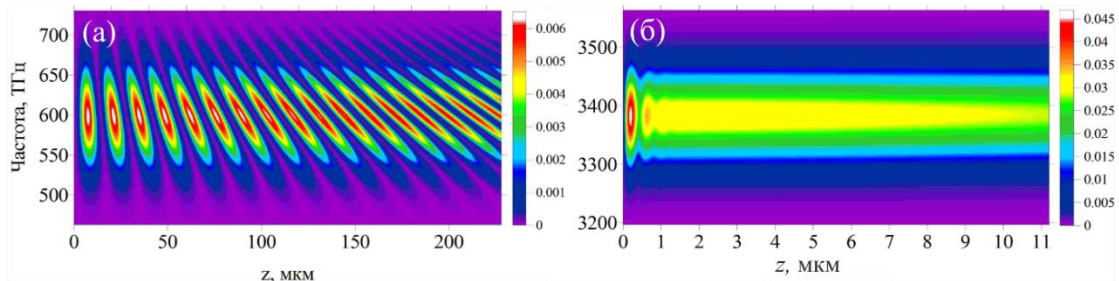


Рисунок. Эволюция спектра третьей гармоники при распространении ИК импульса ($\lambda = 1500$ нм) пиковой интенсивности $I_0 = 15$ ТВт/см² (а) и УФ импульса ($\lambda = 266$ нм) пиковой интенсивности $I_0 = 10$ ТВт/см² (б) в волокне, заполненном ксеноном с давлением $p = 100$ атм

Численное моделирование показало, что эволюция спектра третьей гармоники ИК импульсов [рис. (а)] при распространении воспроизводит как колебания спектральной интенсивности с расстоянием, так и характерный наклон полос на спектре, являющийся следствием эффекта фазового синхронизма для импульса малой длительности. Ранее иллюстрация этого эффекта была получена при численном моделировании распространения лазерных ИК импульсов с помощью феноменологической модели [4]. Распространение фемтосекундных импульсов УФ частотного диапазона [рис. (б)] приводит к качественно другой динамике спектра третьей гармоники: эффекты, связанные с фазовым синхронизмом, наблюдаются только на субмикронных расстояниях, после чего осцилляции прекращаются и происходит только затухание, связанное с поглощением в волокне.

Авторы благодарят РФФ (21-49-00023), Д.Е.Ш. – (СП-3450.2022.2), Н.Р.В. – “БАЗИС” (22-2-1-41-1).

[1] Husakou A.V., Herrmann J., *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 203901, (2001).

[2] Kolesik M., Brown J.M., Teleki A. et al., *Optica*, **1**, №5, 323, (2014).

[3] Врублевская Н.Р., Шипило Д.Е. и др., *Письма в ЖЭТФ*, **117**, №6, 400, (2023).

[4] Panov N.A., Shipilo D.E., Andreeva V.A. et al., *PRA*, **94**, 041801(R), (2016).

КОМПАКТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЕНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОДОБОТНОГО МИКРОРЕЗОНАТОРА

Ружицкая Д.Д.¹, Миньков К.Н.¹, Павлов В.И.²

¹Российский квантовый центр Московская область, Сколково, Россия

²ФГУП «ВНИИФТРИ», Московская область, Менделеево, Россия

В работе продемонстрирован компактный источник оптических частотных гребенок и микроволнового излучения, сгенерированные с помощью эффекта затягивания в маломощном лазерном диоде и оптического микрорезонатора с модами шепчущей галереи.

Ключевые слова: оптические частотные гребенки, оптические микрорезонаторы, моды шепчущей галереи.

В последние годы оптические частотные гребенки (ОЧГ) стали важным инструментом научных исследований и находят широкое применение в различных областях, включая спектроскопию, связь, ЛИДАры, астрофизические спектрометры и микроволновую генерацию [1-4]. Для генерации ОЧГ ранее использовались лазеры с синхронизацией мод, что ограничивало их область применения [5]. Большим прорывом для генерации ОЧГ оказалась обнаруженная возможность использования ультракомпактных оптических микрорезонаторов с модами шепчущей галереи (МрМШГ) [6]. МрМШГ обладают малым размером, высокой плотностью оптического поля и высокой добротностью, а полученные ОЧГ имеют область свободной дисперсии (ОСД) от единиц до сотен гигагерц и фиксированное расстояние между линиями благодаря фазовой синхронизации [6].

В представленной работе продемонстрирована генерация ОЧГ в МрМШГ на основе фторида магния. Для этого использовался компактный лазерный диод (ЛД) с распределенной обратной связью, который был стабилизирован тем же микрорезонатором в режиме затягивания. Впервые ОЧГ была сгенерирована при мощности 6 мВт и длине волны 1550 нм с использованием коммерчески доступного диода. Была также продемонстрирована генерация ОЧГ с разными интервалами между линиями и генерация микроволнового излучения.

Шаги для генерации ОЧГ в режиме затягивания включали мониторинг спектра мод МрМШГ, выбор настраиваемой моды и переход к режиму затягивания путем изменения тока ЛД. Характерная резонансная мода МрМШГ с состояниями, соответствующими различным состояниям оптической частотной гребенки показана на рисунке. Область (а) соответствует свободному излучению ЛД, область (б) представляет генерацию ОЧГ без образования солитонных состояний. Область (в) обозначает режим тепловой нелинейности, с последующим переходом к формированию солитонных гребенок и солитонных низкочастотных кристаллов.

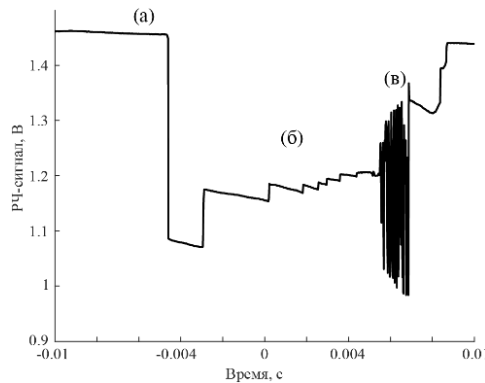


Рисунок. Отклик резонансной моды на осциллографе со ступенчатым переходом в солитонное состояние

В данном исследовании впервые было показано, что мощность накачки 6 мВт для высокодобротного МрМШГ достаточна для генерации различных ОЧГ: 12 ОСД, 4 ОСД и 1 ОСД. Полученные ОЧГ обладают фазовой синхронизацией между линиями и низким уровнем фазовых шумов. В зависимости от сгенерированного спектра можно получить соответствующую СВЧ-частоту от биений линий гребенки (155.28 ГГц, 51.76 ГГц, 12.94 ГГц, соответственно).

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 20-12-00344).

- [1] Riemensberger J., Lukashchuk A., Karpov M., et. al., *Nature*, **581**, 164-170, (2020).
- [2] Marin-Palomo P., Kemal J.N., Karpov M., et. al., *Nature*, **546**, 274-279, (2017).
- [3] Liu J., Lucas E., Raja A.S. et al., *Nat. Photonics*, **14**, 486-491, (2020).
- [4] Павлов В.И. и др., *Альманах современной метрологии*, **4(32)**, 18-26, (2022).
- [5] Zang H., Tang D.Y., Zhao L.M., Tam H.Y., *Opt. Lett.*, **33**, 2317-2319, (2008).
- [6] Kippenberg T.J., Gaeta A.L., Lipson M.L., Gorodetsky M.L., *Science*, **361**, eaan8083, (2018).

ПОЛЯРИТОННЫЕ МОДЫ СВЕРХИЗЛУЧАЮЩЕГО ЛАЗЕРА В ЗАПРЕЩЕННОЙ ФОТОННОЙ ЗОНЕ КОМБИНИРОВАННОГО РЕЗОНАТОРА ФАБРИ-ПЕРО С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ВОЛН

Кочаровский В.В., Мишин А.В., Кочаровская Е.Р.

ФИЦ ИПФ РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород, Россия

Исследованы поляритонные моды активной среды в комбинированном резонаторе Фабри-Перо с распределенной обратной связью волн. Показано, что эти моды, в отличие от электромагнитных мод, могут быть неустойчивыми в запрещенной фотонной зоне.

Ключевые слова: поляритонные моды, комбинированный резонатор, сверхизлучающий лазер.

Для сверхизлучающих лазеров (см., например, [1-3] и указанную там литературу), использующих низкодобротные резонаторы, в которых время жизни фотонов меньше времени фазовой релаксации двухуровневых активных центров, типичной является генерация не электромагнитных, а поляритонных мод. В последних энергия колебаний поляризации активной среды превалирует над энергией электромагнитного поля, самосогласованно возбуждаемого в резонаторе под действием непрерывной накачки. Для различных резонаторов спектр и декременты поляритонных мод изучались в случае отсутствия инверсии населенностей уровней, тогда как для активной среды с инверсной населенностью уровней даже в обычном комбинированном резонаторе Фабри-Перо с распределенной обратной связью (РОС) волн возможные частоты и инкременты поляритонных мод остаются мало исследованными.

В настоящей работе проведено детальное аналитическое и численное исследование свойств поляритонных мод для сверхизлучающего лазера с указанным низкодобротным комбинированным резонатором на основе найденных нами дисперсионного и характеристического уравнений, следующих из известных уравнений Максвелла-Блоха с соответствующими граничными условиями на торцевых зеркалах. Особое внимание уделено влиянию распределенной обратной связи встречных волн, изменение величины которой позволяет управлять частотами и инкрементами/декрементами поляритонных мод, в том числе внутри определяемой ей, так называемой запрещенной фотонной зоны, из которой электромагнитные моды вытесняются. Изучены также зависимости спектра и инкрементов поляритонных мод от величины инверсии населенностей уровней, задаваемой лазерной накачкой (рисунок).

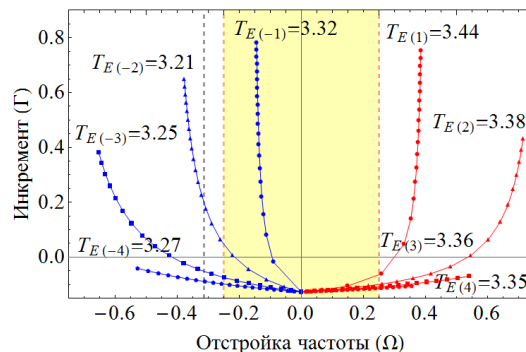


Рисунок. Рост инкрементов и отстроек частот мод от частоты лазерного перехода в зависимости от инверсии населенностей уровней этого перехода n_p , изменяемой от 0 до 1 с шагом 0.05, в симметричном комбинированном резонаторе. Параметры лазера: коэффициенты отражения зеркал $R=0.3$, фактор РОС $\beta=0.25$, время фазовой релаксации поляризации $T_2=8$, длина резонатора $L=4$. Величины нормированы согласно [2, 3]; в частности, времена жизни фотонов в резонаторе T_E и инкременты и отстройки частот мод нормированы на кооперативную частоту. Вертикальная желтая полоса - запрещенная фотонная зона

Установлены пороги генерации тех или иных поляритонных мод в зависимости от указанных выше и других параметров сверхизлучающего лазера. В частности, показано, что для широкой области параметров лазера возможна генерация одной или нескольких поляритонных мод в запрещенной фотонной зоне, а генерация электромагнитных мод достигается только вне этой зоны и лишь при более сильной накачке. Полученные результаты важны для анализа режимов генерации сверхизлучающих лазеров, как одномодовых, так и особенно многомодовых, допускающих различную автомодуляцию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания ИПФ РАН № FFUF-2023-0002.

[1] Железняков В.В., Кочаровский В.В., Кочаровский В.В., *УФН*, **159**, 193-260, (1989).

[2] Кочаровский В.В., Железняков В.В., Кочаровская Е.Р., Кочаровский В.В., *УФН*, **187**, №4, 367-410, (2017).

[3] Кочаровская Е.Р., Мишин А.В., Кочаровский В.В., Кочаровский В.В., *ФТП*, **56**, №7, 651-658, (2022).

**ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН
НА АСИММЕТРИЧНУЮ СВЕРХИЗЛУЧАТЕЛЬНУЮ ГЕНЕРАЦИЮ
В СИММЕТРИЧНОМ РЕЗОНАТОРЕ ФАБРИ-ПЕРО**

Кочаровская Е.Р., Кочаровский В.В.

ФИЦ ИПФ РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород, Россия

На основе численного решения уравнений Максвелла-Блоха исследована возможность управления асимметрией и автомодуляцией сверхизлучательной генерации в комбинированном резонаторе Фабри-Перо путем изменения резонансной частоты и амплитуды распределённой обратной связи встречных волн.

Ключевые слова: сверхизлучение, низкодобротный комбинированный резонатор.

В отличие от генерации традиционных лазеров, сверхизлучательная генерация [1-3] требуют использования низкодобротных резонаторов, в которых время жизни фотонов меньше времени фазовой релаксации двухуровневых активных центров. В типичном режиме работы таких лазеров при непрерывной накачке и значительном превышении порога генерации из обоих торцов симметричного резонатора Фабри-Перо излучаются одинаковые последовательности импульсов сверхизлучения. Однако в достаточно широкой области параметров резонатора и активной среды зеркальная симметрия и импульсный характер генерации могут смениться асимметричным автомодуляционным режимом (рис. а) [1-3], в котором интенсивности излучения из противоположных торцов отличаются во много раз. Это происходит благодаря формированию самосогласованной полуволновой решётки инверсии населённости активных центров встречными волнами сверхизлучательной поляритонной моды (рис. б).

Как было показано в [2], подобные режимы возможны в резонаторах Фабри-Перо (ФП) не только в отсутствие, но и при наличии распределённой обратной связи (РОС) встречных волн на полуволновой брэгговской структуре, созданной тем или иным способом, т.е. в комбинированном резонаторе ФП-РОС. Колеблющиеся во времени профили амплитуд встречных волн поля, поляризации и инверсии населённости активной среды зависят от двух периодических резонансных структур: распределённой по всему объёму (или поверхности) активной среды и сосредоточенной около одного из зеркал (рис. б). Это обстоятельство делает сверхизлучательную генерацию в резонаторе ФП-РОС метастабильной, склонной к спонтанному переключению от асимметричного автомодуляционного к симметричному импульсному режиму и обратно или к обычному симметричному режиму автомодуляции в отсутствие импульсов.

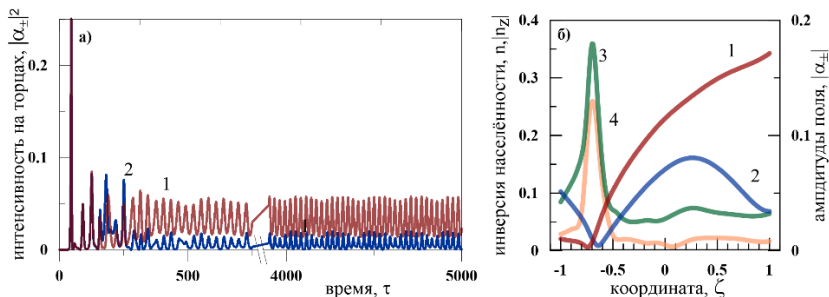


Рисунок. Спонтанное нарушение симметрии сверхизлучательной генерации лазера с симметричным резонатором ФП-РОС. а) Переходный процесс установления интенсивностей выходящего излучения на левом (1) и правом (2) торцах резонатора. б) Типичные профили амплитуд встречных волн поля $|\alpha_{\pm}|$ (1, 2), плавно неоднородной компоненты n и полуволновой решётки $|n_z|$ инверсии населённости (3, 4) в установившемся режиме асимметричной генерации. Параметры лазера: коэффициенты отражения зеркал $R=0.2$, фактор РОС $\beta=0.35$, скорости релаксации поляризации $\Gamma_2=0.02$ и инверсии населённости $\Gamma_1=0.01$, уровень накачки $n_p=1$, длина резонатора $L=2$. Используемые величины нормированы согласно [3]

В работе на основе численного решения как нелинейных, так и линеаризованных уравнений Максвелла-Блоха [1-3] показана возможность управления посредством РОС автомодуляцией и асимметрией излучения сверхизлучающего лазера, исследованы спектральные и динамические характеристики этого излучения и выявлены формирующие его моды симметричного низкодобротного резонатора ФП-РОС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки 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] Кочаровский Вл.В., Кукушкин В.А., Тарасов С.В., Кочаровская Е.Р., Кочаровский В.В., *ФТП*, **53**, №10, 1321-1328, (2019).

[3] Кочаровская Е.Р., Мишин А.В., Кочаровский Вл.В., Кочаровский В.В., *ФТП*, **56**, №7, 651-658, (2022).

УСИЛЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ ГАРМОНИК В ОПТИЧЕСКИ МОДУЛИРОВАННОЙ НЕОНОПОДОБНОЙ АКТИВНОЙ СРЕДЕ ПЛАЗМЕННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ЛАЗЕРА

Антонов В.А.¹, Хайрулин И.Р.¹, Рябикин М.Ю.^{1,2}

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Показана возможность усиления аттосекундных импульсов, образованных гармониками оптического поля высокого порядка произвольной поляризации, в оптически модулированной неонородной активной среде плазменного рентгеновского лазера. Показана возможность управления поляризационным состоянием усиливаемого излучения.

Ключевые слова: аттосекундные импульсы, эллиптическая поляризация, плазменные рентгеновские лазеры.

Генерация гармоник высокого порядка (ГГВП) лазерных полей в газах открыла возможность формирования аттосекундных импульсов электромагнитного излучения вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) и рентгеновского диапазонов. С их помощью стало возможным экспериментальное исследование и управление динамикой электронных процессов в атомах, молекулах и твердых телах на собственных временных масштабах с перспективами применения в материалоедении, квантовой химии и информационных технологиях. Как правило, излучение гармоник обладает линейной поляризацией. В то же время, использование ВУФ/рентгеновского излучения круговой или эллиптической поляризации открывает дополнительные возможности исследования магнитных и хиральных сред, обладающих свойством кругового дихроизма. Однако получить такое излучение при генерации гармоник непросто, прежде всего, по причине быстрого спада эффективности ГГВП с ростом эллиптичности лазерного поля фундаментальной частоты. В этой связи актуальными являются задачи (1) усиления гармоник эллиптической и циркулярной поляризации и (2) преобразования линейно поляризованного излучения гармоник в циркулярно поляризованное. Преобразование линейной поляризации в циркулярную было реализовано с использованием рентгеновской оптики [1], а усиление циркулярно поляризованного излучения одиночной высокой гармоники - достигнуто с использованием плазменного рентгеновского лазера (ПРЛ) [2]. Однако эффективность преобразования в [1] не превышает единицы процентов, тогда как узость линии усиления ПРЛ [2] не позволяет совместно усиливать гармоники разных порядков.

В недавней работе [3] нами была показана возможность усиления аттосекундных импульсов, образованных совокупностью высоких гармоник линейной поляризации, в водородоподобной активной среде ПРЛ, модулированной лазерным полем фундаментальной частоты. Под действием модулирующего поля в результате линейного эффекта Штарка спектр усиления среды обогащается линиями усиления, отстоящими от частоты резонанса на целое число частот модулирующего поля, что делает возможным совместное усиление гармоник разных порядков.

В данной работе обсуждаются результаты последующих работ [4] и [5], показавших возможность усиления совокупности гармоник произвольной поляризации и управления поляризацией усиливаемого излучения в оптически модулированной неонородной активной среде ПРЛ. Как показано в работе [4], в активной плазме неонородных ионов Ti^{12+} [6], модулированной лазерным полем среднего инфракрасного диапазона, возможно усиление фемто- и субфемтосекундных импульсов циркулярно поляризованного излучения с длиной волны в диапазоне 20-30 нм в десятки раз по энергии с приблизительно сохранением поляризации. Кроме того, показана возможность усиления импульсов высоких гармоник с одновременным увеличением их эллиптичности и, в частности, преобразованием эллиптической поляризации в циркулярную. В работе [5] также показана возможность преобразования линейно поляризованного излучения гармоник в циркулярно поляризованное с одновременным увеличением энергии излучения. Указанные результаты достигаются в результате (а) обогащения спектра усиления комбинационными частотами и (б) анизотропии активной среды ПРЛ, индуцированной сильным модулирующим полем линейной поляризации.

Работа поддержана НЦМУ "Центр фотоники" при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2020-906.

[1] Vodungbo B., Sardinha A.B., Gautier J. et al., *Opt. Express*, **19**, 4346, (2011).

[2] Depresseux A., Oliva E., Gautier J. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **115**, 083901, (2015).

[3] Antonov V.A., Han K.Ch., Akhmedzhanov T.R., Scully M., Kocharovskaya O., *Phys. Rev. Lett.*, **123**, 243903, (2019).

[4] Khairulin I.R., Antonov V.A., Ryabikin M.Yu., Berrill M.A., Shlyaptsev V.N., Rocca J.J., Kocharovskaya O., *Sci. Rep.*, **12**, 6204, (2022).

[5] Хайрулин И.Р., Антонов В.А., Рябикин М.Ю., *Письма в ЖЭТФ*, **117**, №9, 658-669, (2023).

[6] Alessi D., Luther B.M., Wang Y., Larotonda M.A., Berrill M., Rocca J.J., *Opt. Express*, **13**, 2093, (2005).

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

Дресвянский В.П., Мартынович Е.Ф.

Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

Предложена модель процессов лазерно-индуцированного дефектообразования в диэлектрических кристаллах, с учетом азимутальной анизотропии взаимодействия фемтосекундного излучения с кубическими кристаллами и локального нагрева материала в областях прохождения световых филаментов.

Ключевые слова: лазер, кристалл, дефект.

В работе будут представлены результаты комплексного исследования процессов генерации люминесцирующих дефектов в широкозонных кристаллических средах, с преимущественно экситонным механизмом дефектообразования, при их облучении фемтосекундным лазерным излучением ближнего ИК диапазона, энергия квантов которого примерно в десять раз меньше энергии межзонных переходов. В экспериментах был реализован режим взаимодействия света с образцом, соответствующий условиям низкоапертурной внешней фокусировки, при котором интенсивность уже достаточна для эффективного нелинейного поглощения света и возбуждения электронной подсистемы вещества, а энергия импульсов недостаточна для лазерного пробоя или иного разрушения образца. В данных условиях облучения самофокусировка и филаментация светового излучения играют доминирующую роль в процессах лазерно-индуцированного дефектообразования [1].

Для экспериментального изучения процессов лазерного дефектообразования в кристаллической среде применялась совокупность методик лазерной люминесцентной спектроскопии [2]. 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 [3].

Установлено, что азимутальные зависимости эффективности межзонной высоконелинейной фотоионизации и эффективности самофокусировки находятся в противофазе. Эти два процесса, нелинейная фотоионизация и самофокусировка, управляются двумя разными тензорами: тензором эффективной массы и тензором нелинейной восприимчивости третьего порядка, соответственно. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования и математическое моделирование показали, что азимутальная анизотропия взаимодействия интенсивного лазерного излучения с кристаллическими средами кубической сингонии сказывается на эффективности образования практически всех типов простых и агрегатных электронных центров окраски через два механизма. Во-первых, через управление величиной эффективной нелинейной восприимчивости третьего порядка, определяемой компонентами ее тензора, и контролирующей самофокусировку и величину ее критической интенсивности, и, во-вторых, через управление эффективной массой действующих носителей, участвующих в процессах высоконелинейной межзонной фотоионизации и образовании анионных экситонов, распадающихся затем на френкелевские пары, которые в ходе последующих процессов миграции, перезарядки и агрегации формируют стабильные люминесцирующие квантовые системы. В результате совместного действия этих двух факторов в схеме с нормальным падением лазерного луча на плоскость грани куба эффективность дефектообразования является периодической функцией азимутального угла, определяющего ориентацию электрического вектора E по отношению к направлению ребра куба с периодом $\pi/2$ и имеет максимумы при углах, равных $n\pi/4$, где $n = 1, 3, 5, \dots$ [3].

На основе полученных данных теоретических и экспериментальных исследований, на примере кристаллов фторида лития, была сформирована физическая модель процессов лазерно-индуцированного дефектообразования в диэлектрических кристаллах, включающая самофокусировку и филаментацию возбуждающего оптического излучения, нелинейную ионизацию вещества с генерацией электронно-дырочных пар и экситонов, распад экситонов на первичные френкелевские дефекты, их перезарядку, миграцию, агрегацию и нуклеацию, с учетом азимутальной анизотропии взаимодействия интенсивного лазерного излучения с кубическими кристаллами и локального нагрева материала в областях прохождения световых филаментов.

Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 года (№ проекта 0243-2021-0004).

[1] Martynovich E.F., Dresvyanskiy V.P., Kuznetsov A.V., Kuzakov A.S., Popov A.A., Alekseev S.V., Losev V.F., Ratakhin A.N., Bagayev S.N, *Laser Phys.*, **24**(7), 074001, (2014).

[2] Martynovich E.F., Chernova E.O., Dresvyanskiy V.P., Bugrov A.E., Kostryukov P.V., Konyashchenko A.V., *Opt. Laser Technol.*, **131**, 106430, (2020).

[3] Martynovich E.F., Dresvyanskiy V.P., Rakevich A.L., Lazareva N.L., Arsentieva M.A., Tyutrin A.A., Bukhtsoozh O., Enkhbat S., Kostryukov P.V., Perminov B.E., Konyashchenko A.V., *Appl. Phys. Lett.*, **114**(12), 121901, (2019).

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ФОТОДИОДЫ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ
НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ИНДИЯ**

**Пивоварова А.А., Куницына Е.В., Коновалов Г.Г., Слипченко С.О.,
Подоскин А.А., Андреев И.А., Пихтин Н.А., Ильинская Н.Д., Яковлев Ю.П.**

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Созданы неохлаждаемые InAs/InAsSbP быстродействующие фотодиоды для средней ИК области спектра. Достигнуто быстродействие $\tau=1-3$ нс для каплевидной конструкции и $\tau=250-400$ пс для мостиковой конструкции фотодиодов.

Ключевые слова: InAs/InAsSbP фотодиоды, быстродействие, конструкция.

В последние годы быстрое развитие науки и техники в области создания полупроводниковых лазеров [1, 2] и современных систем на их основе требует разработки быстродействующих фотодиодов для средней ИК области спектра. Быстродействие фотодиода зависит от емкости, которую возможно снизить за счет уменьшения площади р-п – перехода и, соответственно, фоточувствительной площадки. При диаметрах площадки 500 мкм – 2 мм используется круглая мезоструктура с кольцевым контактом, а при уменьшении диаметра до 300-100 мкм переходят к каплевидной форме мезоструктуры с точечным контактом. Однако использование каплевидной конструкции для мезоструктур с диаметром менее 100 мкм невозможно, так как доля фоточувствительной площадки, затеняемая контактом, становится сопоставима с активной площадью, что негативно отражается на обнаружительной способности фотодиода и вносит большой вклад в общую емкость прибора. При дальнейшем уменьшении размеров фоточувствительной площадки было предложено использовать мостиковую Air Bridge конструкцию фотодиодов, в которой контактная площадка вынесена за пределы фоточувствительной мезы на отдельную опорную [3].

В работе два типа фотодиодов - каплевидной и мостиковой конструкции, были созданы на основе двойных InAs/InAsSbP гетероструктур, выращенных методом ЖФЭ на подложке р-InAs с ориентацией (100). Активная область n-InAs, толщиной 1.0 мкм, располагалась между слоями р-InAsSbP и n-InAsSbP с содержанием фосфора 0.40. Ширина запрещенной зоны широкозонных слоев составляла $E_g = 0.57$ эВ при $T = 300$ К. Активная область n-InAs не легировалась, слой р-InAsSbP легировался оловом, n-InAsSbP – цинком. Фотодиоды на основе выращенных гетероструктур создавались методами фотолитографии, жидкостного химического травления, высоковакуумного напыления и электрохимического осаждения металлических покрытий.

Фотодиоды каплевидной конструкции имели мезу диаметром 100 мкм с фронтальным точечным и сплошным тыльным контактами. Диаметр фоточувствительной мезы мостиковых фотодиодов составлял около 50 мкм, при этом контактная площадка размером 100x100 мкм была выведена на опорную изолированную диэлектриком мезу. Воздушный металлический мостик, соединяющий фоточувствительную и опорную мезы, имел толщину около 3 мкм.

Проведено исследование быстродействия InAs/InAsSbP фотодиодов на длине волны 1.55 мкм с помощью InP/InGaAsP лазера. Осциллограммы фотоотклика исследуемых приборов при засветке импульсным лазерным излучением показали, что быстродействие каплевидных фотодиодов составляет $\tau=1-3$ нс, в то время как для мостиковых фотодиодов были достигнуты значения $\tau=250-400$ пс. Таким образом, созданные быстродействующие фотодиоды могут найти применение в системах волоконно – оптической связи, лазерной дальнометрии и локации, а также других направлениях науки и техники, требующих регистрации коротких лазерных импульсов.

[1] Tournie E., Baranov A.N., *Semiconductors and Semimetals*, **86**, 183–226, (2012).

[2] Mawst L.J., Botez D., *IEEE Photonics Journal*, **14**, №1, 1508025–24, (2022).

[3] Андреев И.А., Серебренникова О.Ю., Соколовский Г.С., Дюделев В.В., Ильинская Н.Д., Коновалов Г.Г., Куницына Е.В., Яковлев Ю.П., *ФТП*, **47**, 1009-1115, (2013).

НОВЫЕ ЗАКОНЫ ДИФФУЗНОГО РАССЕЯНИЯ ВОЛНЫ РЭЛЕЯ И
НАРУШЕНИЕ ЗАКОНА ЛАУЭ-БРЭГГА-ВУЛЬФА

Чуков В.Н.

ИБХФ им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва, Россия

Получены новые законы рассеяния поверхностной акустической волны Рэлея на решётке разрывов шероховатости изотропного твёрдого тела, нарушающие условия дифракции Лауэ и закон отражения Брэгга-Вульфа. В их рамках дано объяснение саббрэггговского рассеяния.

Ключевые слова: саббрэггговское рассеяние, псевдобрэггговская решётка, волна Рэлея.

Задача рассеяния поверхностной акустической волны Рэлея [1] на детерминированной цилиндрически симметричной шероховатости изотропного твёрдого тела, содержащей произвольную решётку разрывов, решена в приближении Рэлея-Борна теории возмущений по амплитуде шероховатости для диффузного предела, когда длина волны много меньше разности координат любых разрывов шероховатости. Получены новые законы зависимости индикатрисы рассеяния от отношения длины волны к радиусу шероховатого участка и угла рассеяния. Рассмотрено классическое рассеяние, описываемое условиями дифракции Лауэ и законом отражения Брэгга-Вульфа (закон Лауэ-Брэгга-Вульфа) [2], на периодической решётке разрывов шероховатости. Обнаружено, что цилиндрическая симметрия влияет на положение резонансов Лауэ-Брэгга-Вульфа. Они "танцуют" вокруг значения произведения размера элементарной ячейки и абсолютного значения волнового вектора, переданного при рассеянии от падающей рассеянной волне, определяемого законом Лауэ-Брэгга-Вульфа, в зависимости от конфигурации элементарной ячейки и стремятся к нему, когда число элементарных ячеек стремится к бесконечности. Получено, что индикатриса рассеяния осциллирует между резонансами Лауэ-Брэгга-Вульфа. Частота этих обобщённых осцилляций Лауэ-Брэгга-Вульфа как функция произведения переданного волнового вектора и размера элементарной ячейки решётки зависит от числа элементарных ячеек и их конфигурации в отличие от классических резонансов Лауэ-Брэгга-Вульфа. Получены новые законы высокочастотного, т.е., диффузного, рассеяния. В частности, обнаружено явление сильной зависимости индикатрисы рассеяния от амплитудного форм-фактора решётки разрывов, не рассматриваемого ранее в литературе [2 – 6]. Данный форм-фактор есть зависимость разности левого и правого предельных значений шероховатости в точке разрыва, т.е., его амплитуды, от номера разрыва в произвольной, в общем случае непериодической, решётке [7, 8]. Это явление может нарушать классический закон рассеяния Лауэ-Брэгга-Вульфа. Кроме этого, полученные законы модулируют амплитуду резонансов Лауэ-Брэгга-Вульфа как функцию параметра Брэгга (Лауэ-Брэгга-Вульфа), а также приводят к её увеличению или уменьшению в зависимости от увеличения числа элементарных ячеек и их структуры. Получено явление бифуркации (раздвоения) классических резонансов Лауэ-Брэгга-Вульфа, обусловленное осцилляциями разного масштаба амплитудного форм-фактора периодической решётки, нарушающее закон Лауэ-Брэгга-Вульфа. Теоретически сконструирована непериодическая псевдобрэггговская решётка разрывов, имеющая разные расстояния между узлами, которая даёт точно спектр рассеяния Лауэ-Брэгга-Вульфа на периодической решётке в конечной произвольной области значений произведения переданного волнового вектора и размера элементарной ячейки. Таким образом, классическая задача рассеяния волны Рэлея на произвольной, в общем случае непериодической, решётке разрывов шероховатости решена теоретически полностью из первых принципов динамической теории твёрдого тела впервые после открытия законов М. Лауэ, У.Л. Брэгга, Г.В. Вульфа, которые решили задачу рассеяния волн феноменологически без учёта амплитудного форм-фактора решётки. Полученное теоретическое решение даёт полное объяснение известного в литературе [4] саббрэггговского рассеяния, т.е., максимального рассеяния волн на периодической решётке вне закона Лауэ-Брэгга-Вульфа, из первых принципов теоретической физики.

Работа выполнена в рамках Госзадания НИОКТР № 122041400112-8, код темы FFZR-2022-0012.

[1] Lord Rayleigh, *The theory of sound*, vols. I, II. New York: Dover, (1945).

[2] Bijvoet J.M., Burgers W.G., Hagg G. (Eds.), *Early Papers on Diffraction of X-Rays by Crystals*, Vol. I, Springer, (1969); Vol. II, Springer, (1972).

[3] Alferov Zh.I., Goryachev D.N., Gurevich S.A., Mizerov M.N., Portnoi E.L., Ryvkin B.S., *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **21**, 857, (1976).

[4] Spikhalskii A.A., *Optics Communications*, **57**, 84, (1986).

[5] Robinson I.K., Tweet D.J., *Rep. Prog. Phys.*, **55**, 599, (1992).

[6] Deymier P.A., *Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals*, Springer, (2013).

[7] Chukov V.N. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2103**, 012157, (2021).

[8] Чуков В.Н. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, **16 (1.2)**, 557, (2023).

ESTIMATION OF PLASMA PROPERTIES IN LIQUID JETS VIA REFLECTION DYNAMICS

Hilal S., Ismagilov A.O., Tsyupkin A.N., Melnik M.V.

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Plasma properties in liquid jets (water, ethanol, isopropyl) are assessed through time-resolved experiments and Keldysh theory. Results align with plasma-based THz generation, highlighting plasma's vital role.

Keywords: Plasma formation, Liquid jet, Third harmonic reflection.

The study of laser-induced plasma in liquid jets encompasses various aspects of plasma science, dynamics, and properties. It is an important area of research, particularly in relation to terahertz (THz) generation. To improve the efficiency of THz generation, further investigations and research in this field are required [1].

THz radiation generation by laser-induced plasma is typically outlined by quasi-free electron density dynamics [2]. Analyzing plasma density becomes crucial for different experimental geometries as THz wave generation exhibits diverse characteristics [3]. In [4] a method is presented that estimates plasma density using reflected radiation during double-pulse excitation of a liquid jet.

This work presents a time-resolved experimental investigation into the formation of plasma in liquid jets of water, ethanol, and isopropyl. The study focuses on analyzing the dynamics of the third harmonic (TH) reflected from the surface of the induced plasma. The experimental setup is designed to position the plane of the liquid jet at the center of the filamentation region, where the highest reflection dynamics are observed. Furthermore, by allowing the rotation of the jet with respect to the laser pulse propagation direction, the angular dependence of third-harmonic reflection can be measured.

Figure illustrates the relationship between the intensity of third harmonic reflection and the time delay between the double pump pulses in liquid jets of water, ethanol, and isopropyl. The plasma properties like reflectivity, density, and frequency for these liquids are determined through both experimental measurements and theoretical analysis using Keldysh theory.

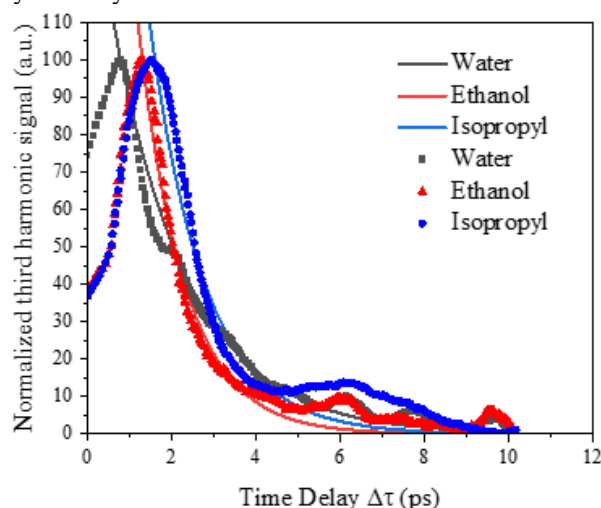


Figure. Dependencies of the dynamics of reflection of the third harmonic (265 nm) on the induced plasma in water, ethanol and isopropyl, as a function of the time delay between the double pump pulses, with the normalized exponential fitting curves, at a fixed energy of 300 μ J and pulse duration of 150 fs

A comparison of the obtained data on third harmonic reflection and THz radiation reveals a significant correlation with the findings of THz radiation generation efficiency reported in [3]. These findings provide insights into previously reported data on plasma-based THz radiation sources [3], contributing to a deeper comprehension of plasma formation in liquid jets as a source of THz radiation.

This work was supported by the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (Passport No. 2019-0903).

- [1] Jin Q., Williams K., Dai J. and Zhang X.C., *Applied Physics Letters*, **111**, pp. 071103, (2017).
- [2] Ponomareva E.A., Stumpf S.A., Tsyupkin A.N., Kozlov S.A., *Optics Letters*, **44**, pp. 5485-5488, (2019).
- [3] Yiwen E., Jin Q., Tsyupkin A., Zhang X.C., *Applied Physics Letters*, **113**, pp. 181103, (2018).
- [4] Ponomareva E., Ismagilov A., Putilin S., and Tsyupkin A.N., *APL Photonics*, **6**, pp. 126101, (2021).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ПУТЕМ РАЗЛОЖЕНИЯ ПО ТЕПЛОВЫМ МОДАМ

Павлов В.И.¹, Кондратьев Н.М.², Шитиков А.Е.³, Лобанов В.Е.³

¹ФГУП «ВНИИФТРИ», Московская область, Менделеево, Россия

²Инновационный институт технологий, Абу-Даби, Объединенные Арабские Эмираты

³Российский квантовый центр, Москва, Сколково, Россия

Мы сравнили различные методы определения эффективных тепловых параметров для различных резонаторных структур: микрокольцевого и микротороидального резонатора. В результате мы предлагаем оригинальный и эффективный метод определения эффективных тепловых параметров микрорезонаторов, основанный на разложении по тепловым модам, учитывающий различные процессы тепловой релаксации. Предложенный метод лучше согласуется как с прямым численным моделированием, так и с известными теоретическими формулами во всем диапазоне параметров микрорезонатора, в отличие от классического подхода.

Ключевые слова: тепловые моды, микрорезонатор, терморефракция.

Расчет тепловых сдвигов, вызванных поглощением мощности лазерного излучения, чрезвычайно важен для учета влияния тепловых эффектов в микрорезонаторах на динамику процессов генерации оптических частотных гребенок [1] и темных солитонов [2]. Одним из способов расчета тепловых сдвигов частоты является использование скоростных уравнений с эффективными параметрами. В нашей работе мы рассчитали эффективные параметры путем аппроксимации численного решения трехмерного уравнения теплопроводности в микрорезонаторе, накачиваемом «ступенчатой» мощностью, эмпирической экспонентой, и обнаружили, что качество аппроксимации зависит от геометрических и материальных параметров микрорезонатора.

В отличие от классического подхода с одним скоростным уравнением, мы использовали сумму скоростных уравнений для более детального описания тепловых процессов в микрорезонаторах. Мы сравнили эффективные параметры, полученными с использованием аналитических формул, [3] с результатами моделирования двумя методами (см. рисунок). В первом методе эффективные параметры получались с помощью аппроксимации динамики температуры различным числом скоростных уравнений. Во втором методе рассчитывался интеграл перекрытия между формами тепловых мод и формой теплового источника (звездочки, рисунок). С увеличением отношения теплопроводности волновода эффективная тепловая релаксация для случая двух скоростных уравнений (круги, рисунок) разделяется на две ветви эффективной релаксации. При этом ветвь быстрой эффективной релаксации близка к значениям, полученным с использованием максимума интеграла.

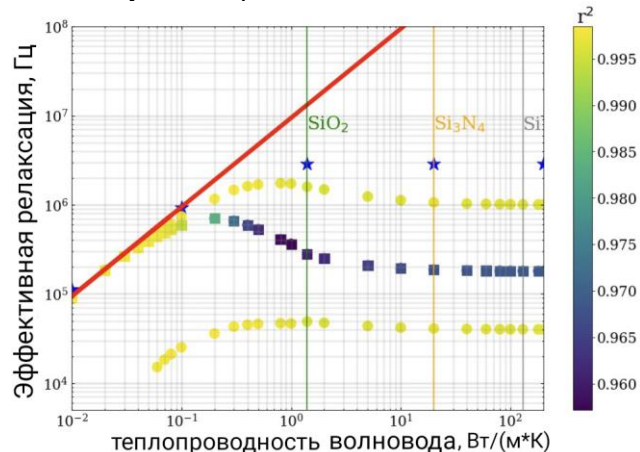


Рисунок. Сравнение методов расчета эффективных параметров: красная линия – теория [3], квадраты – одна экспонента, круги – две экспоненты, звездочки – максимум интеграла перекрытия

В результате были рассчитаны эффективные тепловые параметры микрокольца и микротороида с помощью разложения по тепловым модам и проведено сравнение с аналитическими формулами.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант 22-22-00872).

[1] Kobatake T., Kato T., Ito H., Nakagawa Y. and Tanabe T., *IEEE Photonics Journal*, **8(2)**, 1-9, (2016).

[2] Lobanov V.E., Kondratiev N.M., Bilenko I.A., *Opt. Lett.*, **46**, 2380-2383, (2021).

[3] Fomin A.E., Gorodetsky M.L., Grudinin I.S., Ilchenko V.S., *J. Opt. Soc. Am. B*, **22**, 459–465, (2005).

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ РЕШЕТОК В ПРОЦЕССЕ
ЛАЗЕРНОГО МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЯ В ОБЪЕМЕ
ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

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

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

²Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

Исследован процесс формирования и эволюции плазменной периодической структуры в образце плавленого кварца в направлении распространения сфокусированного лазерного импульса. Коэффициенты многофотонной ионизации образца для исследуемых длин волн были определены из эксперимента

Ключевые слова: плазменные решетки, микроstructuring диэлектриков.

Фемтосекундная лазерная запись двулучепреломляющих субволновых нанорешеток в объеме диэлектриков исследуется уже почти два десятилетия [1], поскольку обнаруживает целый ряд применений в качестве ключевых элементов поляризационных оптических устройств памяти, оптических волноводов, микрожидкостных каналов сложных морфологий и др [2, 3]. Несмотря на большое количество экспериментальных работ в этой области, технический прогресс методов прямой лазерной записи нано- и микроструктур в диэлектриках в основном идет экстенсивно, без ясного понимания фундаментальной физической картины взаимосвязей полевых, плазменных и материальных подсистем. В работе проведено теоретическое исследование процесса формирования и эволюции плазменной периодической структуры в образце плавленого кварца в направлении распространения сфокусированного лазерного импульса. Ключевые параметры для описания взаимодействия излучения с веществом, а именно – коэффициенты многофотонной ионизации образца для исследуемых длин волн, были определены из эксперимента [4].

В рамках моделирования была рассмотрена задача распространения излучения сфокусированного импульса субпикосекундной длительности и длиной волны 515 и 1030 нм в плавленом кварце совместно с уравнением для динамики рождения электронов. В одномерном приближении фокусировка пучка учитывалась посредством введения геометрического фактора. Показано, что сфокусированный пучок формирует слой электронов со сверхкритической концентрацией, при отражении от которого возникает стоячая волна, в пучностях которой идет эффективная ионизация. Это ведет к формированию плазменной решетки с периодом, равным периоду стоячей волны в среде $\lambda/2n'$ (λ – длина волны лазерного излучения, n' – реальная часть показателя преломления, которая определяется параметрами формирующейся плазмы) (см. рисунок), что согласуется с ранее полученными экспериментальными данными по микроstructuring в твердых диэлектриках [5].

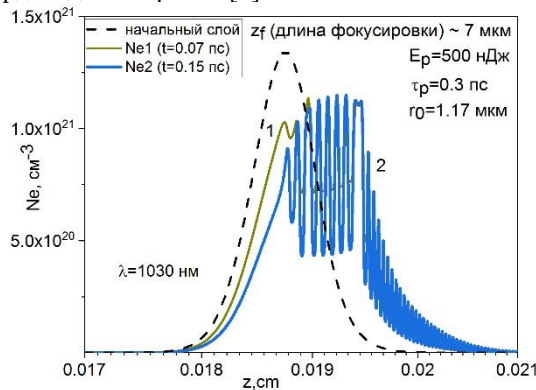


Рисунок. Профиль концентрации плазменной решетки, формирующейся в результате отражения волны от фокального плазменного слоя (пунктирная кривая) в различные моменты времени для длины волны 1030 нм. Параметры фокусирующего излучения (энергия E_p , длительность, размер пятна фокусировки r_0) указаны на рисунке

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-72-10076).

- [1] Shimotsuma Y., Kazansky P. G., Qiu J., Hirao K., *Phys. Rev. Lett.*, **91**, №24, 247405, (2003).
 [2] Sakakura M., Lei Y., Wang L., Yu Y. H., Kazansky P. G., *Light Sci. Appl.*, **9**, 15, (2020).
 [3] Lin Z., Xu J., Song Y., Li, X., Wang, P., Chu, W., Wang, Z., Cheng, Y., *Adv. Mater. Technol.*, **5**, 1900989, (2019).
 [4] Bogatskaya A., Gulina Y., Smirnov N., Gritsenko I., Kudryashov S., Popov A., *Photonics*, **10**, №5, 515, (2023).
 [5] Kudryashov S., Rupasov A., Kosobokov M., Akhmatkhanov A., Krasin G., Danilov P., Lisjikh B., Abramov A., Greshnyakov E., Kuzmin E., Kovalev M., Shur V., *Nanomaterials*, **12**, №23, 4303, (2022).

ФИЗИКА НАНОСТРУКТУР

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ДВУХУРОВНЕВОЙ ДИССИПАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НАЛИЧИИ ОСЦИЛЛЯЦИЙ РАБИ

Иванов А.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассматривается взаимодействие квантовой системы, имеющей дискретный электронный энергетический спектр и колебательную подсистему, с интенсивным оптическим излучением в условиях реализации эффекта Отлера-Таунса. Показано, что в рассматриваемых условиях взаимодействия происходит не только перестройка электронного спектра (расщепление уровней), но и перестройка колебательного спектра квантовой системы, появляется вынужденная колебательная мода на частоте Раби, которая приводит к смешиванию электронных состояний, возникновению вибронной связи и перераспределению электронной плотности между энергетическими уровнями. Кроме того, появление новой колебательной моды оказывает влияние на взаимодействие квантовой системы с колебательным резервуаром.

Ключевые слова: динамика квантовой системы, эффект Отлера-Таунса, вибронная связь.

Типичным примером диссипативной системы (ДСУ) с дискретным энергетическим спектром является полупроводниковая квантовая точка (КТ), которая широко используется в различных приложениях квантовой оптики, наноэлектроники и квантовой информатике. Особенности физических систем на основе КТ в конечном счете зависят от динамики электронных состояний КТ, определяемой взаимодействием между электронной подсистемой и колебательным резервуаром.

Характерными чертами эффекта Отлера-Таунса [1] являются рабиевские осцилляции электронной плотности и расщепление электронных уровней в системе (рисунок). Поскольку равновесные положения атомов резервуара диссипативной системы в основном и возбужденном электронных состояниях различаются, колебания электронной плотности под действием интенсивного оптического излучения приводят к возникновению новой колебательной моды резервуара с частотой Раби [2]. Частота возникшей колебательной моды резонансна разности энергий между расщепленными электронными состояниями системы, что приводит к возникновению вибронной связи [3] в рассматриваемой диссипативной системе. Таким образом, для описания динамики электронных состояний необходимо учитывать образующуюся связь между двухуровневой системой и колебательным резервуаром, которая зависит от параметров оптического излучения, действующего на систему.

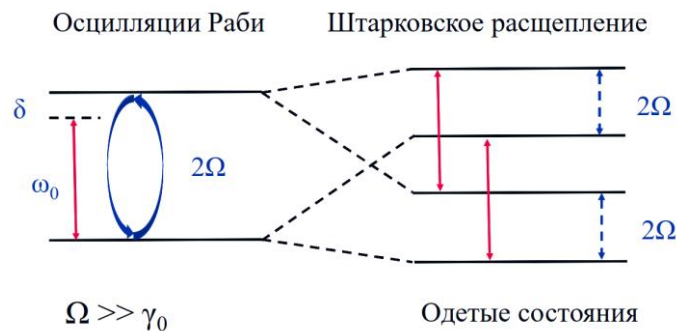


Рисунок. Рабиевские осцилляции электронной плотности и расщепление электронных уровней в двухуровневой системе

В настоящей работе описывается динамика двухуровневой диссипативной системы с помощью основного уравнения в форме Линдблада для матрицы плотности, рассматривается взаимодействие системы и резервуара при наличии режима вынужденных колебаний, определяется скорость распада между одетыми состояниями системы, а также описывается перенос энергии между системой и колебательным резервуаром, управляемый параметрами излучения.

Следует отметить, что постоянная распада между одетыми состояниями двухуровневой диссипативной системы в присутствии интенсивного оптического излучения зависит от интенсивности и частоты излучения. Кроме того, появление вынужденной колебательной моды и возникновение вибронной связи существенным образом влияет на динамику электронных состояний, что необходимо учитывать при рассмотрении реальных физических систем на основе КТ.

[1] Autler S.H., Townes C.H., *Phys. Rev.*, **100**, №2, 703-722, (1955).

[2] Ivanov A., *J. Opt. Soc. Am. B*, **35**, 20-29, (2018).

[3] Берсукер И.Б., Полингер В.З. Вибронные взаимодействия в молекулах и кристаллах, М.: Наука, 1983. – 336 с.

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЫ В НАНОТРУБКАХ НА ОСНОВЕ
ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Казанов Д.Р., Пошакинский А.В., Шубина Т.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Изменение степени сплющивания поперечного сечения нанотрубки и его поворот относительно падающего света открывает возможность наблюдения дисперсии невырожденных оптических мод шепчущей галереи и сильной связи с экситонным резонансом.

Ключевые слова: сплюснутые нанотрубки, моды шепчущей галереи, сильное взаимодействие.

Синтезированные нанотрубки на основе дихалькогенидов переходных металлов таких как MoS_2 являются перспективными кандидатами для нанофотонных применений. Они одновременно являются излучателями яркой фотолюминесценции (ФЛ) за счет существования сильных экситонных резонансов и проявляют себя как оптические резонаторы с модами шепчущей галереи (МШГ), поляризованными вдоль оси нанотрубки. Идеальные нанотрубки цилиндрической симметрии обладают двукратно вырожденными МШГ вблизи как прямого, так и непрямого экситонных резонансов, причем энергия оптических мод напрямую зависит от геометрических параметров, таких как диаметр и толщина стенок трубок [1, 2].

Сплющивание и поворот сечения вдоль оси нанотрубки приводит к формированию особого класса скрученных трубок, в которых снимается вырождение МШГ. Расщепленные моды сдвигаются в противоположные стороны (пунктир на рисунке для моды с $m=10$ без учета сильного взаимодействия). Величина энергетического сдвига каждой моды зависит от сплюснутости поперечного сечения, которое меняется вдоль оси «дышащих» нанотрубок. При этом изменяется степень перекрытия электромагнитных полей, возбуждаемых в противоположных сторонах сечения [3]. Пересечение энергии оптической моды с экситонным резонансом способно привести к эффекту сильного взаимодействия с формированием экситон-поляритонов (рисунок, мода с $m=11$), расщепление Раби которых может достигать десятки мэВ.

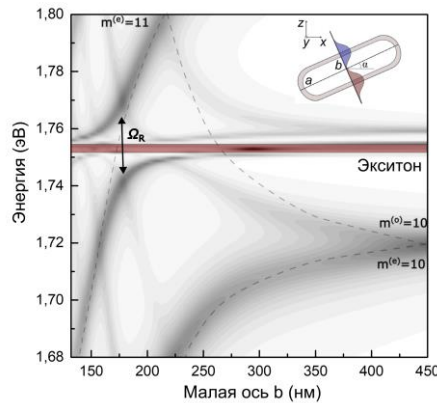


Рисунок. Расщепленные оптические моды вблизи экситонного резонанса в нанотрубке с периметром 3.8 мкм и изменяющимся размером малой оси поперечного сечения. Расчет выполнен с учетом сильного взаимодействия с экситонным резонансом ($m=11$) и без него ($m=10$)

Для расчета спектров ФЛ скрученных нанотрубок мы построили модель с использованием принципа взаимности Лоренца и решили обратную задачу рассеяния (1) падающей плоской волны на нанотрубку в зависимости от степени сплюснутости и положения сечения трубки по отношению к падающему свету. Поворот сечения скрученной трубки радиуса R с частотой ω на угол α влияет на степень возбуждения расщепленных четных и нечетных мод МШГ с угловым номером m в противофазе как

$$|E^{(e,o)}|^2 \sim J_m^2\left(\frac{\omega R}{c}\right) \begin{cases} \cos^2\left[m\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right)\right] \\ \sin^2\left[m\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right)\right] \end{cases} \quad (1)$$

где $E^{(e,o)}$ – электрическое поле четных и нечетных мод МШГ; J_m – функция Бесселя; c – скорость света.

Работа была выполнена при частичной поддержке стипендии Президента РФ СП-5068.2022.5.

[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] Shubina T.V., Remskar M, Davydov V. Yu., Belyaev K.G., Toropov A.A., and Gil B., *Ann. Phys.*, **531**, 1800415, (2019).

[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.*, 2202782, (2023).

**СИНТЕЗ, СТРУКТУРНЫЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА CVD
АЛМАЗНЫХ НАНОЧАСТИЦ С ЦЕНТРАМИ ОКРАСКИ**
Грудинкин С.А.^{1,2}, Богданов К.В.¹, Баранов М.А.¹, Голубев В.Г.², Баранов А.В.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Методом химического газофазного осаждения (CVD) синтезированы алмазные наночастицы с центрами окраски германий-вакансия, кремний-вакансия и вольфрамовый комплекс. Исследовано влияние параметров CVD процесса на структурные и люминесцентные свойства синтезированных наночастиц.

Ключевые слова: алмаз, центры окраски, химическое газофазное осаждение.

Оптически активные центры окраски в наноалмазных частицах, представляющие собой примесно-вакансионные комплексы в алмазной решётке, являются перспективными эмиттерами для таких областей применения как квантовая информатика, биомедицина, нанотермометрия. Среди большого количества оптических центров в алмазе большой интерес вызывают центры окраски, включающие междоузельный атом Si или Ge и две ближайшие вакансии (V) в соседних узлах решётки (SiV и GeV). Интегральная интенсивность фотолюминесценции этих центров, находящихся в отрицательном зарядовом состоянии, сосредоточена в основном в одной узкой интенсивной бесфононной линии (с максимумами на длинах волн 602 нм для GeV и 738 нм для SiV), также центры демонстрируют высокую фотостабильность. Для визуализации биологических процессов перспективен оптический центр, в состав которого входит атом вольфрама (W – комплекс), характеризующийся широкой полосой люминесценции, состоящей из нескольких перекрывающихся полос в диапазоне длин волн 715-740 нм. Спектральные положения полос SiV центра и W – комплекс находятся в окне прозрачности биологических тканей.

В работе алмазные наночастицы с центрами окраски SiV, GeV и W – комплекса синтезированы методом химического газофазного осаждения с горячей нитью (HFCVD) из водородно-метановой смеси (рис. а) [1, 2]. Легирование наночастиц атомами Si, Ge и W проводилось в процессе HFCVD роста из твёрдотельных источников. Спектры микрофотолюминесценции записывались с отдельной частицы в диапазоне температур от 80 до 300 К. В спектрах фотолюминесценции синтезированных алмазных наночастиц наблюдались полосы фотолюминесценции SiV, GeV и W – комплекса, интенсивности которых зависели от параметров HFCVD процесса (рис. б). Исследованы особенности спектра бесфононной линии фотолюминесценции ансамбля центров окраски GeV в алмазных наночастицах. Изучено влияния температуры подложки, состава газовой смеси, времени роста на фазовый состав, морфологию, абсолютную и относительную интенсивности фотолюминесценции центров окраски, что позволяет путём варьирования параметров HFCVD процесса достигать заданных параметров люминесцентных откликов GeV и SiV-центров окраски, W – комплекса.

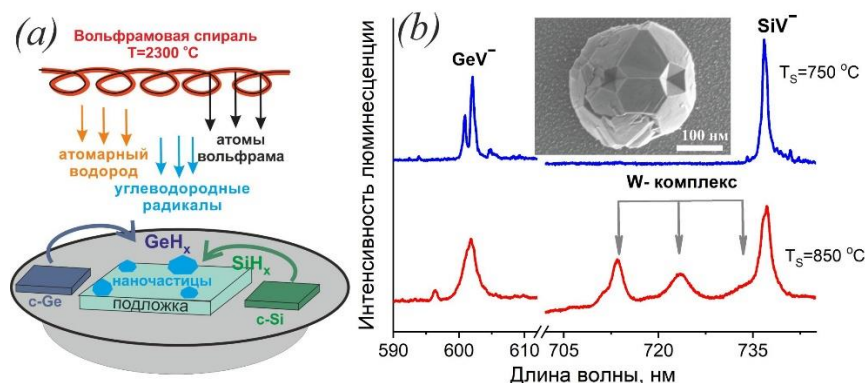


Рисунок. (а) Принципиальная схема метода HFCVD; (б) Спектры фотолюминесценции алмазных наночастиц, полученных при температурах подложки 750 °С и 850 °С. Спектры зарегистрированы при T=80 К. На вставке представлено изображение алмазной наночастицы

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда грант № 21-12-00264.

[1] Grudinkin S.A., Feoktistov N.A., Bogdanov K.V., Baranov M.A., Golubev V.G., Baranov A.V., *Nanomaterials*, **11**, №11, 2814, (2021).

[2] Bogdanov K.V., Baranov M.A., Feoktistov N.A., Kaliya I.E., Golubev V.G., Grudinkin S.A., Baranov A.V., *Materials*, **15**, №10, 3589, (2022).

ПЛАЗМОННО-НЕУПОРЯДОЧЕННЫЙ МАССИВ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ Ag НА SiO₂/c-Si ДЛЯ ГКР ПРИЛОЖЕНИЙ

Ермина А.А.¹, Солодовченко Н.С.², Левицкий В.С.³, Пригода К.В.¹, Бельская Н.А.¹, Павлов С.И.¹, Большаков В.О.¹, Толмачев В.А.¹, Жарова Ю.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

³НТЦ ТПТ, Санкт-Петербург, Россия

Исследованы структуры на основе разупорядоченного массива полусферических наночастиц Ag на c-Si. Гигантское комбинационное рассеяние показало надежное обнаружение 10⁻⁷ М (кристаллический фиолетовый) с коэффициентом усиления ~ 6.2 × 10⁵ и относительным стандартным отклонением сигнала ~ 10 %.

Ключевые слова: гигантское комбинационное рассеяние, локализованный плазмонный резонанс, трифенилметановый краситель.

Интерес научного сообщества к исследованию структур с локализованным плазмонным резонансом (ЛПР) растет с каждым годом, и это связано с большим прикладным потенциалом плазмонных наноструктур во многих областях, включая солнечную энергетику [1], наноплазмонную сенсорику [2], нелинейную оптику [3] и активно развивающееся гигантское комбинационное рассеяние света (ГКР) [4].

Важным этапом в создании структур для сенсорного применения является исследование их оптических и плазмонных свойств. В настоящей работе подробно исследованы структуры на основе разупорядоченного массива полусферических наночастиц Ag (НЧ Ag) на монокристаллической кремниевой подложке (c-Si). Предложен достаточно простой и малозатратный метод, при котором на поверхности кремния образуется самоорганизующаяся островковая пленка Ag, полученная химическим осаждением из раствора AgNO₃ + HF, затем трансформируется после термообработки при 350 °С в массив полусферических НЧ Ag на тонком слое SiO₂ ~ 5 нм. Размерами полусферических НЧ Ag и их поверхностным фактором заполнения c-Si можно управлять, варьируя концентрацией AgNO₃ в исходном растворе для осаждения. Так, концентрация AgNO₃ + HF (1:1) соответствует образцу S1, (1:4) – S4, (1:6) – S6 и (1:8) – S8. После анализа изображений наноструктур, полученных с помощью растрового электронного микроскопа, и данных атомно-силовой микроскопии, были определены средние радиусы от 30 до 130 нм, высоты от 39 до 180 нм и поверхностные факторы заполнения от 33.3 до 36.7 % полусферических НЧ Ag.

С помощью численных расчетов сечений рассеяния, поглощения и экстинкции от полусферической НЧ Ag были определены положения мультиполей ЛПР в зависимости от размера НЧ. Сравнение положений мультиполей ЛПР экспериментальных результатов согласуются с численными данными. Обнаружено расщепление дипольной моды ЛПР в спектрах отражения при наклонных углах падения для р-поляризации света, что свидетельствует об анизотропной форме полученных частиц – вытянутой полусфере (рисунк). Таким образом, метод фотометрии при наклонных углах падения поляризованного света позволяет анализировать форму анизотропных НЧ.

В заключение ГКР от таких структур показало надежное обнаружение 10⁻⁷ М водного раствора кристаллического фиолетового с коэффициентом усиления ~ 6.2 × 10⁵ и относительным стандартным отклонением сигнала ~ 10 %.

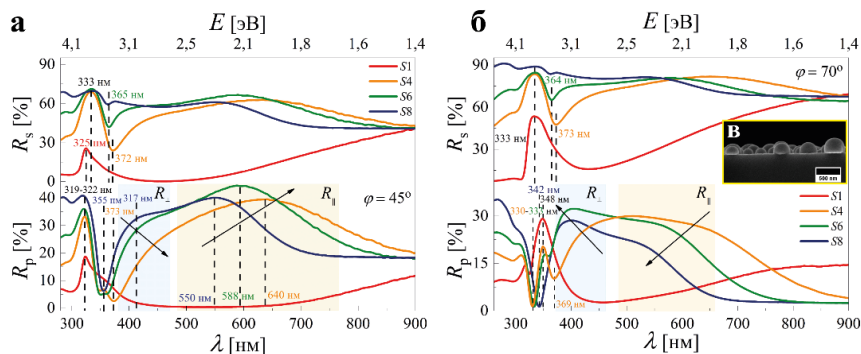


Рисунок. Коэффициенты отражения (R_p и R_s) при р- и s-поляризации света от образцов S1, S4, S6 и S8 при угле падения 45 ° (а) и 70 ° (б). (с) РЭМ-изображение (поперечное сечение) образца S1 в желтой рамке

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Проект 0040-2019-0012) и (Проект 075-15-2021-589).

[1] Atwater H.A., Polman A., *Nat. Mater.*, **9**, 205, (2010).

[2] Shutsko I., Buchmuller M., Meudt M., Gorn P., *Adv. Opt. Mat.*, **10**, 9, 2102783, (2022).

[3] Lippitz M., Van Dijk M.A., Orrit M., *Nano Lett.*, **5**, 4, 799, (2005).

[4] Sharma B., Frontiera R.R., Henry A.-I., Ringe E., Van Duyne R.P., *Mat. Tod.*, **15**, 1, 16, (2012).

**СОВМЕЩЕННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ И АТОМНО-СИЛОВАЯ
МИКРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Магарян К.А.^{1,2}, Аржанов А.И.^{1,3,4}, Степанов М.Е.¹, Наумов А.В.^{1,3,4}

¹Московский педагогический государственный университет (МПГУ), Москва, Россия

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

³Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, Россия

⁴Троицкое обособленное подразделение ФИАН им. П.Н. Лебедева, Троицк, Москва, Россия

Рассмотрен метод картирования мезоскопических поверхностей с одиночными наноразмерными объектами, основанный на получении топограммы (карты высот) поверхности образца, зарегистрированной при помощи атомно-силового микроскопа и параллельной регистрации спектрально-люминесцентной карты исследуемой области при помощи метода конфокальной люминесцентной микроскопии. Совмещение двух методик позволяет изучать связь спектральных характеристик исследуемых наноструктур с их пространственным расположением.

Ключевые слова: флуоресцентная наноскопия, атомно-силовая микроскопия, наноструктуры.

Проводя исследования свойств различных современных наноматериалов, необходимо учитывать влияние ближайшего локального окружения на эти самые свойства, уметь разделять вклад в регистрируемый сигнал от искомого объекта и среды, в которой объект находится. Спектротомография одиночных квантовых излучателей в настоящее время является надёжным инструментом для получения достоверной информации о индивидуальных свойствах объектов необходимой для приложений в физической химии, материаловедении, нанотехнологиях и других смежных областях знаний [1].

В лаборатории физики перспективных материалов и наноструктур Московского педагогического государственного университета (МПГУ) создан экспериментальный стенд для осуществления исследований в области флуоресцентной наноскопии с возможностью регистрации спектров люминесценции и спектров комбинационного рассеяния одиночных квантовых излучателей с параллельным восстановлением пространственного распределения объектов на подложке с нанометровой точностью с использованием атомно-силового микроскопа.

На базе данного лабораторного комплекса проводятся спектроскопические исследования со сверхвысоким пространственным и спектральным разрешением. В состав комплекса входит источник лазерного излучения – перестраиваемый одночастотный твердотельный лазер с шириной линии ~2 МГц и возможностью тонкой подстройки длины волны в диапазоне 450-650 нм в комплекте со внешним поглотителем амплитудных шумов, для контроля и стабилизации выходной оптической мощности. Оптический конфокальный люминесцентный микроскоп, со светосильным микрообъективом Nikon LU Plan Fluor x100 / 0.95 для осуществления точной фокусировки на образце, совмещенный с атомно-силовым микроскопом NTEGRA. Особенность микроскопа заключается в совмещении оптической схемы инвертированного микроскопа и зондового способа анализа поверхности, что дает возможность получать картограммы распределения параметров поверхности образцов синхронно с регистрацией их оптико-спектральных характеристик. Регистрация спектрального сигнала (люминесценции и комбинационного рассеяния) осуществляется при помощи монохроматора MS5204i (SOL Instruments, Беларусь) с набором из четырёх дифракционных решёток и высокочувствительного матричного ПЗС детектора HS101H.

Метод заключается в проведении томографирования мезоскопической (в пределах 100 мкм²) исследуемой поверхности с высаженными на неё методом центрифугирования наноразмерными объектами. Последовательно-параллельная регистрация люминесцентных изображений точечных объектов совмещается с регистрацией их спектров излучения или/и комбинационного рассеяния. Томографирование реализуется таким образом, что зарегистрированные спектрально-люминесцентные карты накладываются на карту этой же поверхности, сканированную атомно-силовым микроскопом. Дальнейший компьютерный анализ топограмм позволяет восстановить координаты всего множества отдельных нанообъектов, визуализировать их в нанометровом масштабе и выявить корреляции между спектральными характеристиками и пространственным расположением (морфологией) нанообъектов.

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания МПГУ «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства Просвещения РФ (AAAA-A20-120061890084-9). Авторы являются членами ведущей научной школы РФ «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2).

[1] Еремчев И.Ю., Еремчев М.Ю., Наумов А.В., *УФН*, **189**, №3, 312-322, (2019).

**УНИПОЛЯРНЫЕ БАРЬЕРНЫЕ nVn СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ HgCdTe:
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Войцеховский А.В.¹, Дзядух С.М.¹, Горн Д.И.¹,
Михайлов Н.Н.^{1,2}, Дворецкий С.А.^{1,2}, Средин В.Г.³**

¹НИ ТГУ, г. Томск, Россия

²ИФП СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³ВА РВСН им. Петра Великого, Москва, Россия

Данный материал содержит краткое изложение состояния вопроса и перспектив развития направления создания ИК фотоприёмных устройств на основе униполярных барьерных nVn структур на основе HgCdTe.

Ключевые слова: униполярная структура, nVn, HgCdTe.

Исследования фоточувствительных MWIR и LWIR барьерных структур на основе HgCdTe проводятся в ряде ведущих зарубежных научных групп с 2011 года. К настоящему моменту из открытых источников известно порядка 80 работ, большая часть из которых имеет преимущественно теоретический характер. На рисунке приведён график публикационной активности по тематике фоточувствительных барьерных структур на основе HgCdTe за 2011-2022 гг., демонстрирующий равномерное снижение числа работ. Это, очевидно, связано с тем, что накопленный теоретический материал вышел за рамки ресурсных возможностей имеющихся в распоряжении исследователей установок МЛЭ и ГФЭМОС. При этом очевидно, что не каждая научная группа имеет доступ к технологически сложной и дорогостоящей методике изготовления гетероструктур HgCdTe и ограничивается теоретическими исследованиями. С 2019 года подобные исследования nVn структур на основе МЛЭ HgCdTe ведутся совместно Томским государственным университетом (Томск) и институтом физики полупроводников СО РАН (Новосибирск), причём данные исследования являются экспериментальными. Это проявилось в росте количества публикаций в 2019 году (см. рисунок).

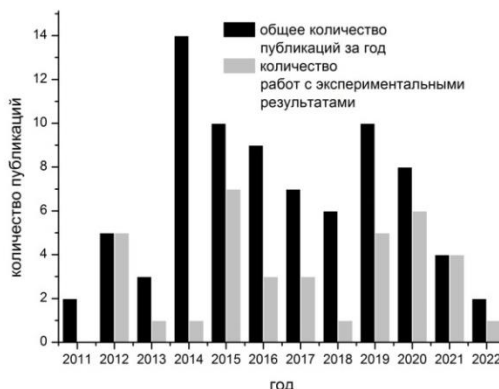


Рисунок. Статистика публикационной активности по тематике фоточувствительных барьерных структур на основе HgCdTe за 2011-2022 гг

В [1] нами было проведено аналитическое исследование, которое демонстрирует преимущества nVn-структур на основе HgCdTe по сравнению с p-n-фотодиодами на основе HgCdTe. Данное исследование показало, что на основе HgCdTe nVn-структуры в перспективе могут быть созданы MWIR и LWIR ИК фотоприёмные устройства, работающие при более высоких температурах охлаждения. Авторы одного из последних обзоров достижений nVn инфракрасных детекторов [2] также делают вывод о том, что для случая HgCdTe технология барьерных детекторов является самой многообещающей с точки зрения достижения рабочих температур фотоприёмных устройств, близких к комнатным.

Однако практической реализации фоточувствительных приборов на основе соединений A²B⁶ препятствуют нерешённые фундаментальные, конструктивные и технологические проблемы, в частности, проблема наличия энергетического барьера для дырок в структурах nVn n-типа проводимости. Решению этой проблемы посредством применения сверхрешёток в качестве барьерного слоя посвящены наши текущие исследования. Также актуальной является задача эффективной пассивации поверхности HgCdTe для уменьшения токов поверхностной утечки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>.

[1] Ch. 6. II-VI Semiconductor-Based Unipolar Barrier Structures for Infrared Photodetector Arrays / A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nsmelov, S.M. Dzyadukh, D.I. Gorn, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, G.Y. Sidorov // *Handbook of II-VI Semiconductor-Based Sensors and Radiation Detectors*. Cham: Springer, P. 135–154, (2023).

[2] Shi Q., Zhang S.-K., Wang J.-L., Chu J.-H., *J. Infrared Millim. Waves*, **41**, №1, 139-150, (2022).

ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК GaAs/AlGaAs

Башегурова Е.А., Дерибина Е.И., Капитонов Ю.В.

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

В этой работе полупроводник с квантовыми точками GaAs/AlGaAs, выращенный в установке молекулярно-пучковой эпитаксии, был изучен при помощи фотолюминесцентной спектроскопии. Полученные данные позволили определить происхождение сигнала от различных гетероструктур.

Ключевые слова: квантовые точки, GaAs/AlGaAs, фотолюминесценция.

Изучение квантовых точек (КТ) на основе GaAs/AlGaAs представляется интересным, потому что значение постоянных решетки материала точки и барьера достаточно близки, что ведет к низкому уровню внутреннего напряжения. Спектр фотолюминесценции (ФЛ) такого образца содержит несколько пиков, связанных с различными гетероструктурами внутри полупроводника. В работе [1] исследовались два спектрально разрешенных ансамбля КТ (точки А и точки В), но их происхождение объяснено не было. В этой работе нам удалось понять взаимосвязь между этими ансамблями. Основная цель исследования: определить, какая часть структуры образца соответствует определенным частям спектра, а также то, как эти объекты расположены относительно друг друга в образце.

На рисунке показаны спектр ФЛ и отражения, на котором можно выделить следующие резонансы (начиная с наименьшей энергии): углеродное загрязнение образца, трехмерный кристалл арсенида галлия, объект исследования – КТ, связанные с ними квантоворазмерные структуры, экситоны тяжелых дырок и экситоны легких дырок в квантовой яме.

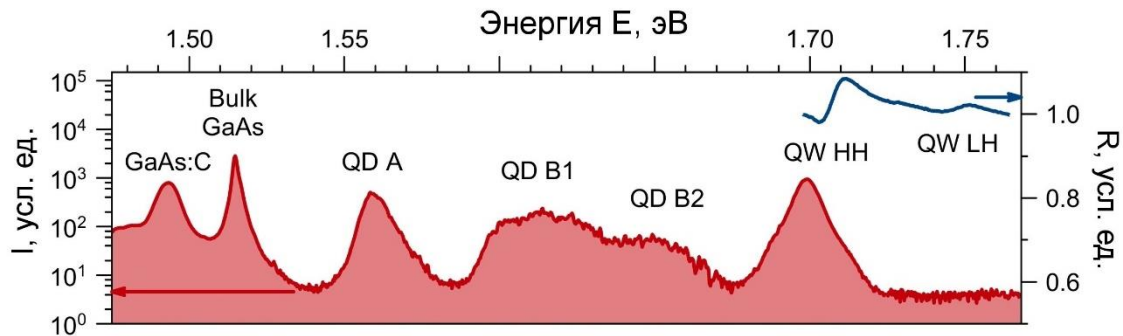


Рисунок. Усредненный спектр ФЛ ($T = 4$ К, красная кривая) и спектр отражения ($T = 10$ К, синяя кривая)

После сканирования образца, была вычислена корреляционная карта $C(E_i, E_j)$ как среднее карт автокорреляций по x :

$$C(E_i, E_j) = \langle C(E_i, E_j, x) \rangle_x = \left\langle \frac{dI(E_i, x)}{dx} \cdot \frac{dI(E_j, x)}{dx} \right\rangle_x. \quad (1)$$

Среди тех мест на корреляционной карте, где $E_i \neq E_j$, может быть выделено три области: корреляция излучения пиков по E_i и E_j ($C(E_i, E_j, x) > 0$), происходит из одновременного появления или исчезновения излучения во время сканирования, области антикорреляции излучения ($C(E_i, E_j, x) < 0$), когда появление одного пика случается вместе с исчезновением другого, а также области, в которых излучение отсутствует, постоянно или некоррелированно.

В результате, было получено описание спектра ФЛ полупроводника GaAs/AlGaAs с КТ. Описание спектра из [1] было дополнено, и было определено, что КТ двух типов, на самом деле являются КТ и другими квантоворазмерными структурами, спектры которых коррелируют или антикоррелируют как внутри своих ансамблей, так и со спектром излучения КТ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ проект 19-52-12046 и Министерства науки и высшего образования РФ (Мегагрант № 075-15-2022-1112). Работа выполнена на оборудовании ресурсного центра СПбГУ "Нанопотоника".

[1] Ulhaq A., Duan Q., Zallo E., Ding F., Schmidt O.G., Tartakovskii A.I., Skolnick M.S., and Chekhovich E.A., *Phys. Rev. B*, **93**, 165306, (2016).

**2D ЭКСИТОНЫ В АТОМАРНО-ТОНКИХ ОРГАНО-НЕОРГАНИЧЕСКИХ
НАНОСТРУКТУРАХ АПБВИ С ЭНАНТИОМЕРНЫМИ ЛИГАНДАМИ**

Куртина Д.А., Графова В.П., Лебедев А.И., Васильев Р.Б.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Рассмотрены атомарно-тонкие наноструктуры, выращенные в коллоидных системах, с прецизионной толщиной менее 1 нм и протяженными латеральными размерами до 500 нм. Обсуждается поведение хиральных 2D экситонов в случае энантиомерных лигандов.

Ключевые слова: 2D полупроводники, экситоны, хиральность.

Двумерные (2D) полупроводники проявляют сильные экситонные эффекты из-за уменьшенного диэлектрического экранирования и усиленных кулоновских взаимодействий, что делает их потенциальными кандидатами для новых оптоэлектронных приложений [1]. В работе рассматривается новый представитель класса двумерных полупроводников на основе соединений АПБВИ: органо-неорганические наноструктуры состава $[M(n+1)E(n)L(2)]$, где $M = Cd$ или Zn , $E = S, Se$ или Te , L – органический лиганд X-типа в анионной форме, n – число монослоев. Входящие в состав органические лиганды терминируют базальные плоскости наноструктуры и компенсируют заряд положительно заряженного ядра наноструктуры. В работе в качестве лигандов рассмотрены хиральные энантиомерные L-/D-производные цистеина. Это приводит к гибридизации молекулярных орбиталей тиолатной группы хирального лиганда и ковалентного блока центрального ядра наноструктуры, что проявляется как экситонный круговой дихроизм в выраженных сериях HH, LH и SO двумерных экситонов при комнатной температуре, что перспективно использования данных структур в ряде приложений [3].

Для синтеза использован коллоидный метод роста, включающий предварительный рост атомарно-тонких наноструктур халькогенидов кадмия и цинка с толщинами 0.6 и 0.9 нм с использованием блокаторы роста базальных граней в толщину с последующим покрытием лигандом олеиновой кислоты. На втором этапе олеиновая кислота была обменена на стереоизомеры L-/D-цистеина, N-ацетил-L-/D-цистеина также в коллоидных растворах вследствие большего сродства базальных катионных плоскостей к сульфидгидридной группе, чем к карбоксилатной. Детальное исследование наноструктур с использованием методов HRTEM, HAADF-STEM, SAED, XRD показало атомарно-тонкую толщину, монокристалльный характер наноструктур и показало кристаллическую структуру цинковой обманки для CdTe и CdSe и структуру вюрцита для ZnSe, искаженную из-за влияния лигандов. Состав и координация лигандов установлены методом FTIR.

Оптические свойства наноструктур были изучены спектроскопией поглощения, люминесценции. Для анализа хирооптических свойств использована комбинация спектроскопии кругового дихроизма (КД) и оптического вращения. Обмен с хиральными лигандами вызывает сдвиг экситонных полос за счет гибридизации тиолатных групп вместе с появлением сильных полос КД в спектрах КД. Типичные спектры КД для случая наноструктур с лигандом N-ацетил-L-цистеином демонстрируют пять отчетливых знакопеременных полос в спектральном диапазоне 300-500 нм. Замена N-ацетил-L-цистеина на N-ацетил-D-цистеин меняет знак спектра, подобно зеркальному изображению, с тем же спектральным положением и интенсивностью полос. Это подтверждает влияние лиганда на индуцированное предпочтение определенного стереоизомера. Полосы КД как покрытых N-ацетил-L-, так и D-цистеином образцов достаточно хорошо коррелируют с положением переходов LH, HH и SO в спектрах поглощения. Это подтверждает экситонный характер индуцированных полос КД. Значения коэффициента диссимметрии для предельно тонких наноструктур с толщиной 0.6 нм превышают значения для более толстых образцов. В то же время коэффициент диссимметрии для лиганда N-ацетил-L-цистеина превышает значение для L-цистеина, что подтверждает, что N-ацетил-L-цистеин представляет интерес для индукции хиральности наряду с широко используемым L-цистеином. Замена лиганда N-ацетил-L-цистеина на L-цистеин приводит к инверсии спектров КД, что подчеркивает переориентацию молекулярных диполей диссимметричного центра лиганда и экситонного переход в ядре наноструктуры [2, 4]. Мы обнаружили максимальный g-фактор диссимметрии до 0.01, что является самым высоким значением для полупроводниковых наночастиц АПБВИ [5]. Обсуждается модель индуцированной хиральности экситонов Ванье-Мотта в геликоидальном потенциале энантиомерных лигандов, которая была подтверждена анализом влияние полярности растворителя, оптического вращения и моделирование координации лигандов.

Работа поддержана Российским Научным Фондом (грант № 22-13-00101).

[1] Mueller T., Malic E., *npj 2D Mater Appl*, **2**, 29, (2018).

[2] Kurtina D.A., Garshev A.V., Vasil'eva I.S. et al., *Chem. Mater.*, **31**, 9652–9663, (2019).

[3] Cho N.H., Guerrero-Martínez A., Ma J. et al., *Nat Rev Bioeng*, **1**, 88–106, (2023).

[4] Vasiliev R.B., Lazareva E.P., Karlova. et al., *Chem. Mater.*, **30**, 1710–1717, (2018).

[5] Kurtina D.A., Grafova V.P. et al., *Materials*, **16**, 1073, (2023).

ЭПИТАКСИЯ НАПРЯЖЕННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК GaAs/AlGaAs И ИХ ОПТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ

Дерибина Е.И., Капитонов Ю.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

С помощью метода Nanohole-filled droplet epitaxy были выращены квантовые точки GaAs/AlGaAs. В спектре микрофотолюминесценции обнаружены различные области квантования и произведен расчет тяжелодырочных и легкодырочных экситонов в квантовой яме.

Ключевые слова: квантовая точка, капельная эпитаксия, молекулярно-пучковая эпитаксия.

Квантовые точки (КТ) GaAs/AlGaAs, формируемые с помощью заполнения отверстий, полученных при капельной эпитаксии (метод NFDE), не имеют напряжений в структуре в отличие от самоорганизованных КТ InAs. Поэтому представляют большой интерес для использования в устройствах фотоники, например, для изготовления однофотонных излучателей, детекторов и солнечных элементов [1].

В данной работе выращен образец с КТ GaAs/AlGaAs: 7.3 нм Al_{0.47}Ga_{0.53}As - 3.4 нм GaAs - 84.0 нм Al_{0.38}Ga_{0.72}As. С помощью спектроскопии микрофотолюминесценции (μФЛ) рассмотрены оптические свойства образца (рис. 1). Отмечаются полосы, которые связаны с излучением квантовой ямы (КЯ), формируемой в процессе роста, полосы КТ (А, В), а также полосы трехмерного GaAs.

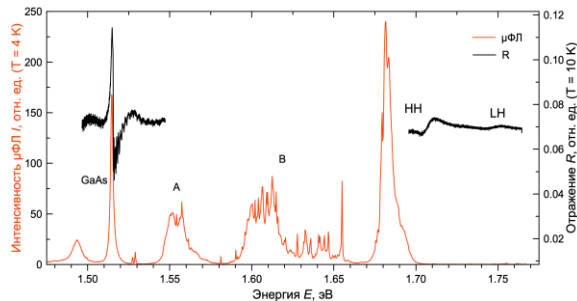


Рис. 1. μФЛ (50x) и отражение образца T874

На спектре отражения (рис. 1) хорошо отличимы сигналы, связанные с тяжелодырочными (HH) и легкодырочными (LH) экситонами КЯ, которые согласуются с расчетами, полученными в программе Nextnano (для 12 монослоев, что соответствует 3.4 нм КЯ). Согласно расчетам (рис. 2), в образце отсутствуют монослойные флуктуации толщины КЯ.

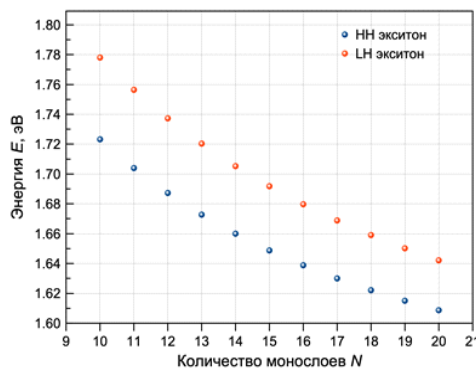


Рис. 2. Расчет энергий HH и LH экситонов в КЯ GaAs/AlGaAs толщины $L = N a_{GaAs}$ ($a_{GaAs} = 0.283$ нм)

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (Мегагрант № 075-15-2022-1112) и Российским фондом фундаментальных исследований (RFBR 19-52-12046). Работа была выполнена на оборудовании Ресурсного Центра СПбГУ «Нанофотоника».

[1] Gurioli M., Wang Z., Rastelli A. et al., *Nat. Mater.*, **18**, 799–810, (2019).

**ОДНОРОДНОЕ И НЕОДНОРОДНОЕ УШИРЕНИЕ СПЕКТРОВ
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe/CdS/ZnS:
ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ**

Аржанов А.И.^{1,2,3}, Иноземцева А.В.¹, Каримуллин К.Р.^{1,2,3}, Наумов А.В.^{1,2,3}

¹Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

²Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Троицкое обособленное подразделение, Москва, Россия

Исследованы спектры люминесценции квантовых точек (КТ) CdSe/CdS/ZnS при комнатной температуре для большого ансамбля и одиночных КТ. Измерены и проанализированы температурные зависимости ширины и положения максимума спектров люминесценции КТ в диапазоне 6-300 К, что позволило определить параметры электрон-фононного взаимодействия. Сравнение результатов, полученных для большого ансамбля КТ и одиночных КТ, позволило разделить эффекты однородного и неоднородного уширения спектров. Полученные данные необходимы для эффективного использования КТ в оптоэлектронике, фотовольтаике, био- и медицинской физике.

Ключевые слова: квантовые точки, электрон-фононное взаимодействие.

Квантовые точки (КТ) представляют собой наноразмерные полупроводниковые кристаллы, характеризующиеся наличием уникальных фотофизических свойств (высокая эффективность фотолюминесценции, узкая полоса спектра люминесценции и возможность варьирования длины волны излучения) за счет эффекта размерного квантования. Исследование оптических свойств КТ имеет большое значение для практических приложений в различных областях, включая оптоэлектронику, фотовольтаику, био- и медицинскую физику [1, 2]. Одним из важных аспектов, требующих детального исследования, являются процессы формирования и уширения спектров люминесценции КТ, в т.ч. в зависимости от температуры, как для отдельных КТ (однородное уширение), так и для ансамблей (т.е. в присутствии эффекта неоднородного уширения). Понимание микроскопической природы процессов однородного и неоднородного уширения спектров фотолюминесценции является важным для оптимизации и контроля оптических свойств КТ в конкретных приложениях. В связи с этим механизмы уширения спектров КТ до сих пор остаются предметом активных исследований.

В большинстве исследований процессы формирования спектров КТ связывают с электрон-фононным взаимодействием в таких наноструктурах [3, 4]. Это взаимодействие может приводить к различным явлениям, включая уширение и сдвиг спектров люминесценции КТ, зависящие от температуры и других термодинамических параметров, характеристик внешних и локальных полей.

В данной работе были проанализированы экспериментально измеренные спектры люминесценции ансамбля коллоидных полупроводниковых КТ CdSe/CdS/ZnS (пр-во QDLight, Дубна) в широком диапазоне температур [5]. Полученные температурные зависимости положения максимума и ширины спектра люминесценции дают информацию о параметрах электрон-фононного взаимодействия в разных матрицах. Кроме того, были измерены спектры люминесценции квазиодиночных КТ CdSe/CdS/ZnS на стеклянной подложке. Изучение спектров малых ансамблей квантовых точек (вплоть до одиночных КТ) даёт возможность исключить влияние усреднения по ансамблю, т.е. с полным снятием неоднородного уширения, и исследовать механизмы формирования спектров люминесценции. Кроме того, это позволяет напрямую проанализировать эффекты спектральной диффузии [6] и измерить параметры электрон-фононного взаимодействия (фактор Хуана-Риса, энергию локального фонона) на уровне отдельных КТ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Просвещения Российской Федерации в рамках темы государственного задания Московского педагогического государственного университета «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» (АААА-А20-120061890084-9). Авторы являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2).

[1] Аржанов А.И. и др., *Фотоника*, 15(8), 622-641, (2021).

[2] Аржанов А.И. и др., *Фотоника*, 16(2), 96-113, (2022).

[3] Varshni Y.P., *Physica*, 34(1), 149-154, (1967).

[4] O'Donnell K.P., Chen X., *Applied Phys. Letters*, **58**(25), 2924-2926, (1991).

[5] Karimullin K.R. et al., *Laser Physics*, **29**(12), 124009, (2019).

[6] Podshivaylov E.A. et al., *J. Mater. Chem. C*, **11**, №25, 8570-8576, (2023).

**ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СЛОЁВ ФОТОННОГО
КРИСТАЛЛА ИЗ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

**Пятнов М.В.^{1,2}, Соколов М.М.², Киселев И.А.², Панкин П.С.^{1,2}, Волкова И.Р.^{1,3},
Волочаев М.Н.¹, Бикбаев Р.Г.^{1,2}, Рыжков И.И.^{2,4}, Ветров С.Я.^{1,2}, Тимофеев И.В.^{1,2},
Шабанов В.Ф.^{1,3}**

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

Используя угловую зависимость спектров пропускания, данные электронной микроскопии и численное моделирование оценены показатели преломления слоёв фотонных кристаллов из анодного оксида алюминия, содержащих различное количество периодов.

Ключевые слова: анодирование, фотонный кристалл, эффективный показатель преломления.

Анодирование металлической фольги занимает достойное место в ряду способов изготовления фотонных кристаллов [1]. Метод позволяет получать фотонные кристаллы с различными параметрами: пористостью, толщинами и количеством слоёв, микроструктурой. Большая вариативность достигается благодаря тому, что в процессе анодирования можно точно контролировать геометрию структуры, меняя характеристики тока или напряжения анодирования, окружающие условия, чистоту и вид используемых материалов. Всё это позволяет получить структуры с определённым видом фотонной запрещённой зоны. При изготовлении таких структур пространственная модуляция показателя преломления достигается за счёт изменения пористости оксида вдоль нормали к поверхности плёнки за счёт периодического изменения условий анодирования.

В представленной работе методом анодирования алюминиевой фольги были изготовлены образцы фотонных кристаллов с различным количеством периодов. Преимущества анодного оксида алюминия проявляются в его механической, термической и химической стабильности. В процессе роста за счёт периодического изменения напряжения между анодом и катодом кристалла происходило ветвление пор. Полученные образцы имеют слоистую структуру, высокопористые слои чередуются с низкопористыми, за счёт чего создается периодическая модуляция показателя преломления. Продемонстрировано, что увеличение количества периодов приводит не только к увеличению глубины зоны, но также к сдвигу минимума пропускания в коротковолновую область. Это обусловлено химическим травлением пористой структуры фотонного кристалла в кислом электролите, приводящей к увеличению пористости образцов с большим количеством периодов из-за большего времени, необходимого для их синтеза. С ростом пористости эффективный показатель преломления слоёв кристалла снижается, из-за чего происходит синий сдвиг запрещенной зоны [2].

Из угловых зависимостей спектров пропускания образцов определены периоды и эффективные показатели преломления кристаллов, содержащих различное число периодов. Данные электронной микроскопии позволили определить толщины слоёв и их пористость. Для оценки показателей преломления использованы несколько известных теорий эффективной среды, проведено сравнение результатов между собой. Методом матрицы переноса выполнено численное моделирование спектров пропускания образцов и определены комплексные показатели преломления слоев фотонного кристалла.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности № 22-22-20078, <https://rscf.ru/project/22-22-20078/>.

[1] Shang G., Bi D., Gorelik V.S., Fei G., Zhang L., *Mat. Today. Comm.*, **34**, 105052, (2023).

[2] Kushnir S.E., Napolskii K.S., *Mat. Des.*, **144**, 140-150, (2018).

**ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК $Cd_{0.3}Hg_{0.7}Te$,
ЛЕГИРОВАННЫХ МЫШЬЯКОМ**

**Ружевич М.С.¹, Фирсов Д.Д.², Комков О.С.², Мынбаев К.Д.^{1,3}, Варавин В.С.⁴,
Марин Д.В.⁴, Якушев М.В.⁴**

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

⁴ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В работе представлены результаты исследования фотолюминесценции образцов $Cd_xHg_{1-x}Te$ состава $x \approx 0.3$, легированных мышьяком. Обнаружены и обсуждаются особенности в спектрах для образцов после роста и прошедших активационный отжиг.

Ключевые слова: теллуриды кадмия-ртути, легирование, фотолюминесценция.

Твердые растворы на основе теллуридов кадмия-ртути (КРТ, $Cd_xHg_{1-x}Te$) применяются для создания оптоэлектронных устройств, работающих в ИК диапазоне. Изменение мольной доли теллурида кадмия в твердом растворе меняет ширину запрещенной зоны материала, что позволяет с помощью КРТ охватить значительную спектральную область (1-14 мкм).

Для большинства современных оптоэлектронных устройств необходимо формирование p - n -перехода. Наиболее актуальный метод получения p - $CdHgTe$, выращенного молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ), — легирование мышьяком. Однако легированные мышьяком пленки КРТ после роста имеют n -тип проводимости. Для «перевода» КРТ в p -тип проводимости необходима активация мышьяка. Для этого применяется двухстадийный отжиг, включающий высокотемпературную активацию ($T \sim 350$ – 400 °С) и низкотемпературный ($T \sim 200$ °С) отжиг в насыщенных парах ртути для снижения концентрации вакансий ртути, образующихся при высокой температуре.

В данной работе исследовались выращенные МЛЭ в ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН на подложке из Si пленки КРТ состава $x=0.29$ и толщиной $d \approx 6$ мкм. Состав и толщина пленок определялись в ходе роста с помощью *in situ* эллипсометрии и контролировались измерениями оптического пропускания. Основным методом исследования являлась фотолюминесценция (ФЛ). Эксперименты проводились в диапазоне температур 11-300 К при мощностях возбуждающего диодного лазера (длина волны 809 нм) от 7 до 400 мВт на установке на базе фурье-спектрометра Vertex 80 с пошаговым сканированием.

Спектры ФЛ исследованных образцов при температуре 11 К приведены на рисунке.

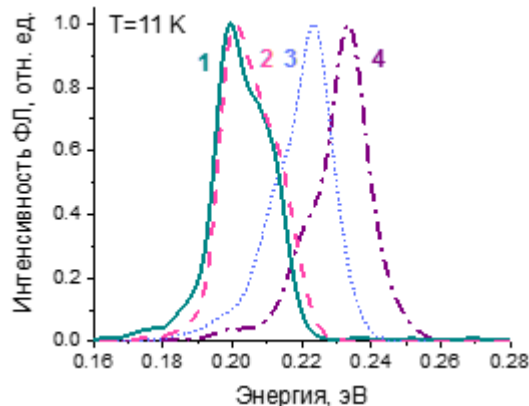


Рисунок. Нормированные спектры ФЛ при $T=11$ К образцов А (1 и 4) и В (2 и 3) до (1 и 2) и после (3 и 4) активационного отжига

Для отожжённых образцов наблюдалось смещение пиков ФЛ в коротковолновую сторону, что характерно для пленок КРТ, выращенных по данной технологии. Спектры ФЛ всех образцов аппроксимировались двумя пиками. Высокоэнергетические пики с полуширинами 10-12 мэВ до отжига и ~ 8 мэВ после отжига можно было ассоциировать с рекомбинацией экситонов, локализованных на флуктуациях состава [1], низкоэнергетические (НЭ), — с рекомбинацией через локальные уровни. Для пленок после роста эти пики с энергией $E_L \approx 12$ мэВ при 11 К были связаны с донорно-акцепторной рекомбинацией через уровни остаточных примесей и/или дефектов, наблюдавшейся ранее в нелегированных пленках на Si подложке [2]. У пленок, прошедших активационный отжиг, НЭ пик с $E_a \approx 7$ -8 мэВ был обусловлен акцепторными состояниями мышьяка. В работе будет обсуждаться эффективность использования оптических методов для исследования активации мышьяка в КРТ.

[1] Ruzhevich M.S., Mynbaev K.D., *Rev. Adv. Mater. Technol.*, **2**, №4, 47-64, (2020).

[2] Мынбаев К.Д., Баженов Н.Л., Иванов-Омский В.И., *Письма ЖТФ*, **36**, №23, 39-46, (2010).

ЛАЗЕРНАЯ МИКРОСКОПИЯ ОБЕСЦВЕЧИВАНИЯ И ДИФФУЗИИ
ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ

Бородина Л.Н., Орлова А.О., Вениаминов А.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Гидродинамические размеры наночастиц измерены методом, основанным на отслеживании диффузионного уширения микроскопического профиля люминесценции с помощью лазерного сканирующего микроскопа и сопоставлены с результатами измерений другими методами.

Ключевые слова: люминесцентные наночастицы, диффузия, люминесцентная лазерная сканирующая микроскопия.

По скорости движения наночастиц в коллоидном растворе можно судить об их гидродинамических размерах, вязкости растворителя, трансформациях частиц, их взаимодействии с внешними полями, степени неоднородности материала.

В нашей работе для измерения коэффициента диффузии и скорости дрейфа наночастиц в магнитном поле использовано отслеживание уширения и смещения микромасштабного пространственного профиля интенсивности фотолюминесценции. Люминесцентный подход, основанный на методе восстановления люминесценции после фотообесцвечивания [1], реализован с использованием конфокального лазерного сканирующего микроскопа. Пространственная неоднородность люминесценции в виде узкой полосы создаётся при экспонировании объекта исследования интенсивным лазерным излучением, для визуализации измерения использовано лазерное излучение, ослабленное на один-два порядка по сравнению с интенсивностью обесцвечивающего лазерного излучения. Фототрансформация частиц, по традиции называемая фотообесцвечиванием, может выражаться не только в уменьшении, но и в увеличении квантового выхода фотолюминесценции, что особенно характерно для квантовых нанокристаллов, а также в изменении коэффициента диффузии, наблюдаемого как совместно с изменением квантового выхода фотолюминесценции, так и без него.

Как правило, вследствие диффузии после фотообесцвечивания профиль люминесценции приобретает гауссову форму, но в ряде случаев его форма усложняется, тогда динамика изменения профиля с течением времени содержит информацию о движении частиц как в исходном, так и в фототрансформированном состоянии. На рисунке показан пример последовательности изображений участка раствора, полученных через различные промежутки времени после экспонирования, и соответствующих люминесцентных профилей.

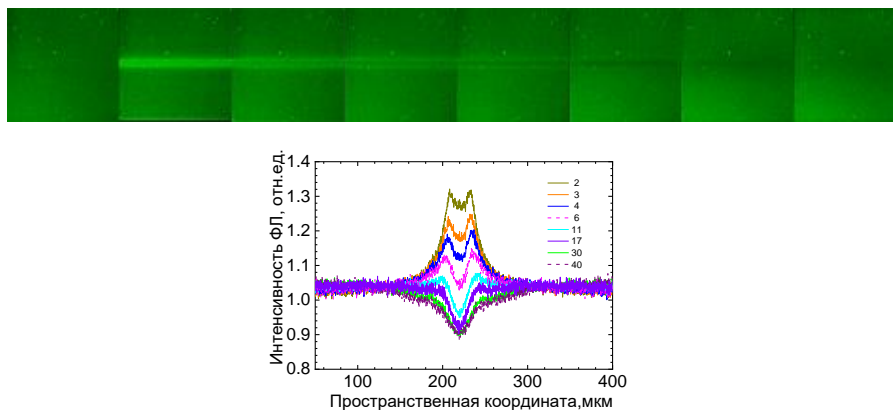


Рисунок. Серия последовательных люминесцентных изображений участков растворов фотоактивированных квантовых точек в карбоксиэтилакрилате с фотоиндуцированным изменением коэффициента диффузии и соответствующие им пространственные профили интенсивности люминесценции

Пространственный масштаб детектируемого движения определяется областью сканирования, временной – его скоростью. На примере полупроводниковых нанокристаллов и углеродных точек проведено сравнение характерных размеров, полученных люминесцентным методом и средствами электронной, атомно-силовой микроскопии, динамического рассеяния света.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, госзадание № 2019-1080 и гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

[1] Lorén N., Hagman J., Jonasson J.K., Deschout H., Bernin D., Cella-Zanacchi F., Diaspro A., McNally J.G., Ameloot M., Smisdom N., Nydén M., Hermansson A.-M., Rudemo M., Braeckmans K., *Quarterly reviews of biophysics*, **3**, 323–387, (2015).

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ХЕМОРЕЗИСТИВНЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА НА ЛЕТУЧИЕ МАРКЕРЫ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Парфенов П.С., Болтенко А.В., Клименко Д.И., Маслов В.Г., Орлова А.О.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Сформированы гибридные структуры на основе графена и нанокристаллов CdSe и хеморезистивные сенсоры на их основе. Установлены закономерности оптических, электрических и фотоэлектрических свойств гибридных структур в присутствии паров летучих соединений, являющихся маркерами онкологических заболеваний.

Ключевые слова: хеморезистивные сенсоры, графен, нанокристаллы CdSe.

Для обнаружения химических веществ применяется широкий спектр сенсоров, одним из вариантов которых являются резистивные сенсоры. Они являются значительно более простым в реализации устройством в сравнении с сенсорами на основе транзисторов, отличающихся большей чувствительностью и комплексным сигналом. Их преимуществом является простота реализации. Сопротивление сенсора изменяется за счет переноса электрона между адсорбированными молекулами и чувствительным слоем [1]. Недостатками является низкая чувствительность, отсутствие селективности, недостаточное быстродействие, и существенный дрейф нуля.

С открытием графена активно ведутся работы по созданию сенсоров на его основе и его производных. Основное преимущество таких сенсоров – неоднократно продемонстрированное детектирование отдельных молекул, возможное благодаря чувствительности проводимости к смещению уровня Ферми графена при адсорбции молекул. Также сенсоры на основе графена отличает большая площадь поверхности, высокая подвижность носителей и быстродействие, а также низкий электрический шум. Этим устройствами присущи как собственные проблемы (такие как высокая стоимость создания монослоя графена, чувствительность к температуре и влажности), а также общие проблемы хеморезистивных сенсоров (неизбирательность, дрейф нуля).

Одной из основных стратегий увеличения специфичности является модификация поверхности графена с помощью молекул, обеспечивающих специфичное связывание с аналитом. В этом направлении достигнут большой прогресс в обнаружении антител, антигенов или фрагментов нуклеиновых кислот. Помимо этого, развивается направление декорирования графена наночастицами, обеспечивающими дополнительное связывание с аналитом и каталитическую активность. Дополнительно, изначально слабо поглощающий оптическое излучение графен, благодаря декорированию наночастицами становится чувствительным к излучению, что может сделать реакцию более специфичной, а также повысить чувствительность сенсоров [2].

В работе рассматривается реализация химического сенсора на основе гибридной структуры на основе графена и нанокристаллов CdSe. В такой конфигурации дополнительно используется возникающий под действием оптического излучения перенос энергии или заряда от нанокристаллов CdSe к графену. Вероятность такого процесса зависит от взаимодействия нанокристаллов с аналитом, что может увеличить селективность отклика сенсора в сравнении с хеморезистивными сенсорами на основе графена и его производных.

В работе сформированы гибридные структуры на основе графена и нанокристаллов CdSe, установлены закономерности их оптических, электрических и фотоэлектрических свойств, проанализирована зависимость свойств гибридных структур в присутствии паров этанола и ацетона, соединений, являющихся маркерами некоторых онкологических заболеваний [3]. Показано, что регистрация тока хеморезистора с помощью синхронного детектирования позволяет не только улучшить чувствительность, но и повысить быстродействие сенсора. Также демонстрируются способы регистрации сигнала и обработки данных.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 2019-1080.

[1] Hunter G.W. et al, *J. Electrochem. Soc.*, **167**, 037570, (2020).

[2] Lee D.H., Yoo H., *Sensors*, **22**, 9228, (2022).

[3] Vernia F. et al., *Cancers*, **13**, 2361, (2021).

ЛАЗЕРНАЯ И СИЛОВАЯ ОПТИКА

**КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СКАНИРУЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ
МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ**

Юревич В.И.

ООО «Лазерный Центр», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены погрешности обработки микроэлектронных компонентов лазерными станками на базе двухзеркальных сканеров, вызванные некорректным заданием алгоритма движения зеркал, конечной величиной отклонения от телецентричности и флуктуациями фокусного расстояния объектива.

Ключевые слова: лазерная обработка, двухзеркальный сканер, телецентричность.

В последнее время в электронной промышленности наблюдается бурное возрождение спроса на лазерные технологические установки (ЛТУ) с преобъективным сканированием пучка. Скорость обработки и повторяемость траекторий, обеспечиваемые такими системами, кардинально превышают показатели, демонстрируемые ЛТУ с линейным двухкоординатным позиционированием объекта обработки относительно неподвижного пучка. Размеры полей сканирования, реализуемые в таких ЛТУ, достаточны для обработки подавляющего большинства микроэлектронных компонентов и их полуфабрикатов со скоростями до 10 м/с и субмикронными ошибками воспроизводимости.

Однако, большинство прецизионных технологических процессов не допускают ошибок размерной обработки, величина которых превышает единицы микрометров. Это требование альтернативно основному недостатку сканирующих ЛТУ, заключающемуся в конечной точности воспроизведения абсолютных координат за счет фундаментальной нелинейности сканера [1] и дисторсии оптической системы. Однако, ошибка может быть менее 0.01% от полного размера поля сканирования, если контроллер управления сканерами позволяет реализовать законы движения зеркал вида

$$\theta_y = \sum_{n=1}^3 K_n G_y^n, \quad K_n = k_{0,n} + k_{1,n} G_x + k_{2,n} G_x^2 + k_{3,n} G_x^3, \quad (1)$$

где G_x и G_y – нормированные координаты декартова поля сканирования с нулем в центре поля; $k_{i,n}$ – полиномиальные коэффициенты.

Выражение для θ_x выглядит аналогично, но G_x и G_y меняются местами, а двенадцать коэффициентов имеют другие значения. Для идеально центрированной оптической системы одноименные коэффициенты для всех квадрантов декартова поля сканирования одинаковы. Их величина зависит от суперпозиции нелинейности сканера с величиной и знаком дисторсии оптической системы. Более слабые аппроксимации, в том числе построенные на четных полиномах (модели Брауна – Конради), дают заметно худшие результаты.

Даже в случае оптимальной коррекции гальванического поля, наклонное падение пучка приводит к заметным ошибкам воспроизведения координат, связанным с конечной величиной характерной длины каустики сфокусированного пучка в сочетании с неточной наводкой на фокус, изменяющейся от нуля в центре поля сканирования до максимума в его углах. Оценка этой ошибки для участка каустики с изменением размера сфокусированного пучка в ω_E / ω_0 раз имеет вид

$$\delta\xi = 2(\lambda\pi^{-1})\Psi_{TE}\sqrt{(\omega_E / \omega_0)^2 - 1} \times NA_i^{-2}, \quad (2)$$

где ω_E – размер пучка, увеличенный до такой величины, которая практически не влияет на скорость удаления материала; NA_i – числовая апертура фокусировки; Ψ_{TE} – отклонение от телецентричности. Так как ошибка обратно пропорциональна квадрату числовой апертуры, то при переходе от короткофокусных объективов с малыми полями и NA_i порядка 0,1 к длиннофокусным объективам с большими полями и NA_i порядка 0,01, она растет от 1 до 100 μm для $\omega_E / \omega_0 = 1,05$ и $\Psi_{TE} = 2^\circ$.

При прохождении лазерного излучения через объектив в объеме стекла возникает небольшая по силе, но заметно aberrированная тепловая линза, поэтому на плоскость обработки попадает дефокусированный пучок, а величина дефокусировки определяется динамикой изменения энергетических характеристик лазерной обработки, но несколько отстает от нее по времени. Для стандартных стекол ведущих производителей смещение фокуса составляет порядка 10^{-6} (Вт×мм)⁻¹, а среднеквадратичное значение термоиндуцированной волновой абберации $2,5 \times 10^{-4}$ $\lambda/\text{Вт}$. Для стекол градаций НТ и УНТ эти значения на порядок меньше. Таким образом, для объектива из стандартного стекла уже при средней мощности излучения 100 Вт, фокусном расстоянии 200 мм и типовой аксиальной толщине стекла 40 мм, смещение фокуса превышает Рэлеевскую длину, а абсолютная точность обработки падает за счет приращения размера воздействующего пучка.

[1] Yurevich V.I., Grimm V.A., Afonyushkin A.A., Yudin K.V., Gorny S.G., *Proc. SPIE*, **9626**, (2015).

**Cr:LiSAF-ЛАЗЕР С ЛАМПОВОЙ НАКАЧКОЙ И
ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ**
Сергеев А.А.^{1,2}, Суханов Г.А.¹, Низамутдинов А.С.², Погода А.П.¹

¹БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Представлен макет Cr:LiSAF-лазера, работающего в режиме активной модуляции добротности. Минимальная длительность импульса с энергией 7,7 мДж составила 19 нс. Продемонстрирована перестройка длины волны в диапазоне 825-865 нм.

Ключевые слова: Cr:LiSAF-лазер, перестройка длины волны.

Лазеры на основе широкополосной активной среды Cr³⁺:LiSrAlF₆ выделяются высокой эффективностью, но их коммерческое использование затруднено в связи с техническими трудностями изготовления активной среды. Одна из важных проблем лазеров на основе Cr³⁺:LiSrAlF₆ – сложность генерации импульсов наносекундной длительности. Эта сложность связана со свойствами среды [1]: изменение времени жизни лазерного уровня при нагреве; широкая полоса усиления. Несмотря на многочисленные исследования, режим активной модуляции добротности описан недостаточно широко, хотя является перспективным [2-4].

На рисунке 1 показана схема экспериментальной установки. Реализована система с двумя связанными резонаторами: Фабри-Перо (А) и с решеткой Брэгга (Б). Длина первого 37,5 см, второго – 55 см. Установка состояла из следующих элементов: глухое широкополосное зеркало с коэффициентом отражения >99,9% (1); призма Глана-Тейлора (3); электрооптический модулятор (4); активная среда длиной 100мм и диаметром 6,3мм (5); выходное зеркало резонатора (7). Во втором резонаторе дополнительно установлены решетка Брэгга (8) и глухое зеркало (9), аналогичное зеркалу (1). Также, для селекции поперечных мод введены диафрагмы (2) и (6). Накачка активной среды производилась Хе лампой-вспышкой с энергией на конденсаторе 45 Дж и длительностью импульса около 240 мкс.

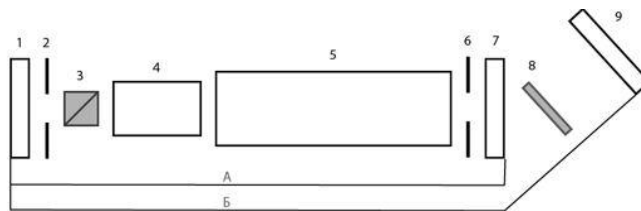


Рис. 1. Экспериментальная схема: резонатор Фабри-Перо (А) и резонатор с решеткой Брэгга (Б)

Выходное зеркало (7) имело отражательную способность 70% в диапазоне 650-850 нм. Такое значение отражательной способности обеспечивало наименьшую длительность импульса генерации. Частота следования импульсов составляла 2 Гц. В результате были получены следующие параметры излучения: длительность импульса - 19 нс, энергия - 7,7 мДж, центральная длина волны - 830 нм, диаметр пучка - 2 мм. На рисунке приведены осциллограмма (2а) и спектр (2б) излучения лазера.

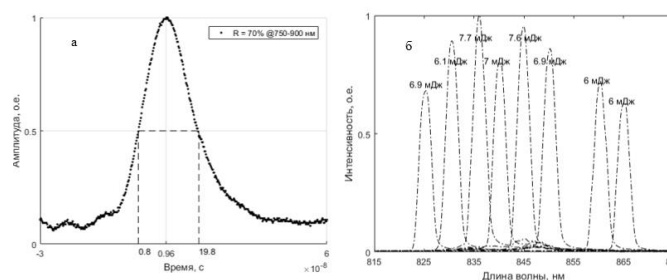


Рис. 2. Результаты исследования: а) осциллограмма; б) спектрограмма

В результате получен макет мощного Cr:LiSAF-лазера, обеспечивающий в режиме модуляции добротности электрооптическим затвором генерацию импульсов с длительностью 19 нс и энергией 7,7 мДж. Значения получены на центральной длине волны 830 нм. В связи с широкой линией усиления активной среды актуальной является перестройка центральной длины волны. Приведены измерения энергии в диапазоне 825-865 нм (рис. 2б).

[1] Samad R.E., Nogueira G.E.C., Baldochi S.L., Vieira N.D., *Applied Optics*, **45**, №14, 3356-3360, (2006).

[2] Петров В.М., Попов Е.Э., Погода А.П., *HOLOEXPO 2021: Тезисы докладов*, С. 77–83, (2021).

[3] Shimada T., Early J., Lester C., and Cockroft N., *Advanced Solid State Lasers*, T. Fan and B. Chai, eds.,

Vol. 20 of OSA Proceedings Series, paper TL3, (1994).

[4] Li D., Demirbas U., Benedick A., Sennaroglu A., Fujimoto J.G., Kärtner F.X., *Opt. Express*, **20**, 23422-23435, (2012).

**ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЙ НАГРЕВ КРЕМНИЕВОГО ЗОНДА С
КОНТРОЛЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ГИГАНТСКОГО
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

Избасарова Э.А., Харинцев С.С.

Институт физики, КФУ, Казань, Россия

В данной работе исследуется тепловой отклик кремниевой оптической наноантенны на сфокусированное лазерное излучение небольших интенсивностей (до значения 5 МВт/см^2). Показано, что температура нагрева вершины зонда может достигать 1200°C .

Ключевые слова: оптический нагрев, термометрия КР, кремниевый зонд.

В последнее время возрос интерес к термоплазмонике, одной из перспективных областей термофотоники, которая занимается оптической генерацией тепла в наноструктурах. Одним из возможных практических применений является фотоиндуцированный нагрев наноразмерных структур, например, в фототермической терапии рака [1], детектировании локальных фазовых переходов [2], термоассистируемой магнитной записи информации [3] и т.п. Для данных приложений обычно используются плазмонные наночастицы, которые состоят из металла, а он в свою очередь имеет большую теплопроводность. Поэтому решение данной задачи является весьма нетривиальным, так как существует проблема в управлении потоками тепла и локализации тепла в пространстве. Возникает идея: достичь высокой эффективности преобразования электромагнитной энергии в тепло, но уже без использования плазмоники, например в полупроводниках. В связи с этим мы исследуем нагрев внутри кремниевых структур, которые обладают меньшей теплопроводностью чем металлы и могут нагреваться до температур, при которых может происходить даже их разрушение [4].

Объектом исследования данной работы являются явления локального фотоиндуцированного нагрева, а также их механизмы, которые обеспечивают точное позиционирование и контроль температуры в режиме реального времени. Для реализации данной цели было проведено теоретическое и экспериментальное исследование теплового отклика вершины кремниевого кантилевера, широко используемого в сканирующей зондовой микроскопии, при освещении лазерным излучением малой интенсивности. В ходе эксперимента зонд находился в полуконтакте с подложкой. При расположении зонда над стеклянной подложкой, было установлено, что острие зонда нагревается, но незначительно, примерно на $\Delta T \sim 70 \text{ K}$. Иная же ситуация происходит, когда кремниевый зонд взаимодействует с золотой пленкой толщиной 50 нм , нанесенной на стекле. В этом случае температуры вершины кантилевера достигают значения около 1200°C при средней лазерной накачке (5 МВт/см^2). Температура определялась методом термометрии в спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР). Более детальный анализ механизмов аномального фотонагрева был проведен с помощью численного моделирования. Изучив результаты анализа, было установлено, что высокотемпературный оптический нагрев может быть обусловлен возбуждением Ми резонанса, усиленного поверхностным плазмонным резонансом, возбужденным в золотой подложке.

В дальнейшем результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для исследования фазовых переходов в различных типах наноматериалов, таких как нанотрубки и кластеры, а также магнитных (ферромагнитных и антиферромагнитных) материалов с нанометровым пространственным разрешением. Кроме того, эта технология может быть использована для создания новых структурированных материалов с заданными свойствами с помощью локального термохимического нанокатализа, а также управления скоростью химических реакций в режиме реального времени.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-12-00066, <https://rscf.ru/project/19-12-00066/>.

[1] Bucharskaya A., Maslyakova G., Terentyuk G., Yakunin A., Avetisyan Y., Bibikova O., Tuchina E., Khlebtsov B., Khlebtsov N., Tuchin V., *Int. J. Mol. Sci.*, **17**, №8, 1295, (2016).

[2] Vasudevan R.K., Khassaf H., Cao Y., Zhang S., Tselev A., Carmichael B., Okatan M.B., Jesse S., Chen L.Q., Alpay S.P., Kalinin S.V., *Adv. Funct. Mater.*, **26**, №4, 478-486, (2016).

[3] Okamoto S., Kikuchi N., Furuta M., Kitakami O., Shimatsu T., *J. Phys. D-Appl. Phys.*, **48**, №35, 353001, (2015).

[4] Aouassa M., Mitsai E., Syubaev S., Pavlov D., Zhizhchenko A., Jadli I., Hassayoun L., Zograf G., Makarov S., Kuchmizhak A., *Appl. Phys. Lett.*, **111**, №24, 243103, (2017).

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАЗЛЕТА МИШЕНИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА**

Ракитина М.А.¹, Брантов А.В.^{1,2}, Глазырин С.И.^{1,2}

¹Физический институт имени Лебедева РАН, Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

В данной работе исследуется преплазма, возникающая при взаимодействии лазерного излучения с веществом. В зависимости от параметров лазерного импульса, полученная преплазма может оказывать существенное влияние на эффективность ускорения ионов.

Ключевые слова: лазерное ускорение ионов, разлет плазмы.

На текущий момент значительный интерес представляют собой эксперименты по генерации пучков высокоэнергетических ионов в связи с возможностью применения их в различных сферах (например, для создания медицинских изотопов или диагностики объектов). Контроль разлета мишени и подбор оптимальных параметров преплазмы может значительно увеличить эффективность ускорения ионов с тыльной стороны мишени. В ходе гидродинамических расчетов был исследован разлет мишени из алюминия под действием наносекундного лазерного импульса. Подобный импульс может возникать вследствие контраста при взаимодействии короткого фемтосекундного лазерного импульса с мишенью или создаваться специально, как дополнительный импульс, синхронизированный с основным. Было показано, что некоторые значения градиентов плотности преплазмы могут усиливать ускорение ионов [1, 2]. Цель данной работы — исследования профиля плотности плазмы при облучении мишени лазерным импульсом наносекундной длительности.

В ходе проведения расчетов использовались лазерные импульсы с интенсивностью от 10^8 Вт/см² до 10^{13} Вт/см², длительность варьировалась от 0.5 нс до 5 нс. В качестве материалов мишени рассматривались углерод, алюминий и титан. Моделирование проводилось в двумерной цилиндрической геометрии с использованием гидродинамического кода Эйлера типа. Профиль плотности преплазмы при интенсивностях $\geq 10^9$ Вт/см² можно представить в виде экспоненты с двумя характерными градиентами, описывающими разлет докритической плазмы (с плотностями ниже $0.1n_{cr}$, где n_{cr} – критическая плотность плазмы) и более плотной плазмы вблизи мишени (см. рисунок). Полученная функция, описывающая профиль плотности, записывается в следующем виде:

$$n(x) = n_1 \theta(\Delta x - x) \text{Exp} \left\{ -\frac{x}{dx_1} \right\} + n_2 \theta(x - \Delta x) \text{Exp} \left\{ -\frac{x}{dx_2} \right\}, \quad (1)$$

где θ – функция Хевисайда, Δx – точка, отвечающая переходу между двумя характерными градиентами, dx_1 и dx_2 – градиенты плотности плазмы.

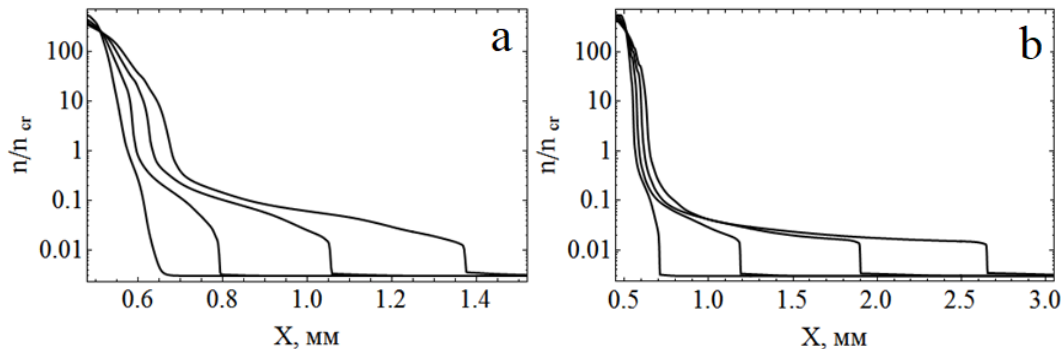


Рисунок. Профили плотности плазмы (n/n_{cr}) при разлете мишени из алюминия, облучаемой лазерным импульсом длительностью 0.5 нс с интенсивностью 10^9 Вт/см² (а) и интенсивностью 10^{10} Вт/см² (б) в моменты времени 5 нс, 10 нс, 15 нс, 20 нс слева направо

Проведенные вычисления показали, что при интенсивностях выше 10^{10} Вт/см² профили плотности разлетающейся плазмы почти не зависят от материала мишени ввиду быстрой ионизации (при более низких интенсивностях менее плотные мишени разлетаются быстрее), а также профили плотности плазмы и характерные градиенты становятся менее чувствительны к варьированию параметров лазерного импульса для одной и той же энергии при плотности энергии $\sim 10^4$ Дж и выше. В дальнейшем подобная низкоплотная слабо неоднородная плазма может использоваться для эффективного ускорения электронов мощным лазерным импульсом фемтосекундной длительности.

Работа выполнена при частичной поддержке Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 г. от 29.09.2021 № 2021-951-ФП5-3, соглашение № 075-15-2021-1361 от 07.10.2021 с Минобрнауки России.

[1] Daido H., Nishiuchi M., Pirozhkov A.S., *Rep. Prog. Phys.*, **75**, №5, 056401, (2012).

[2] Macchi A., Borghesi M., Passoni M., *Rev. Mod. Phys.*, **85**, №2, 751-793, (2013).

SCATTERING AMPLITUDE OF SURFACE PLASMON POLARITONS EXCITED BY INHOMOGENEITIES OF THE SURFACE OF A PLASMONIC MATERIAL

Dyshlyuk A.V.¹, Proskurin A.A.², Bogdanov A.A.^{2,3}, Vitrik O.B.¹

¹Institute of Automation and Control Processes (IACP) FEB RAS, Far Eastern Federal University (FEFU) and Vladivostok State University of Economics and Service (VSUES), Vladivostok, Russia

²School of Physics and Engineering, ITMO University, St. Petersburg, Russia

³Qingdao Innovation and Development Base of Harbin Engineering University, Qingdao, China

A problem of excitation of surface plasmon polaritons by scattering structures is solved analytically by a well-known method of waveguide theory based on calculation of guided mode amplitudes in the presence of current sources. The calculations are carried out for "point-like" structures both in 2D and 3D geometry and for sinusoidally perturbed plasmonic metal/vacuum boundary.

Keywords: surface plasmon-polariton, SPP scattering amplitude, SPP excitation, laser-ablated metal surfaces.

Unusual optical properties of laser-ablated metal surfaces result not only from the excitation of local plasmon resonances in nano- and microstructures produced by laser-processing but also from the mutual interaction of those structures through surface plasmon-polariton (SPP) waves [1]. This interaction provides a synergistic effect, which can make the optical properties of the composite nanostructure drastically different from the properties of its elements. At the same time, the prediction and analysis of these properties are hampered by the complexity of the analytical solution of the problem of SPP excitation by surface objects of arbitrary configuration. This problem can be solved analytically in a dipole approximation for small plasmonic nanoparticle on a metal substrate illuminated by a plane wave using the dyadic Green's function formalism [2, 3]. The amplitude of SPP can be extracted from total field scattered by the particle by calculating the residue at the pole of the Fresnel reflection coefficient. This method gives a good agreement with the full-wave numerical simulations but it is rather cumbersome and requires calculation of the Sommerfeld integrals.

In this work, we present a simple alternative way to calculate the contribution of SPP to the total field scattered by the plasmonic nanostructures on a metal substrate. Our method uses the Lorentz reciprocity theorem and mode orthogonality and is similar to that used in the waveguide theory for calculating the amplitude of the modes excited by a current distribution [4]. To demonstrate the efficiency of the proposed method we consider the cases of "point-like" sources both in 2D and 3D geometry, where SPPs are excited by an infinitely long cylindrical wire or a plasmonic sphere. Moreover, we have considered the more general case of surface plasmon excitation by an arbitrarily structured surface. We proceeded from the fact that this geometry can be considered as a superposition of harmonic Fourier components. In this case it remains to find the analytical solution to the problem of the excitation of surface plasmon polaritons upon scattering of light by a sinusoidally perturbed plasmonic metal/vacuum boundary. We show that this problem can be solved using the same method based on reciprocity theorem as for "point-like" sources.

In all the studied cases the obtained analytical solutions are compared with the results of numerical simulations. It is shown that analytical and numerical solutions agree almost perfectly for "point-like" sources of small radii. In the case of sinusoidally perturbed boundary, the analytical solution correctly predicts the optimum height of the corrugation (x_{opt}), providing the maximum SPP excitation efficiency. At the same time, the analytical and numerical values of the SPP amplitude agree very well when the corrugation height x turns out to be $x \ll x_{opt}$ or $x \gg x_{opt}$ (at least up to $3 x_{opt}$); at $x = x_{opt}$, the mismatch of those does not exceed 25%. The limitations of the analytical model leading to such a mismatch are discussed. We believe the presented approach is useful for modelling various phenomena associated with SPP excitation.

[1] Novotny Lukas, Hecht Bert. Principles of Nano-Optics. Publisher: Cambridge University Press, 537 p., 2006.

[2] Evlyukhin B. and Bozhevolnyi S.I., *Phys. Rev. B*, **71**, no. 13, p. 134304, (2005).

[3] Søndergaard T. and Bozhevolnyi S.I., *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, **69**, №4, pp. 1–10, (2004).

[4] Snyder A.W., Love J.D., Optical Waveguide Theory. Publisher: Chapman and Hall, 734 p., (1983).

ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ, КОМПОЗИТНЫХ
НАНОСТРУКТУР И ФАЗОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Маньшина А.А.

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлены процессы получения плазмонных, электрокаталитически активных наноструктур и оптических фазовых элементов, полученных под воздействием лазерного излучения в результате фото- и/или термохимических процессов.

Ключевые слова: лазерный синтез, фото-индуцированные химические процессы, термо-индуцированные химические процессы.

Благодаря созданию лазеров значительно расширился горизонт процессов и явлений, доступных для реализации в области химии. Химические процессы, которые невозможны при обычных условиях, могут быть инициированы за свет лазерного воздействия. В таком случае область протекания химической реакции – химический реактор может быть сформирован за счет лазерного пучка, где обеспечивается пространственная локализация химического процесса. При использовании импульсного режима лазерной генерации возможен контроль времени протекания химической реакции (временная локализация) за счет длительности лазерных импульсов и частоты их следования. Дополнительными легко контролируемыми параметрами является длина волны и интенсивность лазерного излучения. Таким образом, в области лазерного фокуса создаются уникальные условия с прецизионно заданными характеристиками и высоким пространственно-временным градиентом. Принимая во внимание то, что описанный химический реактор возможно создавать в различных средах – например, в жидкой фазе, твердом теле и на границе раздела их фаз, а также направленным образом выбирать свойства среды – химический состав, структуру, то разнообразие возможных химических процессов, индуцированных под воздействием лазерного излучения практически неограниченно. С учетом широких возможностей пространственно-временного ограничения лазерно-инициируемых химических процессов, такой подход открывает большие перспективы для синтеза наноразмерных и/или наноструктурированных материалов различной функциональности.

В работе будут продемонстрированы примеры лазерного синтеза для различных случаев – в жидкой фазе, твердом теле и на границе раздела их фаз. Благодаря лазерно-индуцированным процессам нам удалось получить металлические и композитные наноматериалы с плазмонными, электрокаталитическими свойствами (рисунок) [1-4]. Кроме того, будут продемонстрированы оптические фазовые элементы с высоким контрастом по показателю преломления за счет лазерно-индуцированной миграции компонентов в фосфатных стеклах различных составов [5].

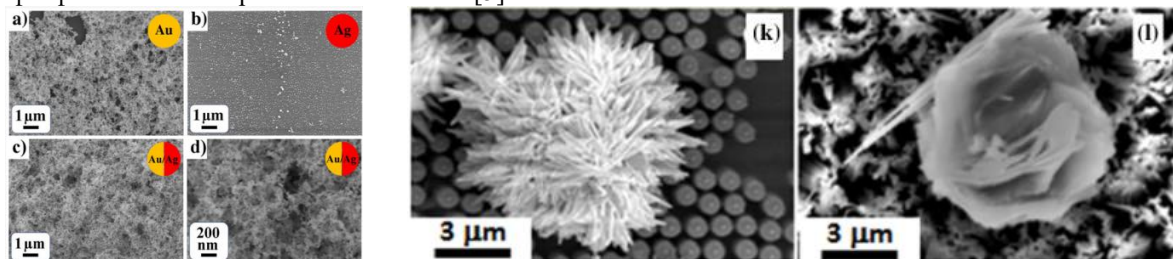


Рисунок. СЭМ изображения (a-d) моно и биметаллических наночастиц, (k,l) композитных Au-Ag@C наноструктур

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФ 23-49-10044. Исследования проводились с использованием оборудования Научного парка СПбГУ - Междисциплинарный ресурсный центр по направлению "Нанотехнологии", Оптические и лазерные методы исследования вещества.

- [1] Manshina A., Kolesnikov I., Mikhaiov M., *Acta Chimica Slovenica*, **63** (4), 850-855, (2016).
- [2] Butt M.A., et al, *Small*, **15** (18), 1900512, (2019).
- [3] Mamonova D.V., Vasileva A.A., et al, *Nanomaterials*, **12** (1), 146, (2022).
- [4] Povolotckaia A, Pankin D, Petrov Y, Vasileva A, Kolesnikov I, Sarau G, *Journal of Materials Science*, **54**, 8177-8186, (2019).
- [5] Dubov M., Mezentsev V., Manshina A.A., et al, *Optical Materials Express*, **4** (6), 1197-1206, (2014).

ЛАЗЕРНЫЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ НАНОФОТОННЫХ ЗАЩИТНЫХ МЕТОК

Кустов П.Н., Петрова Е.А., Понкратова Е.Ю.,
Сандомирский М.П., Ларин А.О., Агеев Э.И., Зуев Д.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Описаны нанопотонные метки для защиты от подделок, созданные лазерными методами и основанные на: фотолюминесценции кремния, легированного эрбием; нелинейной белой фотолюминесценции на гибридных металлодиэлектрических структурах; усиленном оптическом отклике резонансных наночастиц кремния.

Ключевые слова: лазерная фабрикация, нанопотоника, защитные метки.

Подделки представляют собой серьезную угрозу для глобальной экономики и социальной жизни. Бесконечная конкуренция между изготовителями поддельных товаров и производителями вызывает необходимость постоянного совершенствования технологий защиты. Поэтому разрабатываемые перспективные технологии стремятся объединить последние достижения науки от нестандартных методов фабрикации и материаловедения до информационных технологий и нанотехнологий. В работе представлены конструкции нанопотонных меток для защиты от подделок, созданные методами прямой лазерной записи. В качестве примера защитной метки, созданной по определенному шаблону записи описана защитная метка, основанная на фотолюминесценции кремния, легированного эрбием [1]. В этой конструкции fs-лазер используется для облучения двухслойной тонкой пленки Er/Si по заданной схеме, формирующей массив микроотверстий, формирующих скрытое изображение, образованное люминесценцией Er в ИК-диапазоне. Также демонстрируются примеры не поддающихся клонированию защитных меток. Один из подходов основан на гибридных металлодиэлектрических структурах, созданных прямой записью fs-лазером на двухслойной тонкопленочной поверхности Au/Si [2]. Нелинейная белая фотолюминесценция, присущая этим структурам, выбрана в качестве уникального свойства для создания защитных меток. Показано, что процедура декорреляции спектров позволяет достичь значения кодирующей способности 10^{437} в одном элементе метки. Также показан подход, основанный на технологии fs-лазерной печати резонансных наночастиц кремния, оптические свойства которых усилены за счет резонансов Ми [3]. Применение метода кластеризации K-средних обеспечивает высокое значение кодирующей способности до 10^{240000} для изображения размером 1000×500 пикселей.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030».

[1] Larin A.O., Dvoretckaia L.N., Mozharov A.M., Mukhin I.S., Cherepakhin A.B., Shishkin I.I., Ageev E.I., Zuev D.A., *Advanced Materials*, **33**, №16, 2005886, (2021).

[2] Ponkratova E., Ageev E., Trifonov P., Kustov P., Sandomirskii M., Zhukov M., Larin A., Mukhin I., Belmonte T., Nominé A., Bruyère S., Zuev D., *Advanced Functional Materials*, **32**, №41, 2205859 (2022).

[3] Kustov P., Petrova E., Nazarov M., Gilmullin A., Sandomirskii M., Ponkratova E., Yaroshenko V., Ageev E., Zuev D., *ACS Applied Nano Materials*, **5**, №8, 10548-10559, (2022).

СОЗДАНИЕ ДВУМЕРНЫХ РЕЛЬЕФОВ С УПРАВЛЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

**Синев Д.А., Ибрахим К., Суворов А.Р., Мухсинова Р.М.,
Москвин М.К., Андреева Я.М.**

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В настоящей работе исследованы режимы образования термохимических лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ТЛИППС) на тонких титана. Показана возможность управления топологическими характеристиками структур за счет изменения направления ориентации плоскости поляризации записывающего излучения при повторном экспонировании.

Ключевые слова: ТЛИППС, лазерная термохимическая запись, окисление титана, тонкие пленки титана.

В настоящей работе мы показываем простой и эффективный подход к созданию двумерных покрытий полностью управляемой топологии на основе высокоупорядоченных рельефов, самоорганизующихся под воздействием лазера, известных как термохимические лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ТЛИППС) [1]. Настоящая работа направлена на изучение особенностей механизмов возникновения ТЛИППС на тонких пленках титана на кварцевых подложках. Запись ТЛИППС производится с помощью Yb-волоконного коммерчески доступного лазерного источника «Минимаркер-2», для получения линейно поляризованного лазерного излучения использовалась призма Глана-Тейлора, при этом управление углом между осями симметрии 2D-решеток осуществлялось при повороте плоскости поляризации полуволновой пластиной в процессе сканирования на относительные углы α в диапазоне от 0° до 90° (рисунок). Анализ результатов формирования решеток показал, что при относительном угле поворота поляризации α от 0 до 32 градусов происходит формирование одномерной решетки, при α от 32 до 65 градусов можно наблюдать формирование двумерной гексагональной решетки (в таком случае Фурье-анализ показывает наличие трех периодов у образованной структуры), и наконец, при α от 65 до 90 градусов образуется ортогональная 2D-решетка с двумя периодами на 2D-БПФ спектре.

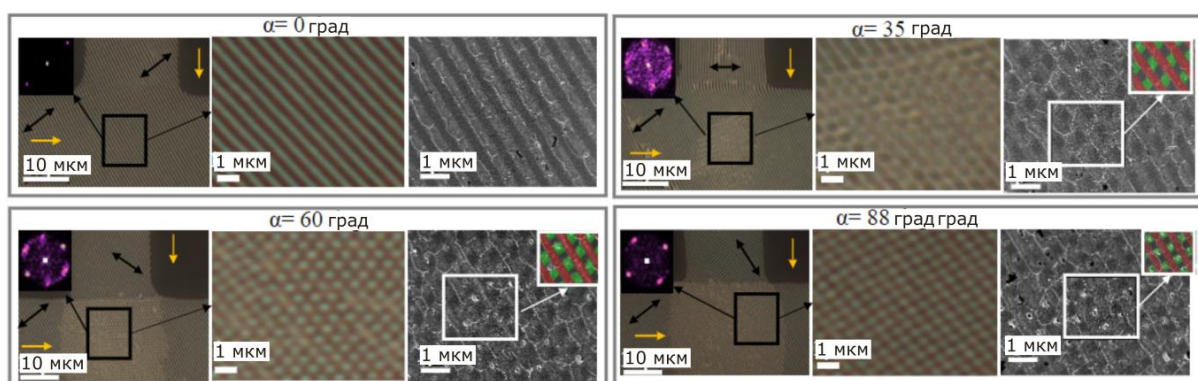


Рисунок. Результаты оптической и сканирующей электронной микроскопии периодических решеток, сформированных при различных относительных углах α

Работы выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №21-79-10241), а также при поддержке научной подготовки бакалавров, магистрантов и аспирантов в рамках выполнения НИР на базе Физико-технического мегафакультета Университета ИТМО (конкурс НИР МиА). Авторы благодарят ЦКП «Нанотехнологии» СПбГУ за помощь в проведении СЭМ-анализа, и ЦКП ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН за помощь в проведении ПЭМ-анализа.

[1] Sinev D.A., Yuzhakova D.S., Moskvin M.K., Veiko V.P., *Nanomaterials*, **10**, 2161, (2020).

**ЛАЗЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ
ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СТЕКОЛ: НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ**

Вейко В.П., Сергеев М.М., Заколдаев Р.А., Одинцова Г.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Разработаны лазерные методы управления смачиваемостью поверхности металлов и стекол для различных применений: создание микрофлюидных систем, защита от биообрастания в водной среде, уменьшение коррозионной стойкости и др.

Ключевые слова: лазерное структурирование, смачиваемость металлов и стекол, направленное течение жидкости.

Явление смачивания играет важную роль в жизни многих растений и животных, помогая им как добывать влагу, так и защищаться от ее избытков. Воссоздавая биомиметические структуры на поверхности деталей и приборов, мы можем придать им схожие свойства поверхности. Управляя смачиваемостью поверхности металлов и стекол, мы можем влиять на другие функциональные свойства: супергидрофильная поверхность металлических имплантатов способствует адгезии белков на начальных этапах остеоинтеграции [1], а повышение гидрофобности на поверхности металлических изделий, создание так называемых «slippery» покрытий, придает поверхности антибактериальные свойства [2]. Гидрофобные свойства поверхности стали и алюминия приводят к уменьшению их биообрастания в водной среде за счет снижения адгезии микроорганизмов [3] и способствуют защите от коррозии в воздушной среде с высокой влажностью [4].

В данной работе мы предлагаем использовать лазерное воздействие как средство управления смачиваемостью поверхностей металлов и стекол. В отличие от традиционных химических и механических методов лазерная обработка обеспечивает локальность (возможность создавать локальные области с различными углами смачивания), экологичность (возможность изменять углы смачивания без использования дополнительных материалов) и бесконтактный подход. Мы изучаем влияние лазерно-индуцированного рельефа на смачиваемость поверхности с целью минимизировать биообрастание на стальных поверхностях в водной среде и повысить коррозионную стойкость стали в воздушной среде с высокой влажностью. Показано формирование устойчивого гидрофобного градиента смачивания на поверхности стали, что способствует движению капель со скоростью 33 мм/с на расстояние 12 мм. Также продемонстрирована технология лазерной записи микрофлюидных систем на кварцевом стекле для биохимических приложений.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030».

[1] Cunha A., Zouani O.F., Plawinski L., Botelho do Rego A.M., Almeida A., Vilar R., Durrieu M., *Nanomedicine*, **10**, №5, 725-739, (2015).

[2] Fadeeva E., Chichkov B., *Applied Sciences*, **8**, №9, 1424, (2018).

[3] Yu Y., Wei Y., Li B., Gao H., Liu T., Luan X., Qiu R., Ouyang Y., *Surfaces and Interfaces*, **34**, 102363, (2022).

[4] Ijaola A.O., Farayibi P.K., Asmatulu E., *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **83**, 103544, (2020).

ОПТИЧЕСКАЯ МЕТРОЛОГИЯ

**МОДЕЛЬ ОПТОВОЛОКОННОГО СЕНСОРА СИЛЫ ТОКА НА ОСНОВЕ
ГЕРМАНИЕВОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА**

Янукович Т.П., Исмаилова А.С.

БГУ, г. Минск, Республика Беларусь

Проведено моделирование работы сенсора силы тока, использующее деформацию под действием силы Ампера. Модель сенсора основана на трехволновом взаимодействии при вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна. Исследовано значение передаточной функции, рассмотрены различия температурного и деформационного воздействия.

Ключевые слова: оптическое волокно, сенсор, сила тока.

Измерение силы тока при больших его значениях требуют создания специального оборудования в связи с тем, что оно должно быть развязано по питанию с источником измеряемого тока. В этом смысле применение оптических методов измерения силы тока становятся приоритетной задачей. Сигнал в оптическом волокне не подвержен электромагнитным помехам и может быть передан на большое расстояние.

На основе вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна разрабатывается класс распределенных сенсоров, позволяющий измерять температуру и деформацию оптического волокна, а также местоположение этого взаимодействия. Настоящая работа посвящена построению модели такого взаимодействия в германиевом оптическом волокне. Моделирование работы сенсора производится с использованием трехволнового взаимодействия: оптического излучения накачки, пробного излучения и акустической волны. Рассеяние является резонансным процессом и имеет характеристическую частоту, которая зависит от свойств оптического волокна, в частности от температуры и деформации. Изменение характеристической частоты рассеяния позволяет фиксировать изменение свойств волокна. Кроме этого, такие сенсоры позволяют измерять не только воздействие величины, но и ее местоположение, что не могут обеспечить оптоволоконные сенсоры, работающие на других принципах. При моделировании данного сенсора применяется метод бриллюэновского оптического частотного домена, который позволяет уменьшить влияние спонтанного рассеяния на результат измерений [1].

В качестве чувствительного элемента используется одномодовое оптическое волокно, покрытое проводящей оболочкой, закрепленное вдоль проводника с током. При пропускании тока по проводящей оболочке между шиной и оболочкой волокна возникает сила Ампера, она вызывает деформацию оптического волокна.

При использовании оптического волокна на основе GeO_2 значение коэффициента усиления рассеяния изменяется в зависимости от воздействующей величины. Данные об изменении коэффициента усиления были учтены при моделировании работы сенсора и исследовании передаточной функции. Величина передаточной функции s различна для изменения температуры и деформации из-за различных коэффициентов усиления (рисунок), что позволяет разделить паразитный температурный сигнал и полезный деформационный.

Разрешающая способность по определению местоположения воздействия составляет 0,06 м и зависит от частоты модуляции пробного оптического излучения.

Проведенное моделирование позволило возможности использования данного сенсора. Так, при прохождении тока по оболочке, покрывающей оптическое волокно, оно будет нагреваться, и его характеристическая частота будет смещаться как из-за температуры, так и из-за деформации, вызванной силой Ампера. Повторное измерение с отключенным током в оболочке позволит и нахождение разности характеристических частот позволит сделать измерения не зависящими от температуры.

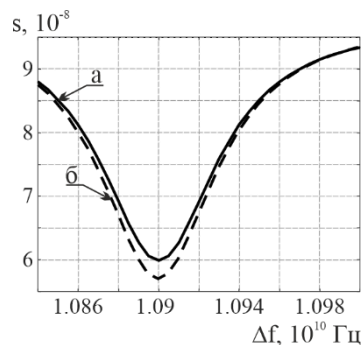


Рисунок. Зависимость передаточной функции s от разности частот накачки и пробного сигнала Δf в случае деформационного (а) и температурного (б) воздействия

[1] Янукович Т.П., Исмаилова А.С., *Компьютерные технологии и анализ данных (CTDA '2022): материалы III Междунар. науч.-практ. конф.*, Минск: БГУ, с. 257-260, (2022).

РЕЗОНАТОРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ – СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Венедиктов В.Ю.^{1,2}, Филатов Ю.В.², Шалымов Е.В.^{1,3}

¹Университет СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

²Университет СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

³Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Обзор посвящен оптическим резонаторным гироскопам. Изложена идея, лежащая в основе этого типа гироскопов. Рассмотрены основные подходы к их конструкции и способу определения угловой скорости.

Ключевые слова: кольцевые оптические резонаторы, пассивные гироскопы, конфокальный резонатор, резонатор мод шепчущей галереи.

Оптические гироскопы (кольцевые лазерные гироскопы и волоконно-оптические гироскопы), стали основой для бесплатформенных инерциальных навигационных систем благодаря ряду преимуществ (большой динамический диапазон измеряемых скоростей; высокая стабильность масштабного коэффициента, нечувствительность к ускорению и перегрузкам; меньшая временная готовность и т.д.). Несмотря на успехи в их разработке, кольцевые лазеры и волоконно-оптические гироскопы непригодны для использования в системах управления небольшими портативными устройствами из-за их больших размеров, веса и стоимости. Разработка дешевых и миниатюрных (~ 1 см) гироскопов является одной из важнейших задач в области разработки навигационного оборудования и ориентации. Сейчас эта область занята различными видами микромеханических гироскопов, но, даже лучшие из них обладают чувствительностью на два порядка ниже чувствительности оптических гироскопов. Они чувствительны к линейным ускорениям и различным видам механических нагрузок. Оптические гироскопы свободны от этих ограничений. Итак, сейчас актуальной задачей является миниатюризация оптических гироскопов, или разработка и исследование микрооптических гироскопов.

Данная работа посвящена обзору современного состояния разработки микрооптических гироскопов на основе пассивных кольцевых резонаторов [1]. В течение последнего десятилетия основные работы в области разработки микрооптического гироскопа были сосредоточены на схеме устройства, основанной на использовании пассивных кольцевых одномодовых резонаторов, которые обычно изготавливаются с использованием планарных интегральных оптических технологий. Такие микрооптические гироскопы имеют размеры, сравнимые с микромеханическими гироскопами (10-100 мм²), с теоретической чувствительностью, превышающей микромеханическую и приближающейся к их гораздо более крупным собратьям – лазерному гироскопу и волоконно-оптическому гироскопу. Микрооптические гироскопы, как и микромеханические, могут быть изготовлены на одной интегральной схеме, но, в отличие от микромеханических гироскопов, у них нет движущихся частей.

Мы представим некоторые результаты разработки и исследования микрооптических гироскопов, полученные нашей командой. В настоящее время все подходы к проектированию микрооптических гироскопов используют только амплитудные характеристики для определения угловой скорости. Наши результаты показывают, что для достижения той же цели можно использовать фазовые характеристики. Фазовые характеристики кольцевого интерферометра имеют особенности вблизи собственных частот резонатора, что позволяет использовать их для измерения скорости вращения. Можно сконструировать микрооптические гироскопы, которые используют только фазовую характеристику кольцевого интерферометра, а также и такие, что используют совместно фазовые и амплитудные характеристики. Мы предлагаем новый подход к конструкции и принципу работы резонаторного микрооптического гироскопа за счет использования модулятора Маха-Цендера, одно из плеч которого подключено к пассивному кольцевому резонатору. В работе приведены оценки максимально достижимой чувствительности. При низких потерях использование фазовой характеристики с модулятором Маха-Цендера позволяет увеличить максимально достижимую чувствительность почти на порядок.

Резонаторы с использованием мод шепчущей галереи также могут использоваться в качестве чувствительного элемента гироскопа. Это обусловлено их высочайшими коэффициентами оптической добротности, малым объемом собственных мод, компактностью и простотой изготовления. В данной работе мы рассматриваем эффекты, возникающие в резонаторе мод шепчущей галереи при его вращении, и возможные способы их применения в качестве чувствительного элемента микрооптического гироскопа.

Пассивные кольцевые резонаторы рассматриваются как наиболее перспективные чувствительные элементы для дешевого и технологически простого микрооптического гироскопа для массового производства. Обычно одномодовые плоские волноводы считаются единственно возможной технологией для реализации таких устройств. Однако наш анализ показывает, что в некоторых случаях конфокальный кольцевой резонатор, характеризующийся вырождением поперечных мод, может быть лучшей альтернативой для подобного устройства. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант №FSEE-2020-0005).

[1] Венедиктов В.Ю., Филатов Ю.В., Шалымов Е.В., *Квантовая электроника*, **46**, 437-446, (2016).

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОТКЛОНЕНИЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПЗС КАМЕРЫ

Кирсанов А.В., Кузьмин И.В., Мухин И.Б., Чернов В.В.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

Проблемами многокаскадных лазерных установок являются отклонения луча от заданного направления распространения и искажения структуры поля. Представлены анализатор на основе ПЗС камеры и результаты его применения для решения этой задачи.

Ключевые слова: лазеры, отклонение излучения.

В лазерных установках высокого уровня мощности [1] приходится регулярно контролировать состояние оптических элементов, а также направление распространения и распределение интенсивности излучения. Это связано с тем, что существенными проблемами таких комплексов являются тепловые уходы и вибрации как оптических элементов, так и обеспечивающей аппаратуры и механизмов.

С целью определения источников угловых отклонений и их минимизации был разработан анализатор с ПЗС камерой, принципиальная схема которого показана на рис. (а). Анализируемое излучение (1) попадает на входное отверстие, сразу за которым расположена входная диафрагма (2). Далее полупрозрачное зеркало (3) разделяет излучение на два луча. Первый луч непосредственно направляется на ПЗС матрицу (4) для контроля отклонений по линейным координатам. Для контроля угловых отклонений служит второй луч. Он попадает на ПЗС камеру после прохождения линзы с фокусным расстоянием 1.5 м (5) и системы зеркал (6). Матрица камеры находится в фокусной плоскости линзы. Система зеркал служит для формирования оптической складки, делая оптическую систему компактной при сохранении высокой точности анализируемых угловых отклонений.

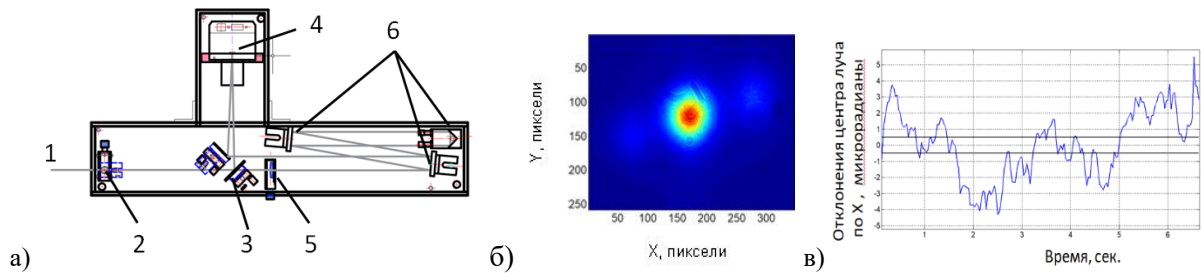


Рисунок. а) Схема анализатора угловых колебаний. (1) – анализируемое излучение; (2) – входная диафрагма; (3) – полупрозрачное зеркало; (4) – ПЗС камера; (5) – линза с фокусным расстоянием 1500 мм; (6) – система зеркал. б) Распределение интенсивности лазерного луча на ПЗС матрице. в) Смещение центра луча по координате X во времени

На рис. (б) представлено распределение интенсивности на ПЗС матрице. На рис. (в) показан пример измерений отклонений центра луча в зависимости от времени, где координаты центра луча по X и Y определяются как:

$$X_c = \sum_{n,m=1}^{N,M} nI_{n,m} / \sum_{n,m=1}^{N,M} I_{n,m}, Y_c = \sum_{n,m=1}^{N,M} mI_{n,m} / \sum_{n,m=1}^{N,M} I_{n,m}, \quad (1)$$

где $I_{n,m}$ – величина яркости в пикселе с порядковыми номерами n и m по столбцам и строкам матрицы яркостей; N и M – общее число столбцов и строк матрицы яркостей.

На графике рис. (в) видно сравнительно высокое разрешение прибора, поскольку для используемой в эксперименте скоростной (160 кадров в секунду) видеокамеры XIMEA MC023MG условный пиксель составляет 12.7 мкм и принятой точности определения центра пучка на матрице камеры порядка 0.03-0.1 от величины пикселя. Скорость записи в 160 кадров в секунду позволяет достоверно анализировать спектр отклонений в частотном диапазоне от 0 до 80 Гц по теореме Котельникова [2]. Основные отклонения направления лазерного излучения находятся в этом диапазоне. Подготовлено оборудование, позволяющее динамически стабилизировать направление лазерного излучения с большим запасом по частоте удержания и с диапазоном стабилизации шириной 1 мкрад, что показано прямыми линиями на рис (в). В ближайшее время работа будет продолжена.

Работа выполнена в рамках Государственного научного задания Института прикладной физики Российской академии наук (№ тем FFUF-2021-0029 и FFUF-2021-0011).

[1] Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N. et al., Preprint #720. IAP RAS, (2006).

[2] Биккенин Р.Р., Чесноков М.Н., Теория электрической связи. - М.: Академия, 329, (2010).

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ СЕНСОРЫ НА БАЗЕ ОПТИЧЕСКИХ
МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СТЁКОЛ

Марисова М.П., Андрианов А.В., Анашкина Е.А.

ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия

Теоретически исследованы температурные микросенсоры на базе оптических микрорезонаторов с модами шепчущей галереи (МШГ) из различных стёкол. Показано, что температурная чувствительность практически не зависит от размера микрорезонатора и структуры МШГ.

Ключевые слова: микрорезонаторы с модами шепчущей галереи, термо-оптический эффект.

Оптические микрорезонаторы с модами шепчущей галереи (МШГ) находят широкое применение как в фундаментальной науке, так и в приложениях, среди которых высокочувствительное детектирование различных величин играет значительную роль [1]. Термо-оптические эффекты очень важны при рассмотрении микрорезонаторов с МШГ, так как характерные величины частотных сдвигов резонансов обычно превышают ширины резонансных линий на несколько порядков. Высокая чувствительность резонансных частот МШГ к изменениям температуры может быть использована для создания температурных сенсоров. Настоящая работа посвящена исследованию характеристик таких устройств на основе микросфер из различных оптических стёкол: кварцевого (SiO_2), германатного (GeO_2), теллуридного ($\text{TeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$, далее TWL) и двух видов халькогенидных (As_2S_3 и As_2Se_3).

Электрическое поле МШГ микросферы преимущественно сконцентрировано в «экваториальной» области микрорезонатора; распределение модуля электрического поля типичной фундаментальной МШГ показано на рис. (а, б). При изменении температуры T резонансная длина волны МШГ λ смещается за счёт двух эффектов: эффекта теплового расширения, приводящего к изменению размеров микрорезонатора, и термо-оптического эффекта, который соответствует зависимости показателя преломления стекла от температуры. Был разработан численный код для поиска собственных частот МШГ с учётом температурных и спектральных зависимостей параметров стёкол [2]. Результаты расчётов температурной чувствительности $d\lambda/dT$ фундаментальной МШГ в широком диапазоне температур показаны на рис. (в). Было получено, что чувствительность рассматриваемых микросенсоров практически не зависит от радиуса микрорезонаторов, что проиллюстрировано на рис. (г). Наибольшая чувствительность достигается для халькогенидных As_2Se_3 и As_2S_3 микросфер: при комнатной температуре на длине волны излучения 1.55 мкм она составляет 57 пм/К и 36 пм/К, соответственно, что в несколько раз больше, чем для стандартных кварцевых микросфер (9.4 пм/К).

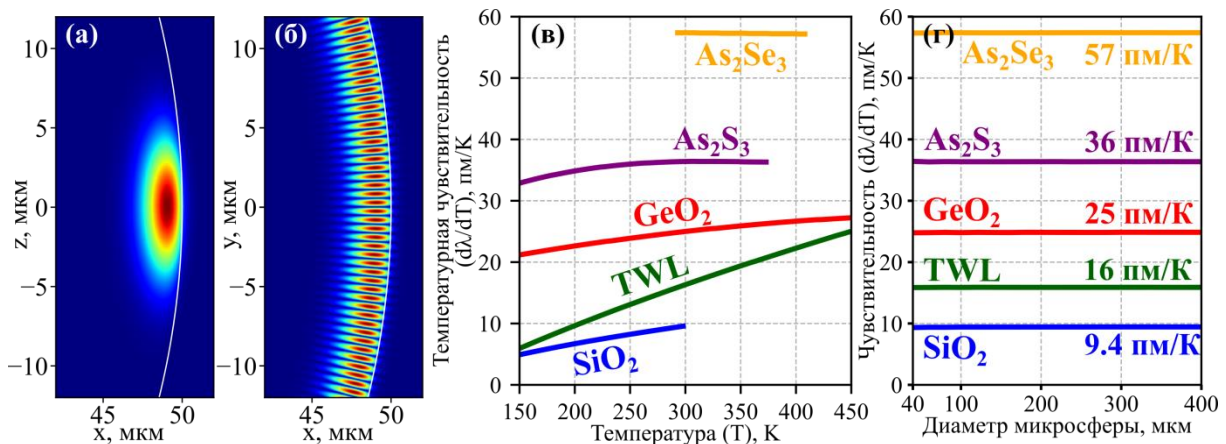


Рисунок. (а, б) Вид поля типичной фундаментальной МШГ микросферы диаметром 100 мкм в «меридиональной» (а) и «экваториальной» (б) плоскостях. (в) Рассчитанная температурная чувствительность микросфер диаметром 200 мкм как функция температуры. Ограничения по горизонтальной оси связаны с доступностью данных в литературе. (г) Рассчитанная температурная чувствительность при комнатной температуре как функция диаметра микросферы

Были также проведены расчёты $d\lambda/dT$ для МШГ различной структуры и поляризации; показано, что относительные отличия не превышают 1% для мод с небольшим числом радиальных вариаций. Роль слабых деформаций микрорезонатора также была оценена как незначительная, дано теоретическое объяснение [2]. Эти свойства очень важны для создания микросенсоров, так как иллюстрируют их устойчивость к несовершенствам процессов изготовления и измерения.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант 20-72-10188П.

[1] Jiang X., Qavi A.J., Huang S.H., Yang L., *Matter*, **3**, 371–392, (2020).

[2] Marisova M.P., Andrianov A.V., Anashkina E.A., *Sensors*, **23**, 717, (2023).

**ВЫСОКОКОНТРАСТНЫЕ СУБДОПЛЕРОВСКИЕ РЕЗОНАНСЫ
В ПАРАХ АТОМОВ ЦЕЗИЯ В ПОЛЕ ВСТРЕЧНЫХ
БИХРОМАТИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ**

Михайлов А.М.^{1,2}, Бражников Д.В.^{1,2}

¹Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

В настоящей работе с помощью формализма неприводимых тензорных операторов проведён теоретический анализ нелинейных резонансов в парах атомов цезия в поле встречных бихроматических лазерных пучков. Полученные результаты могут быть использованы для создания миниатюрных оптических стандартов частоты.

Ключевые слова: субдоплеровская спектроскопия, когерентное пленение населённости, оптические стандарты частоты.

Создание высокостабильных стандартов частоты и времени – важное направление современной метрологии. В настоящее время наиболее стабильные и точные стандарты частоты и времени основаны на принципах квантовой физики – квантовые стандарты частоты (КСЧ). Среди различных стандартов частоты, развиваемых на сегодняшний день, можно выделить несколько направлений, связанных с их габаритами: лабораторные (или стационарные), транспортируемые, компактные (например, для установки на большие спутники) и миниатюрные, замещающие объём не более 100 см³. При этом, в связи с трудностями переноса стабильности частоты из оптического диапазона в радиодиапазон, а также низким качеством резонансов в оптической области при использовании миниатюрных газовых ячеек, направление, связанное с миниатюрными оптическими КСЧ, долгое время не развивалось. Эта ниша была занята КСЧ микроволнового диапазона на основе явления когерентного пленения населённости (КПН) или двойного радиооптического резонанса (ДРОР). Существенный прогресс в миниатюризации КСЧ оптического диапазона наступил около пяти лет назад после публикации серии работ [1-3] исследователями из NIST (г. Болдер, США), в которых была использована двухфотонная оптическая спектроскопия атомов рубидия в микроячейке и был предложен способ переноса стабильности в радиодиапазон с помощью твердотельных микрорезонаторов.

В 2016 году группой французских исследователей было продемонстрировано [4], что при использовании встречных двухчастотных пучков с ортогональными линейными поляризациями в парах атомов цезия наблюдаются субдоплеровские резонансы с необычно высокими контрастом и отношением амплитуда/ширина, которое особенно важно для достижения высокой стабильности частоты оптического КСЧ. В следующей работе [5] при участии российских учёных было предложено использовать эти субдоплеровские резонансы для создания оптического КСЧ с использованием микроячейки с парами цезия.

Несмотря на успешную экспериментальную реализацию субдоплеровской спектроскопии в бихроматических пучках, теория самих резонансов ограничивалась либо численными расчётами [5], либо аналитическими расчётами, но для упрощённой трёхуровневой модели атома (Λ -схема) [6]. В настоящей работе нами рассматривается реальная структура уровней энергии в атоме цезия (в D_1 -линии) как с учётом различных процессов релаксации в атоме, так и с учётом произвольных эллиптических поляризаций встречных пучков. С помощью формализма поляризационных моментов (неприводимых тензорных операторов) и теории возмущений было получено аналитическое выражение для показателя поглощения одного из встречных пучков (пробного). Это выражение позволяет выделить различные нелинейные оптические эффекты, формирующие результирующий контур поглощения света, и сравнить их относительный вклад. В частности, было показано, что за образование высококонтрастного нелинейного пика в поглощении ответственны два типа КПН-состояний в атоме: первый тип зависит как от координаты вдоль светового луча, так и от параметров поляризации, тогда как второй тип – только от параметров поляризации пучков. Также было продемонстрировано, что при некоторых условиях резонанс может приобретать асимметрию и сдвиг, что важно для метрологических приложений. В целом, полученные результаты позволили дополнить знания о наблюдаемом эффекте высокого контраста субдоплеровских резонансов в бихроматических пучках и позволяют определить наилучшие условия для их применения в квантовой метрологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-12-00279).

[1] Hummon M.T. et al., *Optica*, **5**, №4, 443-449, (2018).

[2] Newman Z.L. et al., *Optica*, **6**, №5, 680-685, (2019).

[3] Maurice V. et al., *Opt. Express*, **28**, №17, 24708-24720, (2020).

[4] Hafiz M.A. et al., *Opt. Lett.*, **41**, №13, 2982-2985, (2016).

[5] Brazhnikov D.V. et al., *Phys. Rev. A*, **99**, №6, 062508, (2019).

[6] Михайлов А.М., Будю Р., Бражников Д.В., *ЖЭТФ*, **160**, №6, 818-834, (2021).

БЕСКОНТАКТНЫЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК ВИБРАЦИИ НА ОСНОВЕ АВТОДИННОГО ЭФФЕКТА В ЛАЗЕРНОМ ДИОДЕ

Рыбалтовский А.В., Ковалев А.В., Даниленко Г.О.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлено исследование разрабатываемого оптоэлектронного датчика на основе автодинного эффекта в лазерном диоде для измерения вибраций, который способного измерять частоту вибрации в диапазоне от 50 Гц до 9 кГц с погрешностью 3%.

Ключевые слова: оптоэлектронный датчик вибрации, автодинный эффект, лазерный диод.

Введение. В настоящее время существует множество конструкций и оборудования, имеющие ограниченный диапазон допустимых частот колебаний. Часто измерить вибрацию таких объектов контактным методом невозможно без их остановки, повреждения или нарушения техники безопасности [1]. Инновационным решением в области дистанционной вибродиагностики являются оптоэлектронные датчики вибрации, основным методом которых на сегодняшний день являются доплеровская виброметрия. В данной работе представлен оптоэлектронный датчик вибрации на основе автодинного эффекта в лазерном диоде (далее Изделие). Принцип работы Изделия основан на извлечении параметров вибрации из данных, полученных при облучении объекта вибрации и детектирование отраженного излучения от него. Основное преимущество данного метода заключается в использовании автодинного эффекта в лазерных диодах, который позволяет генерировать и детектировать излучение с помощью одного оптоэлектронного устройства – лазерного диода [2].

Цель исследования. Определить доверительный диапазон частот измерения вибраций.

Материалы и методы. В лабораторных условиях был спроектирован и собран макет Изделия. Проведен эксперимент с целью определения минимальной и максимальной измеряемой частоты вибрации с погрешностью 3%.

Результаты и обсуждение. Исследуемый макет Изделия состоит из: лазерного диода «ADL-65103TL», разработанного трансимпедансного усилителя, объектива, генератора сигнала, объекта вибрации, осциллографа и блока питания. Измерения проводились с шагом 100 Гц до 1 кГц и с шагом 1 кГц до 20 кГц. Как показывают результаты на рисунке, среднее SNR (signal-to-noise ratio) в диапазоне: от 50 до 150 Гц составляет 44 дБ, от 150 до 1 кГц 55 дБ, от 1 кГц до 4 кГц 52 дБ, от 4 кГц до 6 кГц 40 дБ, от 6 до 9 кГц 22 дБ, от 10 кГц полезный сигнал неотличим от шумов.

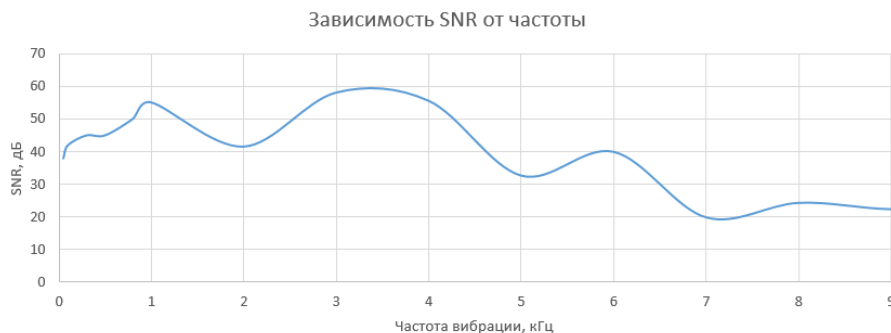


Рисунок. Зависимость SNR от частоты вибрации

Максимальное значение SNR достигается 58 дБ на частотах 600 Гц, 1 кГц и 3 кГц. Наблюдается резкое падение SNR с 40 на 20 дБ при увеличении частоты колебаний более 6 кГц. Предполагается, что появление пиков SNR вызвано неравномерностью амплитудно-частотной характеристики излучателя вибраций. Снижение SNR с увеличением частоты вибрации связано с обратной пропорциональностью зависимости частоты вибрации от амплитуды.

Выводы. Разработанный оптоэлектронный датчик вибрации на основе автодинного эффекта в лазерном диоде имеет высокий потенциал в вибрационной диагностике, что подтверждают полученные результаты в ходе проведенного эксперимента. Широкий диапазон измеряемых частот, компактность, портативность и бесконтактность являются основными преимуществами перед существующими решениями. Дальнейшая работа направлена на увеличение спектра измеряемых частот, а также получения следующих параметров вибрации: виброперемещение, виброскорость и виброускорение.

Исследование выполнено при проведении практико-ориентированных НИОКР №423020, финансируемых из централизованных средств Университета ИТМО.

[1] Fu Y. и др., *Acta Mechanica Sinica*, **37**, №4. С. 537-553, (2021).

[2] Giuliani G., Bozzi-Pietra S., Donati S., *Measurement Science and Technology*, **14**, №1, 24-32, (2002).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В
ФАНТОМНОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ

Агапов Д.П., Ивченко А.В., Магницкий С.А.

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

В работе впервые обсуждается возможность применения методов глубокого обучения в фантомной поляриметрии в формализме матриц Джонса. Предложена нейронная сеть, решающая обратную задачу фантомной поляриметрии.

Ключевые слова: корреляции, поляризация, глубокое обучение.

С развитием вычислительных мощностей интерес к разработке новых методов визуализации привлекает все больше внимания. В частности, в последнее время активно развивается фантомная визуализация («ghost imaging»). Это направление имеет множество ответвлений, одно из которых фантомная поляриметрия (ФП), т.е. измерение поляризационных свойств объектов методом фантомных изображений. Одним из ключевых моментов, определяющих эффективность интеллектуальных систем формирования и восстановления изображений, к которым с полным основанием можно отнести ФП, являются математические алгоритмы, используемые для обработки изображений. Среди них особого внимания, по нашему мнению, заслуживают основанные на глубоком обучении подходы.

В настоящей работе впервые изучается возможность использования нейронных сетей в ФП для формирования поляризационных изображений в классическом свете. Нам удалось определить тип анизотропии и восстановить элементы матриц Джонса объектов, обладающих различными анизотропными поляризационными свойствами [1].

Рассмотрена схема, в которой объект облучается пространственно структурированным поляризованным излучением, а прошедшее излучение регистрируется суммирующим детектором. При этом информация об объекте извлекается из корреляционной функции (1) между сигналом с детектора и виртуальным шаблоном освещения:

$$G(x, y) = \langle I_0 I(x, y) \rangle - \langle I_0 \rangle \langle I(x, y) \rangle, \quad (1)$$

где x, y - координаты в плоскости объекта, I_0 - сигнал с детектора, $I(x, y)$ - распределение интенсивности в шаблоне освещения.

Можно показать, что величина $G(x, y)$ пропорциональна пропускной способности объекта и в общем случае зависит от поляризации падающего излучения [2]. При описании свойств объекта в рамках формализма матриц Джонса оказывается, что полную информацию о его поляризационных свойствах можно получить из ограниченного набора корреляционных функций, измеренных в различных поляризационных базисах.

Нами разработана глубокая нейронная сеть (<https://github.com/AgapovDP/GPNN>), определяющая тип присущей объекту анизотропии, исходя из результатов измерений корреляционных функций интенсивности в различных поляризационных состояниях классического света. Продемонстрировано, что созданная нейронная сеть способна определить не только тип анизотропии, но и величину конкретных параметров анизотропии в формализме Джонса. В численном эксперименте вероятность предсказания типа анизотропии превышает 98% по метрике F1-score, а погрешность определения конкретных параметров анизотропии не превышает 0.7% тезисов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-12-00155).

[1] Savenkov S.N., Marienko V.V., Oberemok E.A., Sydoruk O., *Phys. Rev. E*, **74**, №5, 056607, (2006).

[2] Magnitskiy S., Agapov D., Chirkin A., *Optics Letters*, **45**, №13, 3641-3644, (2020).

БИОФОТОНИКА

**МУЛЬТИФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ
КОМПОЗИТНЫЕ ЧАСТИЦЫ В СОЧЕТАНИИ С МЕТОДАМИ ФОТОНИКИ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ**

Горин Д.А.

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

Установлено, что фотоакустический сигнал от наноструктурированных частиц (ядро, ядро/оболочка, оболочка), определяется концентрацией вещества, поглощающее лазерное излучение, и его расположением в структуре частицы (полимерной оболочке/внутреннем объеме оболочке - ядре). Наличие наночастиц оксида железа в структуре наноструктурированных композитных частиц позволяет обеспечить визуализацию методами фотоакустической микроскопии или томографии, а также МРТ. Кроме того, присутствие наночастиц оксида железа позволяет в оболочке использовать магнитное поле для их управляемой агрегации и перемещения.

Ключевые слова: тераностика, оптоакустика, мультимодальность, МРТ, УЗ контраст.

Современные наноструктурированные частицы (ядро/оболочка, оболочка), применимые в медицине, представляют собой мультифункциональные и мультикомпонентные системы, которые должны соответствовать следующим требованиям, а именно: 1) высокая загрузочная емкость и эффективность загрузки лекарства для обеспечения необходимой терапевтической дозы; 2) преодоление барьеров внутри организма, например гематоэнцефалического; 3) адресная доставка за счет применения антител, аптамеров или дарпинов; 4) реализация возможности визуализации данных систем *in vivo*, используя современные методы диагностики, такие как МРТ, флуоресцентная томография, фотоакустическая/флуоресцентная проточная цитометрия, томография и микроскопия, оптическая когерентная томография и т.д.; 5) обеспечение сенсорной функции, используя подходы жидкой и газовой биопсии; 6) контролируемое и дистанционное высвобождение лекарства. К методам, позволяющим получать такие частицы, относятся метод последовательной адсорбции [1-3], метод индуцированной кристаллизации адсорбции [2-5], и их комбинация [4]. Показано, что наличие неорганических наночастиц и/или органических красителя в составе структур ядро-оболочка и микрокапсул, позволяет использовать для визуализации фотоакустический метод [6-13]. Ядро может быть в газообразной [6, 7], жидкой [8] и твердой фазе [9]. Наличие жидкого или газообразного ядра обеспечивает ультразвуковой контраст [7, 8].

Установлено, что фотоакустический сигнал от капсул определяется концентрацией вещества, поглощающего лазерное излучение, и его расположение в капсуле (полимерной оболочке/внутреннем объеме - ядре) [1, 3, 10, 13]. Наличие наночастиц оксида железа позволяет обеспечить визуализацию композитных частиц методами ОА визуализации и МРТ [8, 12]. Кроме того, присутствие наночастиц оксида железа в составе капсул позволяет использовать магнитное поле для их управляемой агрегации и перемещения [5]. Контраст МРТ изображений оболочек (микрокапсул) можно изменять путем варьирования концентрации наночастиц железа, а значит и изменяя среднее значение между наночастицами оксида железа в нанокompозитной оболочке [11]. Обеспечить дистанционное высвобождение инкапсулированного лекарства можно с помощью высокочастотного сфокусированного ультразвука [12, 13].

Сочетание различных типов наноструктурированных частиц с современными инструментами фотоники и акустики имеет хорошие перспективы для создания новых мультифункциональных систем доставки лекарств, которые комбинируют диагностические и терапевтические модальности.

Настоящая работа поддержана Программой «Клевер»: Совместные проекты Сколтеха, МФТИ и ИТМО.

- [1] Mokrousov M.D. et al, *Biomedical Optical Express*, **10**, 9, 4775-4789, (2019).
- [2] Novoselova M.V. et al, *Colloids and Surface B: Biointerfaces*, **181**, 680-687, (2019).
- [3] Mokrousov M.D. et al, *Biomedical Optics Express*, **12**(6), 3181-3195, (2021).
- [4] German S.V. et al, *Scientific Reports*, **8**(1), 17763, (2018).
- [5] Vavaev E.S. et al, *ACS Applied Nano Materials*, **5** (2), 2994-3006, (2022).
- [6] Mujtaba J. et al, *Advanced Materials*, 2007456(1-40), (2021).
- [7] Barmin R.A. et al, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **219**, 112856, (2022).
- [8] Maksimova E.A. et al, *Laser & Photonics Reviews*, **17**, 2300137, (2023).
- [9] Noskov R.E. et al, *Adv. Mater.*, 2008484, (2021).
- [10] Novoselova M.V et al, *Photoacoustics*, 100186, (2020).
- [11] German S.V. et al, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **18**, 32238-32246, (2016).
- [12] Novoselova M.V. et al, *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, **47**, 102612, (2023).
- [13] Novoselova M.V. et al, *Colloids and Surfaces B*, 111576, (2021).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИИ КЛЕТОК НА ЛОКАЛИЗОВАННОЕ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Белашов А.В.¹, Жихорева А.А.¹, Буторин П.Н.¹, Беляева Т.Н.², Салова А.В.², Литвинов И.К.², Корнилова Е.С.², Семенова И.В.¹, Васютинский О.С.¹

¹Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты разработки метода локального фотодинамического воздействия на клетки с использованием LCOS SLM. Проведена оптимизация низкокогерентной голографической микроскопии SLM и анализ оптических характеристик клеток до и после фотодинамического воздействия.

Ключевые слова: голографическая микроскопия, фотодинамическое воздействие.

Фотодинамическое воздействие (ФДВ), основанное на внутриклеточной генерации активных форм кислорода, находит широкое применение при лечении широкого ряда онкологических и дерматологических заболеваний. При этом весьма важным фактором эффективности того или иного фотосенсибилизатора является его локализация в клетке, определяющая преимущественную область генерации активных форм кислорода и источника повреждений внутриклеточных структур. В связи с этим исследование вопроса об эффективности генерации активных форм кислорода в различных внутриклеточных органеллах весьма актуально и может дать новую информацию о протекающих внутриклеточных процессах в ходе ФДВ.

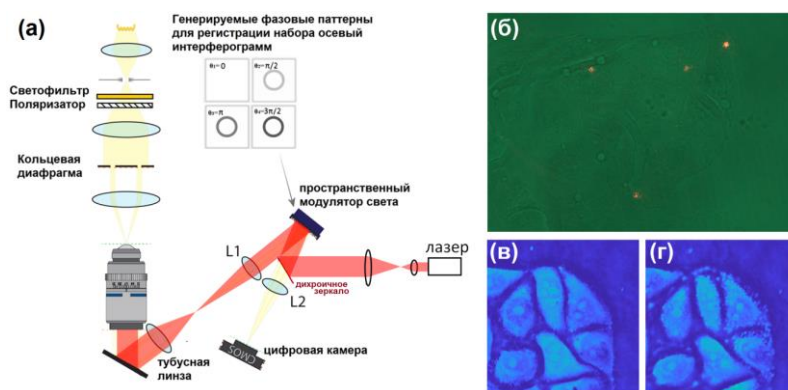


Рисунок. (а) - схема экспериментальной установки для реализации низкокогерентной голографической микроскопии, (б) – пример изображений клеток в проходящем (зеленом) свете с локальным воздействием лазерного излучения на длине волны 660 нм в четырех точках. Примеры фазовых изображений клеток (в) до и (г) после локализованного фотодинамического воздействия

Для эффективного мониторинга живых клеток нами был использован метод низкокогерентной голографической микроскопии, основанный на модификации фазово-контрастной микроскопии и регистрации нескольких фазово-контрастных изображений, осевых цифровых голограмм, соответствующих разному фазовому сдвигу опорной волны [1]. Для этого был использован пространственный модулятор света (LCOS SLM), позволявший сдвигать фазу опорной не рассеянной волны исходного светового конуса на $\pi/2$, π , $3\pi/2$ и 2π радиан. Численный анализ зарегистрированных при этом цифровых голограмм позволил восстановить распределения интегрального фазового набег, внесенного живыми клетками в проходящую волну. Кроме того, другая часть матрицы LCOS SLM была использована для генерации фазового паттерна, на котором дифрагировало лазерное излучение ($\lambda=660$ нм), что приводило к формированию заданного распределения интенсивности в плоскости образца (см. рис. (а)). Таким образом, нам удавалось локализовать лазерное излучение, поглощаемое фотосенсибилизатором в нужной области образца и осуществлять избирательное фотодинамическое воздействие на клетки. Иллюстрация локализованного воздействия на клетки в четырех областях представлена на рисунке (б), где изображения клеток представлены в проходящем свете зеленого спектрального диапазона, выделенного светофильтром, а красные точки соответствуют рассеянию лазерного излучения. Подобное воздействие на клетки детектировалось с помощью цифровой голографической микроскопии (рис. (а, в)), а на самих клетках в ходе этого воздействия отчетливо были видны пузыри и другие изменения морфологии, свидетельствующие о влиянии фотодинамического воздействия на клетки (рис. (г)).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-72-10044.

[1] Wang Z., Millet L., Mir M., Ding H., Unarunotai S., Rogers J., Popescu G. *Optics Express*, **19**, №2, 1016-1026, (2011).

**ГЕНЕТИЧЕСКИ КОДИРОВАННЫЕ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕТКИ
ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭНХАНСЕРОВ В ЖИВЫХ КЛЕТКАХ
ПРИ ПОМОЩИ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ МИКРОСКОПИИ**

Беседовская З.В., Путляева Л.В., Лукьянов К.А.

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

Данная работа описывает новый метод LiveMIEL. Метод позволяет использование генетически кодированных флуоресцентных меток для визуализации и анализа динамики эпигенетического ландшафта в живых клетках.

Ключевые слова: флуоресцентная микроскопия, эпигенетика, энхансеры.

Посттрансляционные модификации (метилование, фосфорилирование, ацетилирование и другие) в значительной степени влияют на структуру и функции хроматина, например, при процессах ремоделирования хроматина и экспрессии генов [1]. Подобные модификации в клетке обычно распознаются специальными ридерными доменами гистоновых модификаций, являющимися важными компонентами регуляторных белков и мультибелковых комплексов [2]. Одной из больших проблем в этой области остается недостаточное понимание конкретных функций хроматиновых модификаций в общей организации генома и их ответа на различные клеточные события.

В 2019 году профессором Терских и соавторами был разработан новый метод MIEL (Microscopic Imaging of Epigenetic Landscapes, "Микроскопическая Визуализация Эпигенетического Ландшафта") для анализа эпигенетических изменений на уровне отдельных клеток [3]. Данный метод основан на окрашивании гистоновых модификаций специфическими к ним антителами с последующим анализом изображений при помощи методов машинного обучения для классификации и сравнения эпигенетических ландшафтов. Была продемонстрирована применимость метода MIEL для обнаружения эпигенетических изменений в процессе дифференцировки клеток и при применении различных препаратов.

Нами разработан новый метод, LiveMIEL, производный от метода MIEL. LiveMIEL полагается на естественную специфичность ридерных доменов гистоновых модификаций по отношению к конкретным модификациям. Это позволяет разрабатывать уникальные генетически кодированные эпигенетические метки для визуализации и последующего компьютерного анализа динамики эпигенетического ландшафта определённых гистоновых модификаций в флуоресцентной микроскопии живых клеток.

Особое внимание в нашей работе уделяется изучению энхансеров, регуляторных элементов, активно взаимодействующих с промоторами генов и контролирующими их экспрессию. В отличие от промоторов, энхансеры могут выполнять регуляторные функции независимо от своего положения, ориентации или удаленности от своих целевых генов. Большие кластеры активных энхансеров, отвечающих за транскрипционную регуляцию генов, определяющих судьбу клетки, называются супер-энхансерами. Активные энхансеры и супер-энхансеры обогащены модификациями H3K4me1 и H3K27ac, в то время как неактивные содержат модификацию H3K27me3, которую клетке необходимо удалить перед активацией энхансера [4]. Мы используем эти особенности при разработке LiveMIEL проб для визуализации энхансеров и супер-энхансеров (рисунок).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-14-00141.

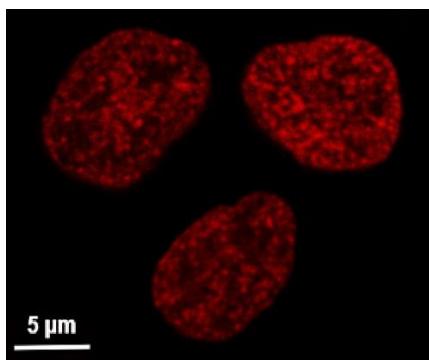


Рисунок. Флуоресцентные паттерны, демонстрирующие эпигенетические ландшафты H3K4me1 в ядрах клеток HEK 293T

[1] Sadakierska-Chudy A., Filip M., *Neurotox Res.*, **27**, 172–197, (2015).

[2] Musselman CA, Lalonde M-E, Côté J, Kutateladze TG, *Nat Struct Mol Biol.*, **19**, 1218–1227, (2012).

[3] Farhy C, Hariharan S, Ylanko J, Orozco L, Zeng FY, Pass I, Ugarte F, Forsberg EC, Huang CT, Andrews DW, Terskikh AV., *Elife*, **8**, e49683, (2019).

[4] Sharifi-Zarchi A, Gerovska D, Adachi K, Totonchi M, Pezeshk H, Taft RJ, et al., *BMC Genomics*, **18**, 964, (2017).

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВЫРАЩИВАНИЯ ЯЧМЕНЯ НА ЕГО
СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Буханов Е.Р.^{1,2}, Величко В.В.³, Липшин А.Г.⁴, Шихов В.Н.³, Сурин Н.А.⁴

¹ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

²ИФ им. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

³ИБФ ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

⁴КрасНИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

Фотосинтез у растений происходит в узкоспециализированной мембранной системе тилакоидов, внутри хлоропластов. Тилакоиды содержат молекулярные комплексы, осуществляющие управляемые светом реакции фотосинтеза и обеспечивающие среду для передачи энергии.

Ключевые слова: ПЭМ, флуоресценция, перенос электронов.

Благодаря процессу фотосинтеза, обеспечивающему жизнь для всего живого на планете, растения с давних пор являются пристальным объектом изучения для многих ученых. Сам процесс фотосинтеза происходит внутри хлоропластов – зеленых пластидахов, находящихся в самой толще листа. Хлоропласт представляет собой емкость, внутри которой находятся плотно упакованные стопки тилакоидов – полых, дисковидных пластин с характерным диаметром около 300 нм и толщиной около 20 нм. Именно в их покровном слое и происходит процесс фотосинтеза. Все остальное пространство хлоропласта заполнено полужидкой стромой. Самыми распространенными методами измерения параметров фотосинтеза являются измерения испускания флуоресценции фотосистемой II и измерение поглощения выхода CO₂. Помимо параметров фотосинтеза, методы флуометрии позволяют узнать множество других характеристик растения, одним из которых является скорость переноса электрона в системе.

В недавних работах был описан ряд структур, находящихся в растениях, период которых сравним с длиной волны видимого света. Подобные структуры принято называть биофотоннокристаллическими. Также как и фотонные кристаллы, они обладают рядом эффектов взаимодействия со светом. Одним из самых ярких явлений биофотонных кристаллов является структурная окраска [1].

Недавние достижения в электронной микроскопии привели к детальному пониманию трехмерной архитектуры этой уникальной биомембранной системы [2].

В качестве образцов были выбраны растения ячменя сорта «Емеля» селекции КрасНИИСХ, выращенные в полевых условиях и в контролируемых условиях интенсивной светокультуры. Данный сорт обладает высокими параметрами устойчивости к полеганию и засухе. Измерения параметров флуоресценции хлорофилла и газообмена флаговых листьев растений были выполнены *in vivo* при помощи системы изучения фотосинтеза в закрытой листовой камере с интегрированным в нее флуориметром. Также, данные листья прошли пробоподготовку [3] для просвечивающей электронной микроскопии в результате чего были получены снимки структуры их хлоропластов.

Результаты флуометрии показали, что величина максимального квантового выхода фотосистемы II в обоих исследованных вариантах находилась в диапазоне значений, характерных для нормального физиологического состояния растений [4]. В то же время, сравнение скорости электронного транспорта показывает разницу в 1.7 раза между полевым участком и вегетационной камерой в пользу последней. Такое существенное различие хорошо подтверждается результатами микроскопирования образцов тканей из флаговых листьев растений ячменя, выращенных в условиях интенсивной светокультуры в вегетационной камере и в естественных условиях на опытном поле. В хлоропластах клеток листьев ячменя, выращенных в условиях светокультуры, наблюдалась существенно более плотная и упорядоченная гранальная структура.

Данное исследование показывает четкую связь окружающей среды с упорядоченностью тилакоидных структур и как следствие с флуоресцентными показателями фотосинтеза.

Исследования электронной микроскопии были выполнены на оборудовании центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

[1] Sun J., Bhushan, B., Tong, J., *RSC Adv.*, **3**, 14862–14889, (2013).

[2] Engel B.D., Schaffer M., Cuellar L.K., Villa E., Plitzko J.M., Baumeister W., *Elife*, **4**, e04889, (2015).

[3] Гайер Г., *Электронная гистохимия*, Мир: Москва, Россия, 235–236, (1974).

[4] Lichtenthaler H.K., Buschmann C., Knapp M., *Photosynthetica*, **43**, 379–393, (2005).

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КРОВОПОТЕРИ НА ПЕРФУЗИЮ
ГОЛОВНОГО МОЗГА У КРЫС МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ
СПЕКЛ-КОНТРАСТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

**Голубова Н.В.¹, Рыжков И.А.², Лапин К.Н.², Серёгина Е.С.¹,
Дунаев А.В.¹, Дрёмин В.В.¹, Потапова Е.В.¹**

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

²НИИ общей реаниматологии им. В.А. Неговского ФНКЦ РР, Москва, Россия

В работе описывается применение метода лазерной спекл-контрастной визуализации для количественного определения церебральной перфузии у мелких лабораторных животных с оценкой влияния способа измерения и острой кровопотери на регистрируемые показатели мозгового кровообращения.

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

Острая кровопотеря (ОК) возникает при травмах или как осложнение различных заболеваний. ОК является критическим состоянием организма, запускающим комплекс общепатологических реакций, имеющих большую вариативность в зависимости от скорости и общего объема кровопотери, функциональных резервов организма и т.д. При недостаточности оказываемой помощи ОК может привести к летальному исходу [1]. Для усовершенствования тактики лечения подобных состояний необходимо понимать механизмы регуляции кровоснабжения органов. Особую опасность для организма представляет ОК с последующей ишемией головного мозга, а изучение механизмов регуляции мозгового микрокровоотока является нетривиальной задачей. На сегодняшний день лабораторная крыса является одним из наиболее часто используемых модельных организмов для изучения физиологии и патологии мозгового кровообращения, а оптические методы (такие как лазерная спекл-контрастная визуализация – ЛСКВ) позволяют не только визуализировать микроциркуляцию в области исследования, но и извлечь количественную информацию для дальнейшего анализа.

Цель работы заключалась в оценке церебральной перфузии у молодых особей крыс методом ЛСКВ без проведения краниотомии и с последующим её проведением, а также с моделированием ОК при осуществлении контроля физиологических параметров лабораторного животного.

Объектами исследования были выбраны лабораторные крысы линии Wistar возрастом 1,5 месяца. Исследования были одобрены Этическим комитетом Орловского государственного университета (протокол №27 от 17 мая 2023). Животные были разделены на 2 группы – ложнооперированные (краниотомия без кровопотери, 4 особи), и с ОК (краниотомия с кровопотерей 30% от объема циркулирующей крови, 5 особей). Протокол содержал 3 временные точки регистрации ЛСКВ-данных – после анестезии и катетеризации (исходное состояние), после осуществления краниотомии в левой теменной области, и после кровопотери (без кровопотери в случае ложнооперированных животных).

После анестезии животное подвергалось катетеризации левой сонной артерии для отслеживания артериального давления, а также для осуществления кровопотери и эвтаназии раствором лидокаина 2% 1 мл под общей анестезией в конце эксперимента. Далее животное помещалось на столик хирургической системы для грызунов Rodent Surgical Monitor+ для поддержания стабильной температуры тела, а также для контроля частоты сердцебиения. Голова животного фиксировалась в стереотаксисе, чтобы избежать артефактов движения. Для доступа к головному мозгу производилась экспозиция костей черепа. Регистрация изображений для каждого этапа эксперимента проводилась на протяжении 5 минут. Лазерный источник излучения LDM785 равномерно освещал область исследования через набор диффузоров. Обратный рассеянный свет регистрировался с помощью видеокамеры UI-3360CP-NIRGL. Линейный поляризатор перед объективом камеры был установлен для устранения бликов [2].

С помощью разработанного в среде Matlab алгоритма обработки ЛСКВ-данных были получены карты кровотока в церебральных микрососудах животных. Для анализа выбирались две области интереса (ОИ) в правом и левом полушарии головного мозга крысы, при этом в ОИ в правом полушарии на протяжении всех этапов эксперимента кости черепа не повреждались, тогда как в ОИ в левом полушарии перед вторым этапом эксперимента происходило истончение кости черепа (краниотомия). Полученные данные ЛСКВ-перфузии показали, что у животных без кровопотери уровень перфузии оставался относительно постоянным на всех этапах эксперимента для всех ОИ с учётом их специфики (с краниотомией или без). У животных с кровопотерей наблюдался неоднозначный ответ уровня перфузии на втором и третьем этапах эксперимента. Это может свидетельствовать о сложности и индивидуальности компенсаторных механизмов организма при ОК и требует дальнейшего изучения.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта No 22-75-10088.

[1] Мороз В.В., Рыжков И.А., *Obshchaya Reanimatol.*, **12**, №2, 20-43, (2016).

[2] Golubova N., Potapova E., Seryogina E., Dremin V., *Biomed. Signal Process. Control*, **85**, 104969, (2023).

**ИЗУЧЕНИЕ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА ПО ИХ
ЛИНЕЙНЫМ И НЕЛИНЕЙНЫМ УПРУГИМ СВОЙСТВАМ МЕТОДОМ
КОМПРЕССИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ЭЛАСТОГРАФИИ**

**Губарькова Е.В.¹, Киселева Е.Б.¹, Советский А.А.², Плеханов А.А.¹,
Воронцов Д.А.³, Рябков М.Г.¹, Багрянцев М.В.⁴, Бедерина Е.Л.¹,
Богомолова А.Ю.¹, Сироткина М.А.¹, Гладкова Н.Д.¹, Зайцев В.Ю.²**

¹Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Россия

²Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

³Нижегородский областной клинический онкологический диспансер, Нижний Новгород, Россия

⁴Городская клиническая больница №30, Нижний Новгород, Россия

Методом оптической когерентной эластографии были изучены линейные и нелинейные упругие свойства опухолевых (рак молочной железы) и неопухолевых (тонкая кишка) тканей, которые обеспечивают точное отличие злокачественных и воспалительных процессов от нормы.

Ключевые слова: компрессионная оптическая когерентная эластография, модуль Юнга, биологические ткани.

Упругие свойства мягких биологических тканей могут отражать их функциональное состояние и быть чувствительным показателем важных патологических процессов (в том числе малигнизации и воспаления). Развитие и применение новых высокоразрешающих прижизненных методов оптической визуализации, сопоставимых с морфологическим исследованием, может улучшить интраоперационную оценку наличия патологических процессов в различных биологических тканях в реальном времени в ходе хирургических операций. В данном исследовании представлены результаты применения компрессионной оптической когерентной эластографии (К-ОКЭ) для оценки упругих свойств и характера их изменения в зависимости от прилагаемого напряжения (компрессии) в тканях молочной железы и тонкой кишки в норме и при патологии.

Целью данного исследования было изучение различных состояний тканей человека в норме и при патологии по их линейным и нелинейным упругим свойствам методом К-ОКЭ.

Для исследования были использованы послеоперационные *ex vivo* образцы пациентов: опухолевой и неопухолевой тканей молочной железы, а также тонкой кишки в норме и при воспалении. Все образцы были изучены в течение 1-2 часов после резекции. В исследовании использовалась установка спектральной мультимодальной ОКТ (ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия) с центральной длиной волны 1310 нм, поперечным пространственным разрешением ~ 20 мкм, разрешением по глубине ~ 15 мкм, глубиной сканирования ~ 1,5 мм в ткани и скоростью сканирования 20 000 А-сканов/сек с частотой получения В-сканов 40 кадров/сек. Методом К-ОКЭ картирование деформации ткани основано на векторном подходе к оценке межкадровой вариации градиента фазы ОКТ-сигнала [1]. При этом на поверхность ткани накладывается калибровочный силиконовый слой с известной жесткостью, что позволяет вычислять абсолютные значения жесткости (модуль Юнга, кПа) в ткани и стандартизировать уровень давления на ткань [2]. Кроме того, были получены и проанализированы зависимости напряжения от деформации, жесткости от деформации и жесткости от напряжения для всех изученных типов тканей в норме и при патологии.

К-ОКЭ показывает значительные различия не только в значении модуля Юнга, но и в характере упругих откликов неопухолевой и опухолевой ткани молочной железы человека. К-ОКЭ показывает высокую корреляцию между морфологически выявленными структурными особенностями ткани молочной железы с характером упругого ответа - типичным для опухолевой ткани увеличением жесткости при сжатии. При К-ОКЭ исследовании стенки тонкой кишки было установлено, что методом К-ОКЭ можно визуализировать морфологические особенности строения кишечной стенки, а также детектировать изменения в толще слоев. Воспалительные процессы приводят к снижению модуля Юнга в слизистой оболочке и повышению его значений в мышечном слое.

Таким образом, методом К-ОКЭ было показано, что комбинация линейных и нелинейных упругих параметров оценки различных типов тканей позволяет значительно повысить точность определения состояния ткани при различных патологических процессах и отличать их от нормы.

Работы, связанные с исследованием тканей тонкой кишки, поддержаны грантом РФФИ №19-75-10096-П; работы по исследованию тканей молочной железы выполнены за счет гранта РФФИ № 18-75-10068.

[1] Matveyev A.L., Matveev L.A., Sovetsky A.A., Gelikonov G.V., Moiseev A.A., Zaitsev V.Y. *Laser Phys. Lett.*, **15**, 065603, (2018).

[2] Sovetsky A.A., Matveyev A.L., Matveev L.A., Gubarkova E.V., Plekhanov A.A., Sirotkina M.A., Gladkova N.D., Zaitsev V.Y., *Laser Phys. Lett.*, **17**, 065601, (2020).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЖИ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОСКОПИИ ДИФФУЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Давыдов Д.А.^{1,2,3}, Фадеев Н.А.¹, Баев А.В.¹, Будылин Г.С.^{2,3,4}, Ширшин Е.А.^{1,2}

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

²Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, Москва, Россия

³МНОЦ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия

С помощью спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением был разработан метод определения толщин дермы и гиподермы кожи. Верификация метода была проведена с помощью УЗИ. Ошибки определения толщины дермы и гиподермы составили 0.18 мм и 1.21 мм соответственно.

Ключевые слова: толщина гиподермы, толщина дермы, спектроскопия диффузного отражения.

В современной клинической практике (дерматологии, косметологии, пластической хирургии) востребованными являются объективные количественные оценки состава и структуры кожи. Для определения эффективности действия косметических средств может быть необходима информация о содержании воды в коже, распределении ее по глубине. Золотым стандартом в медицине по определению содержания воды и структуры кожи магнитно-резонансная томография (МРТ), но из-за высокой стоимости оборудования данный метод затруднительно использовать в клинике. Что касается измерения морфологии кожи и толщин слоев кожи, наиболее популярным методом измерения является метод ультразвуковой исследования (УЗИ). С помощью данного метода с высокой точностью можно определить толщину дермы, но при этом концентрацию воды, а также в некоторых случаях толщину гиподермы, в силу слабой эхогенности данного слоя определить невозможно.

Оптимальным решением задачи может стать метод на основе спектроскопии диффузного отражения (СДО) с пространственным разрешением (рис. А). Для исследования глубоких слоев кожи наиболее перспективным является спектральный диапазон от 800 нм до 1100 нм, который лежит в так называемом "окне прозрачности" для биологических тканей. В данном спектральном диапазоне присутствуют локальные максимумы поглощения на длинах волн около 930 нм и 970 нм, связанные с поглощением излучения липидами и водой соответственно (рис. Б), что также проявляется в отраженном измеряемом сигнале. Результаты исследования на основе конфокальной спектроскопии КР [1] показали, что дерма - второй функциональный слой кожи – примерно на 70% состоит из воды в (связанном или свободном состояниях), в то время как в составе гиподермы доминируют различные липиды, запасенные в клетках липоцитах [2]. Поэтому можно предположить, что вода в дерме и липиды в гиподерме являются основными поглотителями для данных слоев кожи. Следовательно, из-за различной формы спектров поглощения данных слоев, сканирование отраженного сигнала по глубине позволило бы определить толщины исследуемых слоев кожи (рис. В). Это предположение было проверено в рамках данной работы.

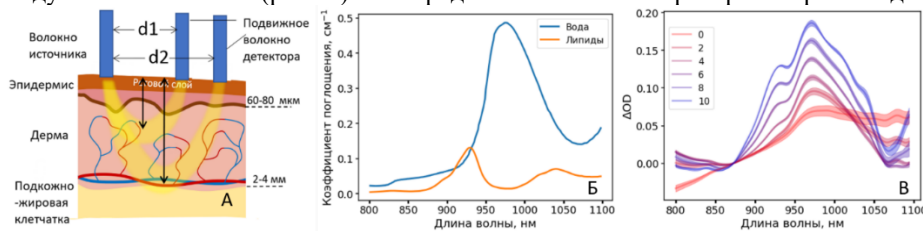


Рисунок. А – Схема экспериментальной установки, реализующая спектроскопию диффузного отражения. Б – Спектры поглощения воды и липидов. В – Спектры эффективной оптической плотности, измеренные на расстояниях между источником и детектором в диапазоне от 0 до 10 мм

В рамках данной работы была исследована возможность определения физиологических параметров кожи – толщин дермы и гиподермы – с помощью спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением. По данным спектроскопии диффузно отражения с помощью методов машинного обучения были построены модели по определению толщин дермы и гиподермы. Верификация метода была проведена с помощью ультразвукового исследования (УЗИ), позволяющего визуализировать верхние слои кожи. Ошибки определения толщины дермы и гиподермы составили 0.18 мм и 1.21 мм соответственно.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

[1] Téllez-Soto C.A. *et al.*, *Vib. Spectrosc.*, **112**, 103196, (2021).

[2] Bashkatov A.N., Genina E.A. & Tuchin V.V., *J. Innov. Opt. Health Sci.*, **04**, 9–38, (2011).

МОНИТОРИНГ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО-ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ
ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ СНА С
ПОМОЩЬЮ ПОРТАТИВНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ

Локтионова Ю.И.¹, Сидоров В.В.², Паршакова В.Е.¹, Жарких Е.В.¹, Дунаев А.В.¹

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

²ООО НПП «ЛАЗМА», Москва, Россия

В работе показана возможность длительного непрерывного мониторинга микроциркуляторно-тканевых систем организма человека во время сна с помощью носимых лазерных анализаторов микроциркуляции крови и окислительного метаболизма тканей.

Ключевые слова: микроциркуляторно-тканевые системы, мониторинг, сон.

Нарушения сна лишают человека полноценного отдыха и восстановления, что приводит не только к снижению концентрации внимания, ухудшению трудоспособности, но и к возникновению нарушений работы сердечно-сосудистой, нервной, эндокринной и иммунной систем организма. Неоправданно мало внимания уделяется изучению функционального состояния организма во время сна на уровне микроциркуляторно-тканевых систем (МТС), где протекают перфузионно-метаболические процессы. Целью работы явилось изучение возможностей мониторинга МТС организма человека во время сна.

В настоящее время для регистрации параметров МТС активно применяется мультимодальная оптическая диагностика, такие методы как лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) и флуоресцентная спектроскопия (ФС) [1]. В настоящее время существуют компактные устройства, одновременно реализующие данные методы – носимые анализаторы «ЛАЗМА-ПФ» (ООО НПП «ЛАЗМА»). Устройства также имеют встроенный канал термометрии и акселерометр, обеспечивают беспроводную передачу данных на персональный компьютер [2]. Конструктивные особенности устройств (отсутствие проводов) обеспечивают возможность длительных измерений и мониторинга параметров МТС во время сна.

Регистрация параметров МТС проводилась во время сна (с 00:00 по 7:00 ч) на тыльной стороне запястий симметрично справа и слева с помощью двух анализаторов «ЛАЗМА-ПФ». Волонтерами явились 2 девушки (23 и 26 лет) без хронических заболеваний и сомнологических расстройств. Мониторинг начинался через час после засыпания волонтеров и продолжался до разрядки устройств (примерно через 6-7 ч). Пример длительного мониторинга параметров МТС во время сна представлен на рисунке.

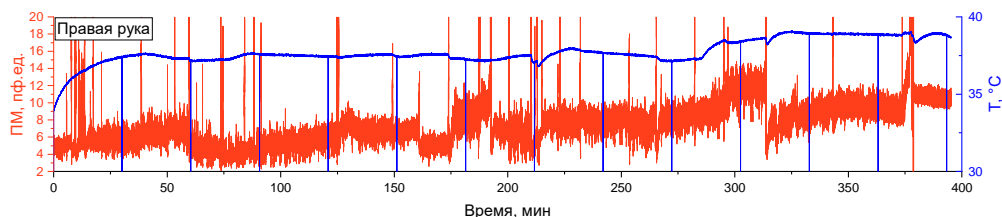


Рисунок. Пример 6 ч записи тканевой перфузии и температуры во время мониторинга сна

На тестовых записях ЛДФ-грамм заметны артефакты при регистрации тканевой перфузии, что связано с движением волонтера во сне. Однако, наличие в устройствах «ЛАЗМА-ПФ» акселерометра позволяет скорректировать подобные выбросы. Колебания кожной температуры могут быть обусловлены использованием одеяла, что также необходимо учитывать при анализе зарегистрированных данных.

Зарегистрированные ЛДФ-граммы разбивались на 10 мин фрагменты, для каждого с помощью адаптивного вейвлет-преобразования вычислялись амплитуды осцилляций периферического кровотока. Отмечается снижение амплитуд миогенных осцилляций и нутритивного кровотока в утренние часы у одного из волонтеров, что может быть связано с увеличением длительности фаз быстрого сна, который сопровождается повышением тонусов периферических сосудов [3]. Также утром отмечается рост нормированной амплитуды флуоресценции NADH, что говорит о снижении окислительного метаболизма.

Проведенные тестовые измерения показывают возможность проведения длительного мониторинга МТС организма человека во время сна и получения дополнительной диагностической информации. Использование референтных методов позволит диагностировать нарушения функционального состояния МТС организма человека в разных фазах сна и оценивать эффективность их терапии.

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

[2] Сидоров В.В., Рыбаков Ю.Л., Гукасов В.М., Евтушенко Г.С., *Медицинская техника*, **6**, 4-6, (2021).

[3] Lavie P., Schnall R., Sheffy J., Shlitner A., *Nat Med*, **6**, 606, (2000).

МЕТОД РАЗРЕШЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ КРИВЫХ КАК ИНСТРУМЕНТ
АНАЛИЗА РАМАНОВСКИХ СПЕКТРОВ

Матвеева И.А.

Самарский университет, г. Самара, Россия

Перспективным способом для исследования биотканей является рамановская спектроскопия. В работе для анализа *in vivo* рамановских спектров кожи применяется метод разрешения многомерных кривых. Показана возможность оценки компонентного состава образцов.

Ключевые слова: рамановская спектроскопия, метод разрешения многомерных кривых.

Наиболее перспективным инструментом для исследования кожной ткани признана спектроскопия рамановского рассеяния [1]. Однако несмотря на развитие технических средств регистрации спектральных данных, существует потребность в интерпретации регистрируемых данных. Актуален поиск способов анализа измеренных *in vivo* рамановских спектров участков кожи пациентов, а также их классификации по нозологиям. Среди методов анализа спектров рамановского рассеяния можно отметить метод главных компонент (РСА) [2]. Однако, несмотря на положительный опыт, этот метод имеет существенное ограничение в применении к реальным данным – нефизичность, то есть невозможность физической интерпретации компонентом. Другой подход, применяемый к анализу спектров рамановского рассеяния света, – это нейронные сети. Они используются в качестве классификатора болезней, как, например, в [3, 4]. Однако критерии классификации очень часто остаются неизвестными.

В последнее время метод разрешения многомерных кривых (MCR) нашел широкое применение в биологии и медицине для анализа спектральных данных [5]. В [6] метод MCR применен к спектрам рамановского рассеяния кожи, записанным с помощью рамановской микроскопии. В [7] образцы биологических тканей были исследованы *in situ* с помощью сканирующего рамановского микроскопа. Основная идея MCR состоит в том, чтобы разложить матрицу рамановских спектров на две матрицы, одна из которых представляет собой профили концентраций для каждого компонента, а вторая – матрицу спектров этих компонентов [8]. Число компонентом, на которые раскладывались рамановские спектры, варьировалось. На основании полученных в результате MCR-анализа концентраций была проведена классификация методом логистической регрессии.

Объектами исследования являются рамановские спектры участков кожи, которые регистрировались с низким соотношением сигнал-шум, равным 3, при помощи портативного спектрометра (длина волны 785 нм) в диапазоне 1100-1900 см⁻¹ и подвергались предварительной обработке [9]. В исследовании приняли участие более 500 пациентов Самарского онкоцентра с различными опухолями кожи: себорейным кератозом, злокачественной меланомой, базальноклеточной карциномой, пигментным невусом и др.

Таким образом, в представленной работе впервые показана возможность разделения биохимических компонентом с помощью метода MCR в условиях рамановских спектров с низким соотношением сигнал-шум, а также сокращения размерности спектральных данных рамановского рассеяния для дальнейшего анализа и классификации. Построены модели бинарной классификации для идентификации доброкачественных и злокачественных новообразований, злокачественной меланомы и пигментного невуса, дающие точность классификации от 60 до 90%. Это дает нам смелость говорить о возможном эффективном использовании метода MCR в портативных приборах для диагностики новообразований, когда скорость и простота использования прибора важнее высокого спектрального разрешения.

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда №21-75-10097.

[1] Popp J., Krafft C., Mayerhöfer T., *Optik & Photonik*, **6**, №4, 24-28, (2011).

[2] Zakharov V.P., Bratchenko L.A., Khristoforova Y.A., Myakinin O.O., Artemyev D.N., Moryatov A.A., Kozlov S.V., Borisova E.G., Genova T.I., Troyanova P.P., Bratchenko I.A., *Tissue Optics and Photonics*, **11363**, 105-110, (2020).

[3] Sigurdsson S., Philipsen P.A., Hansen L.K., Larsen J., Gniadecka M., Wulf H.C., *IEEE transactions on biomedical engineering*, **51**, №10, 1784-1793, (2004).

[4] Винокуров В.О., Матвеева И.А., Христофорова Ю.А., Мякинин О.О., Братченко И.А., Братченко Л.А., Морятов А.А., Козлов С.В., Мачихин А.С., Абдулхалим И., Захаров В.П., *Компьютерная оптика*, **45**, №6, 879-886, (2021).

[5] Garrido M., Rius F.X., Larrechi M.S., *Analytical and bioanalytical chemistry*, 390, 2059-2066, (2008).

[6] Yakimov B.P., Venets A.V., Schleusener J., Fadeev V.V., Lademann J., Shirshin E.A., Darvin M.E., *Analyst*, **146**, №10, 3185-3196, (2021).

[7] Feng X., Moy A.J., Nguyen H.T., Zhang J., Fox M.C., Sebastian K.R., Reichenberg J.S., Markey M.K., Tunnell J.W., *Biomedical optics express*, **8**, №6, 2835-2850, (2017).

[8] Jaumot J., de Juan A., Tauler R., *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **140**, 1-12, (2015).

[9] Khristoforova Y.A., Bratchenko I.A., Myakinin O.O., Artemyev D.N., Moryatov A.A., Orlov A.E., Kozlov S.V., Zakharov V.P., *Journal of biophotonics*, **12**, №4, e201800400, (2019).

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ СВЕТА В ТКАНИ ДЕНТИНА
МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Никонова Е.Э.¹, Будылин Г.С.^{1,3,4}, Давыдов Д.А.^{1,2,3}, Туркина А.Ю.¹,
Кочмарева А.С.¹, Ширшин Е.А.^{1,2}**

¹Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, Москва, Россия

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

³МНОЦ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия

Методом Монте-Карло было проведено моделирование распространения света внутри ткани дентина зуба в зависимости от расстояний между оптоволоконными источниками и детектирующим. При расстоянии 0.5 мм глубина зондирования в ткань составила 1 мм, при 1 мм – 2 мм. Полученные результаты были использованы для разработки оптического зонда для определения толщины дентина методом спектроскопии диффузного отражения.

Ключевые слова: толщина дентина, метод Монте-Карло, спектроскопия диффузного отражения.

Современная клиническая практика в стоматологии предполагает использование минимально инвазивных схем лечения. Для их реализации необходимы новые устройства диагностики. Одной из задач является определение толщины дентина над поверхностью пульпы зуба. В области пульпы находятся кровеносные сосуды, поэтому её вскрытие нежелательно. Однако на данный момент объективных методов оценки толщины дентина нет.

В работе [1] нами был предложен подход на основе метода спектроскопии диффузного рассеяния света для определения толщины пульпы (рис. А). В ближнем ИК диапазоне от 800 нм до 1100 нм ткани дентина обладают небольшим поглощением, что позволяет свету проникать через них в ткани пульпы. Пульпа характеризуется значительно большим содержанием воды по сравнению с дентином, поэтому ткани пульпы характеризуются поглощением на 980 нм связанные с водой. Таким образом, по мере приближения к пульпе наблюдается рост оптической плотности в полосе поглощения воды (рис. Б).

Для использования метода спектроскопии диффузного рассеяния в клинических условиях необходимо разработать конструкцию оптического зонда, имеющего внутри себя два оптоволоконна: заводящего свет и детектирующее. Чем больше расстояние между волокнами, тем глубина, с которой детектируется сигнал. При этом с одной стороны необходимо использовать минимально возможное расстояние между волокнами для уменьшения размера зонда, а с другой – определять глубину дентина в диапазоне 0.1 – 2 мм.

Для подбора оптимального расстояния между волокнами было проведено Монте-Карло моделирование распространения света в ткани зуба (рис. В). Для моделирования оптических свойств зуба была использована двухслойная модель, в которой моделировалась система дентин-пульпа с индивидуальными оптическими свойствами для каждого слоя. Полученные результаты были использованы для конструкции оптического зонда (рис. Г). В данный момент проведены его первые клинические тестирования.

Данное исследование было поддержано программой "Приоритет 2030" Первого МГМУ им. И.М. Сеченова.

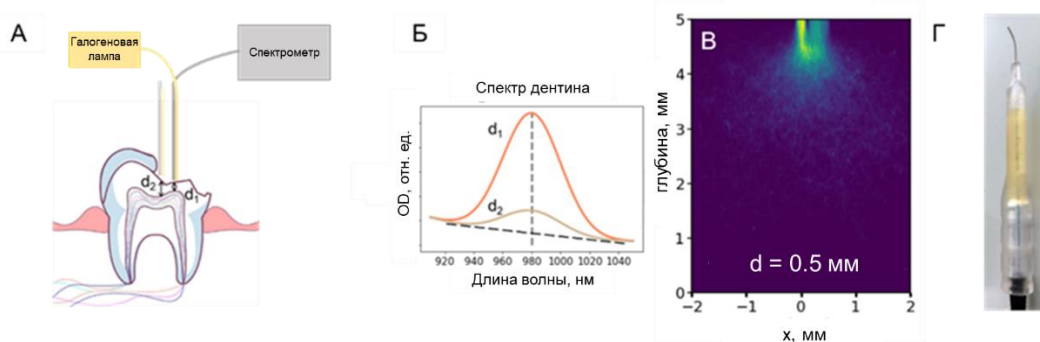


Рисунок. А – Схема экспериментальной установки, реализующая спектроскопию диффузного отражения. Б – Спектры поглощения воды при различном расстоянии между волокнами. В – Траектории распространения света в результате моделирования Монте-Карло Г – Готовая конструкция клинического зонда, используемое расстояние между волокнами 0.3 мм

[1] Nikonova E.E., Budylin G.S., Kochmareva A.S., Turkina A.Y., Timashev P.S., Shirshin E.A., *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*, **8**, №4, 040507, (2022).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ДЕЙТЕРИРОВАННЫХ СОЕДИНЕНИЙ В
ПРЕИМПЛАНТАЦИОННЫХ ЭМБРИОНАХ МЫШИ МЕТОДОМ
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Омельченко А.Н.^{1,2}, Окотруб К.А.¹, Игонина Т.Н.³, Брусенцев Е.Ю.^{1,3},
Амстиславский С.Я.^{1,3}, Суровцев Н.В.¹

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

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³Институт цитологии и генетики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В данной работе предложен подход к изучению транспорта дейтерированных меток в преимплантационных эмбрионах мыши методом комбинационного рассеяния света. Рассмотрен метаболизм жирной стеариновой кислоты, аминокислот (фенилаланин и лейцин) и глюкозы.

Ключевые слова: комбинационное рассеяние света, эмбрионы мыши, метаболизм.

Изотопические метки, а частности дейтерированные, широко используются при изучении реакции живых организмов на изменяющиеся условия окружающей среды. Включая в питательную среду различные дейтерированные молекулы, можно отслеживать накопление меченых метаболитов, отвечающих специфичным цепочкам химических реакций. Перспективной методикой, позволяющей детектировать новосинтезированные соединения, является спектроскопия комбинационного рассеяния света, которая является неинвазивной, неразрушающей, а также применимой к исследованию одиночных клеток.

Данная работа посвящена демонстрации метода спектроскопии комбинационного рассеяния дейтерированных меток в характеристике метаболизма преимплантационных эмбрионов мыши. Также рассматривались вопросы влияния криоконсервации по протоколам программного замораживания и витрификации на транспорт липидов, белков и глюкозы. Эмбрионы культивировались в средах с содержанием различных дейтерированных соединений, таких как вода, стеариновая кислота, глюкоза и аминокислоты (фенилаланин и лейцин). Эмбрионы мыши были подготовлены сотрудниками сектора криоконсервации и репродуктивных технологий ИЦиГ СО РАН.

Показано, что при культивировании эмбрионов в растворе с содержанием 20 % тяжелой воды не образуется новых дейтерированных соединений, что может быть связано с ее токсичностью для клеток. Также снижается скорость развития при добавлении аминокислот. Было обнаружено, что эмбрионы, пережившие криоконсервацию, на первые сутки культивирования накапливают больше жиров, чем контрольная группа [1]. Данный эффект замечен для высоких стадий развития эмбрионов, что связано с появлением новых метаболических путей. При этом на вторые сутки культивирования различия в метаболизме липидов не наблюдаются. По спектрам комбинационного рассеяния не выявлено значимых различий между экспериментальными группами эмбрионов при их культивировании в присутствии аминокислот. По-видимому, встраивание аминокислот в белки происходит без химических трансформаций. Также показано, что дейтерированная глюкоза накапливается эмбрионами мыши преимущественно в виде гликогена и пентоз. Аналогично метаболизму аминокислот, транспорт глюкозы усиливается при увеличении стадии развития эмбрионов.

Таким образом, метод комбинационного рассеяния света дейтерированных меток применим для анализа метаболизма преимплантационных эмбрионов мыши до и после процессов криоконсервации. Предложенный в работе подход может быть также использован для характеристики обмена веществ других живых организмов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 21-74-10108).

[1] Omelchenko A.N., Igonina T.N., Brusentsev E.Yu., Okotrub K.A., Amstislavsky S.Ya., Surovtsev N.V., *Cryobiology*, **109**, 44-52, (2022).

**ОЦЕНКА СВОЙСТВ ХРЯЩЕВОЙ ТКАНИ ПО СПЕКТРАМ ДИФFUЗНОГО
ОТРАЖЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА:
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Ровнягина Н.Р.¹, Будылин Г.С.¹, Давыдов Д.А.^{1,2}, Ширшин Е.А.^{1,3}

¹Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, Москва, Россия

²МНОЦ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Исследован диагностический потенциал спектроскопии диффузного отражения в БИК области спектра для оценки толщины и концентрации воды в хряще. Данное исследование было реализовано посредством анализа спектров, полученных с помощью моделирования Монте-Карло.

Ключевые слова: моделирование Монте-Карло, биофотоника, содержание воды и толщина хряща.

Остеоартрит (ОА) является наиболее распространенным заболеванием опорно-двигательного аппарата во всем мире [1], которое поражает значительное количество людей старше 50 лет [2]. ОА характеризуется прогрессирующей дегенерацией суставного хряща и его дисфункцией. Физиологические функции хряща в первую очередь определяются его структурными характеристиками. В результате ОА происходит изменение содержания основных компонентов хряща, таких как вода, коллаген и протеогликаны, которое в свою очередь влечет за собой изменение толщины хрящевой пластинки. Таким образом, концентрация основных хромофоров вместе с толщиной хряща являются важнейшими показателями нормального функционирования сустава [3, 4].

В связи с ограничениями существующих методов клинической диагностики в последние годы увеличилось количество исследований в области неинвазивных методов оценки состояния хрящевой ткани [5]. К классу наиболее перспективных можно отнести оптические методы в ближней инфракрасной (БИК) области. Данные техники зачастую применяются для решения задач классификации стадий ОА или прогнозирования молекулярных и механических свойств хряща. При этом анализ данных обычно проводится с помощью методов машинного обучения [6 - 8]. Однако этот подход действует как "черный ящик" и не учитывает деталей формирования сигнала на разных длинах волн, что является необходимым для обнаружения изменения концентрации различных хромофоров, а также толщины хряща при ОА и требует однозначного понимания процессов распространения света в зависимости от параметров среды [6 - 8]. В то же время, понимание формирования оптического отклика может помочь оптимизировать конфигурацию измерения для точного определения клинически значимых показателей.

В данной работе для изучения формирования спектров диффузного отражения (ДРС) хряща в различных диапазонах длин волн и при различных конфигурациях приемо-передающего зонда было использовано компьютерное моделирование распространения света на основе метода Монте-Карло (МК). Поскольку спектральные характеристики чувствительны к структурным и молекулярным изменениям в хрящевой ткани при ОА, их изменение одновременно определяется изменением концентрации компонентов и толщиной хряща. Независимое определение этих параметров имеет клиническое значение и было реализовано в данной работе. Для решения этой задачи было произведено МК моделирование в широком спектральном диапазоне от 850 до 1600 нм. В результате работы была разработана модель, использующая амплитуды на 980 и 1450 нм в качестве характеристик и предсказывающая концентрацию воды с R^2 , составляющим 0.97 и 0.88 для расстояний 0.5 и 2 мм между источником и детектором, соответственно; и толщину хряща с R^2 , равным 0.95 и 0.92. Для определения параметров хрящевой ткани по спектрам ДРС была предложена геометрия трехволоконного зонда с 2 волокнами на детекторы, регистрирующие в области 800-1100 и 1100-1700 нм, на расстоянии 2 и 0.5 мм от волокна источника, соответственно. Такая геометрия зонда позволяет повысить точность определения толщины хряща до значения R^2 0.99 и концентрации воды до значения R^2 0.96 по двум амплитудам.

Данное исследование было поддержано программой "Приоритет 2030" Первого МГМУ им. И.М. Сеченова. Данное исследование было поддержано Российским Научным Фондом (грант № 21-79-10325). Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

[1] Hunter D.J., Schofield D., Callander E., *Nat. Rev. Rheumatol.*, **10**, №7, 437-441, (2014).

[2] Loeser R.F., Collins J.A., Diekman B.O., *Nat. Rev. Rheumatol.*, **12**, №7, 412-420, (2016).

[3] Hayes W.C., Keer L.M., Herrmann G., Mockros L.F., *J. Biomech.*, **5**, №5, 541-551, (1972).

[4] Kellgren J.H., Lawrence J.S., *Ann. Rheum. Dis.*, **16**, №4, 494, (1957).

[5] Jo J., Tian C., Xu G., Sarazin J., Schioppa E., Gandikota G., Wang X., *PФ*, **12**, 82-89, (2018).

[6] Sarin J.K., Amissah M., Brommer H., Argüelles D., Töyräs J., Afara I.O., *Ann. Biomed. Eng.*, **44**, 3335-3345, (2016).

[7] Büyükoztürk O., Taşdemir M.A., Afara I., Sahama T., Oloyede A., *NDT of mat. and str. – Springer Netherlands*, 399-404, (2013).

[8] Spahn G., Plettenberg H., Nagel H., Kahl E., Klinger H.M., Mückley T., Mollenhauer J.A. *Med. Eng. Phys.*, **30**, №3, 285-292, (2008).

**МУЛЬТИВОЛНОВАЯ МОРА ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ
КРИСТАЛЛОВ Cr:LiCaAlF₆ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ
ОПТОАКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ**

**Аглымов Р.Д.^{1,2}, Наумов А.К.², Шавельев А.А.², Морозов О.А.^{1,2},
Низамутдинов А.С.², Шишкин А.Д.¹, Бродниковский Ю.П.³, Карабутов А.А.¹,
Ораевский А.А.³, Семашко В.В.^{1,2}**

¹КФТИ им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

²ФГАОУ ВО Казанский федеральный университет, Казань, Россия

³ООО «Томовейв Лазер», Казань, Россия

Разработана лазерная система на кристаллах Cr:LiCAF, позволяющая реализовать оптоакустическую томографию реального времени с использованием крови человека в качестве эндогенного контрастного вещества, улучшить ее пространственное разрешение, значительно снизить стоимость лазерной составляющей.

Ключевые слова: перестраиваемые импульсные лазеры, лазерная система МОРА, медицинская оптоакустика.

Развитие медицинской оптоакустической томографии с использованием крови человека в качестве эндогенного контрастного вещества сдерживается отсутствием надежных, простых в использовании и недорогих источников мощного импульсного лазерного излучения в области спектра 750-900 нм [1, 2]. Применяемые в настоящее время титан-сапфировые, александритовые лазеры или параметрические генераторы света не обеспечивают требуемых и стабильных выходных характеристик, они конструктивно сложны, а их стоимость составляет до половины стоимости диагностических оптико-акустических систем. В настоящей работе приводятся результаты разработки лазера на основе кристаллов Cr:LiCaAlF₆ (Cr:LiCAF), которые позволяют избежать многих вышеупомянутых недостатков и обеспечивают мощное импульсное перестраиваемое лазерное излучение в области полос поглощения окси- (~840 нм) и - дезоксигемоглобина (~757 нм) в крови.

Кристаллы Cr:LiCAF (с=3 ат.%) были синтезированы в Казанском федеральном университете методом Бриджмена в графитовых тиглях во фторирующей атмосфере при избыточном давлении аргона (P=1500 гПа). Повышение концентрации ионов Cr³⁺ до 3 ат. незначительно снизило время жизни верхнего лазерного уровня (до ~165 пс) и позволило увеличить эффективность поглощения излучения ламп накачки. Лазерные элементы представляли собой цилиндры диаметром 8 мм и длиной 90 мм с оптической осью кристалла, ориентированной перпендикулярно к образующей цилиндра. Такая геометрия позволяет генерировать π-поляризованное лазерное излучение, соответствующее максимальному коэффициенту усиления. Рабочие поверхности активных элементов были отполированы и параллельны друг другу с погрешностью менее 10". Никакого просветляющего покрытия нанесено не было.

Реализована лазерная система с ламповой накачкой и с модуляцией добротности, состоящая из генератора и двухпроходного усилителя (МОРА). Применялись двухламповые квантроны с диффузными отражателями и с «плотной упаковкой» активных элементов и ламп накачки. Специально разработанный лазерный резонатор, состоящий из диэлектрических зеркал с высоким коэффициентом отражения и с радиусом кривизны 2 м, плоского выходного зеркала, поляризатора, диафрагм и электрооптического модулятора добротности, позволяет поочередно генерировать лазерные импульсы длительностью ~40-50 нс на длинах волн ~757 и ~840 нм. Программируемая система от ООО «Томовейв Лазер» (Россия) обеспечивала независимую установку энергии для каждого акта накачки (до 250 Дж @ 180 мкс) с целью выравнивания интенсивности лазерного излучения на этих длинах волн. МОРА-лазер работает с частотой следования импульсов 10 Гц с выходной энергией до 210 мДж.

С учетом ограничений, связанных с физиологическими движениями и другими особенностями тканей пациента, длительность лазерных импульсов и их энергия позволяют проводить молекулярную и функциональную высококонтрастную визуализацию на глубину до 5-7 см с пространственным разрешением не хуже 1 мм. Модульность и гибкость разработанной системы допускает возможность варьирования длин волн лазерной генерации в пределах 750-890 нм, кратного масштабирования ее выходных характеристик, а также использование усилителей на основе кристаллов Cr:LiCAF для модернизации существующих оптоакустических медицинских комплексов.

[1] Manohar S., Razansky D., *Adv. Opt. Photon.*, **8**, 586-617, (2016).

[2] Oraevsky A.A., Karabutov A.A., Solomatin S.V., Savateeva E.V., Andreev V.A., Gatalica Z., Singh H., Fleming R.D., *SPIE Proc.*, **4256**, (2001).

[3] Shavelev A.A., Shakirov A.A., Lukinova E.V., Aglyamov R.D., Naumov A.K., Semashko V.V., Nizamutdinov A.S., Palianov P.A., Panchenko Y.N., Bobrovnikov S.M., *SPIE Proc.*, **11322**, 113221L, (2019).

**ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ В
ДИАГНОСТИКЕ АТРОФИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭПИТЕЛИЯ ВЛАГАЛИЩА**

**Логина М.М.^{1,2}, Сиротина Л.З.³, Губарькова Е.В.^{1,2}, Потапов А.Л.²,
Шкалова Л.В.⁴, Gladkova N.D.², Мотовилова Т.М.², Сироткина М.А.^{1,2}**

¹ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

²«ПИМУ» Минздрава России, Нижний Новгород, Россия

³КСТ «Садко», Нижний Новгород, Россия

⁴ФБУЗ ПОМЦ ФМБА России Клиническая больница № 1, Нижний Новгород, Россия

Метод оптической когерентной томографии (ОКТ) способен четко визуализировать изменения стенки влагалища в норме и при разной степени тяжести атрофических изменений эпителия влагалища.

Ключевые слова: оптическая когерентная томография, атрофия эпителия влагалища.

Оптическая когерентная томография (ОКТ), являясь неинвазивным методом, позволяющим по оптическим и рассеивающим свойствам ткани определять структурные изменения, может стать перспективным инструментом диагностики различных гинекологических патологий [1]. В нашей работе мы рассматриваем возможность применения ОКТ в диагностике атрофических изменений эпителия влагалища. Атрофия эпителия влагалища встречается примерно у 50% женщин в период менопаузы, что делает данную патологию широко распространенной с неблагоприятным воздействием на здоровье и качеством жизни женщин среднего возраста [2]. Наиболее негативными последствиями, вызванными атрофическими изменениями, являются рецидивирующие инфекции мочевыводящих путей, вагинит и инфекции, передающиеся половым путем. В настоящее время атрофические изменения стенки влагалища основываются на сборе анамнеза, физикального исследования и вульвоскопии, что не всегда является объективной оценкой для точной постановки диагноза [3]. Забор биопсии стенки влагалища для гистологического заключения и подтверждения диагноза осуществляется только в тех случаях, если имеется подозрение на злокачественные новообразования. Сама процедура забора биопсийного материала может вызвать кровотечение и воспаление стенки влагалища, что может усугубить имеющуюся симптоматику у женщин. Следовательно, поиск неинвазивного метода, который бы позволил наверняка подтвердить или опровергнуть атрофические изменения эпителия влагалища, является важной и актуальной задачей. Именно ОКТ может стать потенциальным и перспективным инструментом диагностики и определения степени тяжести поражения при атрофии эпителия влагалища. Целью исследования явилась оценка возможности диагностики атрофических изменений эпителия влагалища методом ОКТ. Исследование стенки влагалища *in vivo* проводилось в клинике современных технологий «Садко» на условно здоровых пациентах и пациентах с атрофией эпителия влагалища с применением ОКТ (ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия). Объектом исследования влагалища явилось преддверие и середина стенки влагалища. Были получены структурные изображения, по которым строились цветокодированные ОКТ-карты с распределением значений коэффициента затухания сигнала. После проведения врачебных манипуляций происходил забор биопсийного материала в исследуемой зоне для последующего гистологического анализа. Метод ОКТ способен четко визуализировать изменения стенки влагалища в норме и при атрофических изменениях эпителия влагалища. На цветокодированных ОКТ картах коэффициента затухания сигнала нормальной стенки влагалища хорошо детектируется граница эпителия и собственной пластинки; эпителий толстый (более 500 мкм), имеет низкие значения коэффициента затухания. При легкой атрофии стенки влагалища на цветокодированных ОКТ картах коэффициента затухания сигнала также хорошо детектируется граница эпителия и собственной пластинки, однако толщина эпителия уменьшается и составляет 200-400 мкм. При выраженной атрофии на цветокодированных ОКТ картах граница эпителия и собственной пластинки плохо различимы; эпителий тонкий (менее 200 мкм), в области эпителия имеются высокие значения коэффициента затухания сигнала. Полученные данные методом ОКТ коррелируют с гистологическим заключением, что делает данный метод применимым и эффективным при диагностике и определении степени тяжести поражения при атрофии.

Исследование поддержано НЦМУ «Центр фотоники» (соглашение с Министерством науки и высшего образования РФ No 075-15-2022-293).

[1] Potapov A.L., Loginova M.M., Moiseev A.A., Radenska-Lopovok S.G., Kuznetsov S.S., Kuznetsova I.A., Mustafina N.N., Safonov I.K., Gladkova N.D., Sirotkina M.A., *Sovremennye Tehnologii V Medicine*, **15**, №1, 53, (2023).

[2] Shifren J.L., *Clin. Obstet. Gynecol.*, **61**, №3, 508-516, (2018).

[3] Marino J.M., Midwifery J., *Womens Health*, **66**, №6, 729-739, (2021).

**ОПТИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И
МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КОЖИ И СЛИЗИСТОЙ ОБОЛОЧКИ В НОРМЕ, ПРИ
ПАТОЛОГИИ И В ОТВЕТ НА ЛЕЧЕНИЕ**

**Сироткина М.А.¹, Киселева Е.Б.¹, Потапов А.Л.¹, Моисеев А.А.², Седова Е.С.³,
Гамаюнов С.В.³, Раденска-Лоповок С.Г.⁴, Гладкова Н.Д.¹**

¹ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава РФ, Нижний Новгород, Россия

²ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия

³НОКОД, Нижний Новгород, Россия

⁴ФГАОУ ВО «Первый МГМУ имени И.М. Сеченова», Москва, Россия

Применен метод мультимодальной оптической когерентной томографии для оценки структуры, кровеносных и лимфатических сосудов биологических тканей в норме, при патологии и на ранних сроках после лечения.

Ключевые слова: ОКТ, микроциркуляция, склеротический лихен вульвы.

Мультимодальная оптическая когерентная томография (ОКТ) - современный метод визуализации биологических тканей. ОКТ позволяет изучать структуру, функциональное состояние, механические и оптические свойства биотканей. Технология ОКТ может применяться в повседневной клинической практике в нейрохирургии, онкологии, абдоминальной хирургии, гинекологии и других областях медицины. ОКТ - это неинвазивная визуализация, позволяющая получать трехмерные изображения подповерхностных тканей с пространственным разрешением 10-20 мкм на глубине 1-2 мм без использования контрастных веществ в реальном времени. На основе ОКТ получаются поляризационно-чувствительные, эластографические (характеризующие эластические свойства тканей) и ангиографические (кровеносные и лимфатические сосуды) изображения. ОКТ-ангиография показала высокую эффективность в оценке раннего ответа опухоли на фотодинамическую терапию (ФДТ) как в эксперименте на мышшиной опухолевой модели рака толстой кишки (СТ26) [1], так и на базальноклеточной карциноме [2]. ОКТ-ангиография чувствительна к изменениям перфузии и не визуализирует сосуды с нарушенным кровотоком.

Метод мультимодальной ОКТ с оценкой микроструктуры и микроциркуляции был применен для диагностики и контроля фотодинамической терапии склеротического лихена вульвы. Применены оригинальные алгоритмы количественной обработки ОКТ параметров.

При детальном сопоставлении ОКТ изображений с гистологическими препаратами были сформулированы ОКТ признаки вульвы в норме: (1) визуализация капиллярных петель сразу под эпителием, (2) изменение толщины сосудов с глубиной, (3) хорошо сформированная сеть кровеносных и лимфатических сосудов на глубине, начиная с верхней дермы.

Установлено, что на ранней стадии развития склеротического лихена изменения в соединительной ткани происходят только в верхнем слое дермы. На поздней стадии изменения соединительной ткани более выраженные и наблюдаются как в верхнем, так и в среднем и глубоком слоях дермы. Выявлено уменьшение плотности сети лимфатических сосудов в верхнем слое дермы на ранней стадии развития склеротического лихена, что указывает на то, что изменения начинают развиваться непосредственно под эпителием. На поздней стадии развития склеротического лихена плотность как кровеносной, так и лимфатической сетей сократилась практически до нулевых значений во всех слоях дермы. При тщательном анализе ИГХ окрашенных препаратов, было обнаружено, что склерозирование стенок сосудов с облитерацией просвета появляется уже на ранней стадии развития склеротического лихена. Лимфатические сосуды при склеротическом лихене также отличаются от нормальных сосудов. На ранней стадии склеротического лихена наряду с нормальными сосудами встречаются спавшиеся и мелкие. На поздней стадии обнаружены сосуды с расширенным просветом и сосуды с лимфостазом. Все это указывает на нарушение нормальной трофики ткани, еще больше усугубляющей течение заболевания.

Показано восстановление микроструктуры и микроциркуляции в ткани вульвы на сроке 1-3 месяца после фотодинамической терапии практически до уровня нормальной ткани. Это сопровождалось отсутствием клинических проявлений заболевания и симптомов. В случае частичного восстановления показателей вульвы на сроке 3х месяцев, у всех пациентов наблюдали рецидив через 6 месяцев после ФДТ. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-75-10084-П.

[1] Sirotkina M.A., Moiseev A.A., Matveev L.A., Zaitsev V.Y., Elagin V.V., Kuznetsov S.S., Gelikonov G.V., Ksenofontov S.Y., Zagaynova E.V., Feldchtein F.I., et al., *Sci. Rep.*, **9**, 6492, (2019).

[2] Gubarkova E.V., Feldchtein F.I., Zagaynova E.V., Gamayunov S.V., Sirotkina M.A., Sedova E.S., Kuznetsov S.S., Moiseev A.A., Matveev L.A., Zaitsev V.Y., et al. *Sci. Rep.*, **9**, 18670, (2019).

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОГО
ПРОСВЕТЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ:
ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ И ТЕРАПИИ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**
Тучин В.В.^{1,2,3}

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

²Национальный исследовательский томский государственный университет, г. Томск, Россия

³Институт проблем точной механики и управления, ФИЦ «Саратовский научный центр Российской
академии наук», г. Саратов, Россия

В работе представлены фундаментальные основы метода оптического просветления биологических тканей. Показана эффективность метода для широко спектра длин волн от глубокого УФ и до терагерцового диапазона при диагностике и терапии ряда социально значимых заболеваний.

Ключевые слова: биологические ткани, просветляющие агенты, оптическая диагностика, фототерапия, сахарный диабет, онкологические заболевания, когнитивные нарушения.

В контексте создания новых виртуальных оптических окон в УФ и терагерцовом диапазонах спектра с использованием метода иммерсионного оптического просветления будет представлено и обсуждено понятие «оптических окон прозрачности» биологических тканей. Технология иммерсионного оптического просветления основана на контролируемой и обратимой модификации оптических свойств ткани путем доставки к ней биосовместимого оптического просветляющего агента (ОПА) [1-3]. Будут обсуждены достижения и перспективы оптического просветления по совершенствованию оптической визуализации и фототерапии живых тканей с использованием различных методов, работающих в сверхшироком диапазоне длин волн от глубокого УФ до терагерцового диапазона. Будут описаны и экспериментально продемонстрированы механизмы иммерсионного оптического просветления и альтернативные методы оптического просветления, основанные на акустических воздействиях, использовании сверхкоротких лазерных импульсов и адаптивной оптики, а также их комбинации. Будут представлены кинетические процессы оптического просветления, а также многочисленные приложения для спектроскопии и визуализации биотканей в широком диапазоне длин волн. Будет обсуждена и проиллюстрирована концепция мультимодальности в медицинской диагностике на основе оптических, радиологических и МРТ исследований.

Работа поддержана граном РФФИ № 23-14-00287.

[1] Oliveira L. and Tuchin V.V., Springer Nature Switzerland AG, Basel, 177, (2019).

[2] Tuchin V.V., Zhu D., and Genina E.A. (Eds.), Taylor & Francis Group LLC, CRC Press, Boca Raton, FL, 688, (2022).

[3] Martins I.S., Silva H.F., Lazareva E.N., Chernomyrdin N.V., Zaytsev K.I., Oliveira L.M., and Tuchin V.V., *Biomedical Optics Express*, **14**, №1, 249-298, (2023).

**РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРОВ
ЭКСТИНКЦИИ ЧЕЛОВЕЧЕСКИХ ВОЛОС РАЗЛИЧНЫХ ЦВЕТОВ ДЛЯ
ЛАЗЕРНОГО ОКРАШИВАНИЯ**

Ермолаев В.М.¹, Федорова Ю.В.¹, Беликов А.В.^{1,2}

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия

В работе с помощью компьютерного оптического моделирования и спектральных измерений определены спектры экстинкции человеческих волос пяти цветов. Данные спектры получены для подбора оптимальных источников излучения, способных изменять цвет волос.

Ключевые слова: спектр экстинкции, человеческий волос, лазерное окрашивание волос.

Лазерное окрашивание волос – новый подход к окрашиванию волос. Идея состоит в том, что воздействие излучения при определенных параметрах способно менять цвет волоса, не нанося ему существенного ущерба. В литературе [1, 2] было показано, как излучение широкоспектральных источников способно вызывать заметное пожелтение и обесцвечивание волос. Исследование применения монохроматического лазерного излучения для окрашивания волос – следующий шаг на пути к созданию технологии лазерного окрашивания волос. Прежде чем приступить к разработке этой технологии необходимо выбрать подходящие источники излучения, для чего нужно знать оптические свойства волос человека различных цветов. Сведения об оптических свойствах волос скудны и отрывочны [3], поэтому возникает необходимость определения непрерывных спектров этих свойств, прежде всего спектров экстинкции. В исследовании спектры определялись двумя способами: с помощью компьютерного оптического моделирования и посредством спектральных измерений. Для расчетного определения спектров в программе TracePro создана оптическая модель волоса. Модель представляла из себя трехслойную структуру в виде параллелепипеда с размерами 2000x2000x60 мкм: средний слой, кортекс, толщиной 50 мкм был заключен между идентичными слоями кутикулы толщиной 5 мкм. В оптическом моделировании было принято, что кутикула состоит из чистого кератина, а кортекс из кератина, воды, эумеланина и феомеланина. Концентрации компонентов кортекса были рассчитаны по литературным данным для пяти цветов волос: темных, белых, серых, каштановых и коричневых. Необходимые оптические коэффициенты компонентов кортекса были взяты в литературе, общие оптические коэффициенты кортекса оценивались как суммы произведений коэффициентов компонентов кортекса на соответствующие концентрации. В программе TracePro модель волоса облучалась монохроматическим источником излучения круглого сечения мощностью 1 Вт с диаметром 1 мм и нулевой расходимостью. Длина волны источника менялась в диапазоне от 330 до 2240 нм с шагом 20 нм. На каждой длине волны проводился расчет 100000 лучей методом Монте-Карло и фиксировалась мощность прошедшего излучения. Отношение мощностей падающего излучения к прошедшему давало пропускание волоса, которое при делении на общую толщину модели давало показатель экстинкции. Полученные спектры проанализированы, даны характеристики наблюдаемых максимумов. Первым этапом экспериментального определения спектров экстинкции волос стала оценка цветов пяти пучков волос. Оценка произведена по системе CIELAB. Для этого с помощью сканера регистрировались изображения образцов, по которым затем в программе Adobe Photoshop определялись усредненные цветовые координаты каждого пучка. Вторым этапом экспериментов было спектроскопическое исследование образцов волос. Для измерений спектров волос использовался спектрофотометр UV/VIS T90 («PG Instruments», Великобритания). Образцы были подготовлены на основе волос из пяти пучков. Волосы разрезались ножницами на волосинки длиной не более 1 см и измельчались с помощью мельницы до получения мелкодисперсного порошка. Далее на внутреннюю сторону крышки мельницы с помощью монтажного двухстороннего скотча прикреплялся кусок прозрачного скотча шириной не менее 1 см и длиной не менее 2 см клеевой стороной внутрь мельницы. Затем мельница работала около 10 секунд, и волосяной порошок осаждался в центре внутренней стороны крышки. После этого кусок скотча аккуратно снимался с крышки и очищался от излишков порошка и крупных волосинок с помощью лезвия. Наконец, к этому куску скотча присоединялся кусок такого же скотча без порошка и таким образом получался образец для экспериментов толщиной 90±5 мкм. Измерения проводились с коррекцией базовой линии. Было проведено по 20 измерений волос каждого цвета. Полученные спектры схожи с полученными ранее при моделировании. С опорой на эти спектры и сведения о возникающих в волосах эффектах возможен выбор источников излучения для лазерного окрашивания. Наиболее предпочтительными представляются источники в диапазоне от 330 до 450 нм.

[1] Nogueira A.C.S., Richena M., Dicelio L.E., Joekes I., *J. Photoch. Photobio. B*, **88**, №2-3, 119-125, (2007).

[2] Richena M., Silveira M., Rezende C.A., Joekes I., *J. Photoch. Photobio. B*, **138**, 172-181, (2014).

[3] Huang X., Protheroe M.D., Al-Jumaily A.M., Paul S.P., Chalmers A.N. *J. Biomed. Opt.*, **23**, №5, 050901, (2018).

**АГРЕГАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭРИТРОЦИТОВ:
ИЗМЕРЕНИЯ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ IN VITRO**

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

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

В данной работе приводится обзор лазерно-оптических методов изучения агрегационных свойств эритроцитов и приводятся примеры их применения при различных социально-значимых заболеваниях.

Ключевые слова: агрегация эритроцитов, микрореологические параметры, эритроциты.

Микрореологические параметры крови определяют микроциркуляцию крови, которая существенно влияет на здоровье человека. Количественная и качественная оценка параметров микрореологии крови человека может и должна стать неотъемлемой частью протокола медицинского обследования, особенно при наличии таких социально-значимых заболеваний, как сердечно-сосудистые, онкологические и др [1]. Течение и вязкость крови преимущественно определяются обратимом процессом агрегации эритроцитов. Агрегация эритроцитов – это процесс образования линейных и более сложных структур при малых сдвиговых скоростях [1]. Разработка и апробация новых методов оценки агрегации эритроцитов пациентов является важной и актуальной задачей, которая повысит достоверность и качество диагностики, а также уровень применения подходов персонализированной медицины в клинической практике.

Цель работы заключается в демонстрации использования разных лазерно-оптических методов для измерения параметров, характеризующих обратимую агрегацию эритроцитов *in vitro*.

Были использованы следующие методы: диффузное рассеяние света, проточная камера, сопряжённая с микроскопией, и лазерный пинцет для измерения параметров [2], характеризующих агрегацию эритроцитов в образцах крови, полученных от здоровых доноров и пациентов, страдающих различными заболеваниями: артериальной гипертензией, сахарным диабетом 2-ого типа, ишемическая болезнь сердца и др. [3]. Были измерены силы агрегации и дезагрегации эритроцитов с помощью лазерного пинцета, а также характеристики агрегации в цельной крови с помощью диффузного рассеяния света, дана оценка агрегации эритроцитов с помощью проточной камеры.

По результатам работы можно сказать, что лазерно-оптические методы являются эффективным инструментом для изучения агрегационных свойств эритроцитов, а также для мониторинга патологических изменений их микрореологических параметров *in vitro*.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 22-15-00120).

[1] Baskurt O., Neu B., Meiselman H., CRC Press, Boca Raton, United States, (2012).

[2] Priezzhev A.V., Lee K., Firsov N.N., Lademann J., Chap. 1 in Handbook on Optical Biomedical Diagnostics, 2nd Edition, SPIE Press Bellingham, WA, United States, (2016).

[3] Lugovtsov A.E., Gurfinkel Y.I., Ermolinskiy P.B., Maslyanitsina A.I., Dyachuk L.I., Priezzhev A.V., *Biomedical Optics Express*, **10(8)**, 3974-3986, (2019).

ДИНАМИКА АБСОРБЦИОННО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ
ФЛАВОНОИДОВ КАЛИНЫ КРАСНОЙ В
ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИННЫХ ВОЛН

Землякова Е.С.¹, Цибульникова А.В.², Самусев И.Г.², Зюбин А.Ю.², Слежкин В.А.¹

¹ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия

²ФГАОУ ВО «БФУ им. И.Канта», Калининград, Россия

Настоящая работа является продолжением серии работ по исследованию фотосенсибилизаторов на основе растительных экстрактов, их активации в результате кислородонасыщения и формированию люминесцентных активных микроэмульсионных комплексов с переносом электромагнитной энергии при участии наночастиц благородных металлов.

Ключевые слова: люминесценция, поглощение, кверцетин.

Одним из важнейших направлений биомедицинских исследований хитозана (ХТЗ) является комбинированное использование его с растительными экстрактами и наночастицами золота. Такие комплексы показали ранозаживляющую активность, регенерирующие и бактерицидные свойства и делают их перспективными при использовании для лечения, например, гнойно-воспалительных осложнений в составе раневых покрытий [1]. Существуют исследования, подтверждающие синергетический эффект от комбинированного влияния ХТЗ и наночастиц металлов [2, 3]. Изучена также биохимическая и фотобиологическая эффективность комплексов, содержащих ХТЗ и природные биологически активные вещества в работах [4, 5].

В данной работе исследована люминесцентная динамика комбинированных водно-спиртовых растворов экстрактов плодов калины красной (*Viburnum Opulus L.* - VO) с ХТЗ и наночастицами золота (НЧ Au) при увеличивающихся концентрациях кислорода. Обнаружен плазмонный эффект увеличения оптической плотности поглощения и интенсивности люминесценции. Изучена кинетика тушения люминесценции VO с ХТЗ под влиянием НЧ Au, близкой к диффузионной. Спектрально определена концентрация кислорода, при которой происходит окисление флавоноидов ($C_{[O_2]}=25 \cdot 10^{-3}$ моль). В условиях изменения концентрации кислорода были установлены зависимости изменения интенсивности люминесценции экстракта VO в ХТЗ на длинах волн регистрации спектров люминесценции (рисунок). При увеличении содержания молекулярного кислорода в растворе происходят значительные спектральные изменения в спектрах люминесценции экстрактов VO при стационарном фотовозбуждении. Так, появляется новый максимум свечения люминесценции экстрактов VO в области $\lambda \sim 580$ нм (при концентрации кислорода $C_{[O_2]}=25 \cdot 10^{-3}$ моль), интенсивность которого возрастает.

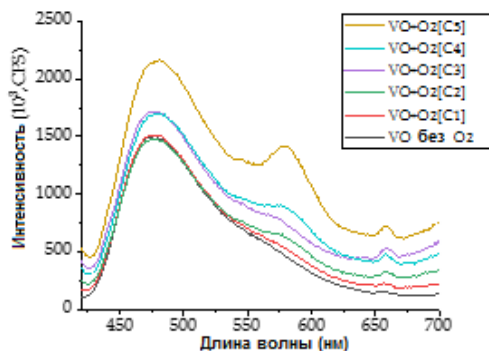


Рисунок. Спектры люминесценции VO с НЧ Au ($C_1=1 \cdot 10^{-9}$, $C_2=0,75 \cdot 10^{-9}$, $C_3=0,5 \cdot 10^{-9}$, $C_4=0,25 \cdot 10^{-9}$, $C_5=0,1 \cdot 10^{-9}$ М) в растворе ХТЗ ($C_w=2\%$)

Исследование выполнено в рамках Федерального проекта Государственного задания Минобрнауки РФ № FZWM-2020-0003.

[1] Ahmad N., Muhammad J., Khan K., Ali W., Fazal H., Ali M., Rahman L., Khan H., Uddin M.N., Abbasi B.H., *BMC Chem.*, **16**, 1–11, (2022).

[2] Gladkova E.V., Babushkina I.V., Belova S.V., Mamonova I.A., Karyakina E.V., Konyuchenko E.A., *Fundam. Res.*, **022**, 530–533, (2013).

[3] Pérez-Díaz M.A., Prado-Prone G., Díaz-Ballesteros A., González-Torres M., Silva-Bermudez P., Sánchez-Sánchez R., *J. Nanoparticle Res.*, **25**, 23, (2023).

[4] Rubina M.S., Elmanovich I.V., Shulenina A.V., Peters G.S., Svetogorov, R.D., Egorov A.A., Naumkin A.V., Vasil'kov A.Y., *Polym. Test.*, **86**, 106481, (2020).

[5] Mochalova A.E., Koryagin A.S., Salomatina E.V., Dydykina V.N., Zotova Yu.D., Smirnova L.A., *Journal of Nanotechnology in Diagnosis and Treatment.*, **1**, 11-16, (2014).

**ИНТРАОПЕРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА РАКА МОЧЕВОГО ПУЗЫРЯ
МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ОПТОВОЛОКОННОГО ЗОНДА**

**Злобина Н.В.^{1,2}, Будылин Г.С.^{2,3,4}, Церегородцева П.С.¹, Камалов Д.М.²,
Сорокин Н.И.², Ширшин Е.А.^{1,2,3}, Камалов А.А.²**

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

²МНОЦ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, Москва, Россия

⁴Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия

Исследованы возможности методов оптической спектроскопии для выявления границы рака мочевого пузыря *in vivo*, таких как спектроскопия диффузного отражения света, а также флуоресцентная спектроскопия в видимом и ИК диапазонах.

Ключевые слова: рак мочевого пузыря, оптическая спектроскопия, интраоперационная диагностика.

По оценкам Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) среди онкологических заболеваний рак мочевого пузыря занимает 6-е место в мире среди мужчин. Пациентам с данным заболеванием часто показано хирургическое лечение, поэтому актуальной задачей является разработка быстрых объективных методов определения границы опухоли во время операции, которые могут повысить их эффективность за счет сокращения их продолжительности и уменьшения числа случаев неполного удаления опухоли.

Существуют различные методы, позволяющие локализовать раковую опухоль в мочевом пузыре, которые уже широко используются для диагностики пациентов в больницах, такие как цистоскопия в белом свете (изображение опухолевой ткани во время данной процедуры представлено на рисунке А), фотодинамическая диагностика, метод узкополосной визуализации [1]. Для определения границы опухоли всё чаще используют спектрально-оптические методы, так как они позволяют проводить анализ молекулярного состава и исследовать структуру и свойства тканей. Так, для определения границы рака мочевого пузыря *in vivo* применяют спектроскопию комбинационного рассеяния света [2], флуоресцентную спектроскопию [3], спектроскопию диффузного отражения света [4]. В то же время вопрос о повышении чувствительности и селективности детектирования границ раковой опухоли с использованием методов спектроскопии остается открытым.

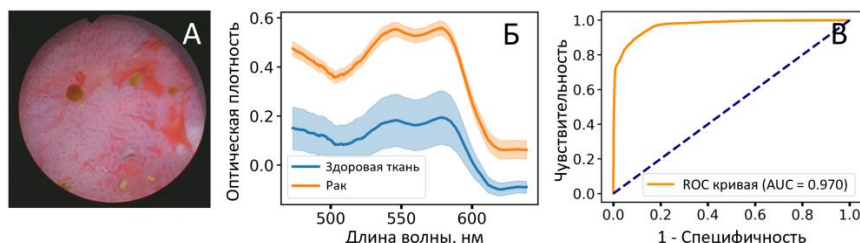


Рисунок. А – Изображение опухолевой ткани, наблюдаемое во время эндоскопического исследования. Б – Спектры поглощения для здоровой и раковой тканей одного из пациентов. В – ROC-кривая (receiver operating characteristic) для классификатора, предсказывающего состояние измеряемой ткани по спектрам диффузного отражения

В данной работе были объединены и реализованы в одной оптической схеме в варианте с контактным зондом 3 метода оптической спектроскопии: флуоресцентная спектроскопия в видимом и ИК диапазонах, спектроскопия диффузного отражения света. На базе МНОЦ МГУ были исследованы возможности данных методов для определения раковой и здоровой тканей мочевого пузыря у пациентов во время операции. На основе полученных данных с помощью методов машинного обучения были построены классификационные модели, позволяющие по спектрам (рис. Б) определить состояние измеряемой ткани. Также была произведена оценка точности полученных моделей (рис. В).

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

[1] Ширшин Е.А., Якимов Б.П., Будылин Г.С., Злобина Н.В., Давыдов Д.А., Армаганов А.Г., Фадеев В.В., Сысоев Н.Н., Камалов А.А., *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.*, №6, 3-18, (2022).

[2] Draga R.O.P., Grimbergen M.C.M., Vijverberg P.L.M., Swol C.F.P.V., Jonges T.G.N., Kummer J.A., Ruud Bosch, J.L.H., *Anal. Chem.*, **82**, №14, 5993-5999, (2010).

[3] Chu J.-H., *Clin. Endosc.*, **48**, №6, 503-510, (2015).

[4] Cauberg E.C.C., de Bruin D.M., Faber D.J., van Leeuwen T.G., de la Rosette J.J.M.C.H., de Reijke T.M., *Eur. Urol.*, **56**, №2, 287-297, (2009).

**АНАЛИЗ СОСТАВА СПЕКТРОВ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПЕЧЕНИ ПАЦИЕНТОВ С
СИНДРОМОМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЖЕЛТУХИ**

Кандурова К.Ю.¹, Сумин Д.С.^{1,2}, Мамошин А.В.^{1,2}, Потапова Е.В.¹

¹Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия

²Орловская областная клиническая больница, г. Орел, Россия

В работе показаны результаты сравнения спектрального состава флуоресценции печени пациентов при наличии и отсутствии диагноза «механическая желтуха». Показанные различия являются перспективными для разработки новых диагностических маркеров прогрессирования печеночной недостаточности.

Ключевые слова: флуоресцентная спектроскопия, механическая желтуха, печеночная недостаточность.

Диагностика и лечение заболеваний, осложненных обтурацией желчевыводящей системы остается актуальной проблемой хирургии. При лечении заболеваний, осложненных синдромом механической желтухи (МЖ), важной задачей является своевременная оценка функционального состояния печени. Первым этапом лечения заболеваний с синдромом МЖ является декомпрессия желчных протоков, направленная на остановку прогрессирования печеночной недостаточности (ПН), определение которой остается сложной задачей. Диагностика ПН основана на данных клинических исследований и наблюдений, а также оценок с помощью прогностических систем, которые дают приблизительные косвенные результаты. Для повышения информативности существующих диагностических алгоритмов и внедрения новых диагностических инструментов в работе рассматривается применение метода флуоресцентной спектроскопии (ФС). ФС обладает высокой чувствительностью к изменениям функционального состояния тканей и позволяет получать информацию о них *in vivo* [1]. Также преимуществом ФС является возможность совмещения со стандартными хирургическими инструментами.

Целью работы было исследование функционального состояния паренхимы печени при синдроме МЖ путем анализа вклада основных флуорофоров тканей печени в спектры флуоресценции, зарегистрированные *in vivo* через тонкоигольный волоконно-оптический зонд, с целью выявления новых диагностических критериев ПН.

Измерения проводились с помощью канала ФС установки для оптической биопсии с источниками излучения на длинах волн 365 и 450 нм [1]. Спектры регистрировали с помощью ПЗС-спектрометра в диапазоне 350-1000 нм. Оптическое излучение доставлялось от источников к тканям печени и обратно к спектрометру через специально разработанный тонкоигольный волоконно-оптический зонд диаметром 1 мм. В исследовании приняли участие 20 пациентов с синдромом МЖ. Запись спектров проводилась во время выполнения антеградной декомпрессии желчевыводящих путей под ультразвуковым и рентгенологическим контролем. Для сравнения были использованы результаты измерений в ткани печени 11 пациентов без синдрома МЖ, исследованных ранее в ходе выполнения оптической биопсии злокачественных новообразований печени [1]. Путем нелинейной деконволюции в спектрах флуоресценции выделялись комбинации гауссовых кривых, отражающих вклад отдельных флуорофоров.

Результаты показали статистически значимое увеличение вклада кривых, отражающих флуоресценцию НАД(Ф)Н, билирубина и флавинов в группе пациентов с МЖ, а также снижение редокс-отношения. Это может указывать на усиление роли гликолиза в энергетическом метаболизме гепатоцитов вследствие нарушения утилизации кислорода из-за билиарной гипертензии [2]. Также наблюдалось статистически значимое увеличение флуоресценции витамина А, которое может быть косвенным признаком снижения выделительной функции гепатоцитов вследствие холестаза, наряду с накоплением фибриллярных белков как предиктора развития фиброза [3].

Различия спектров флуоресценции в паренхиме печени пациентов при наличии и отсутствии синдрома МЖ продемонстрировали, что вклад НАД(Ф)Н, флавинов и билирубина, а также витамина А может быть использован в качестве маркеров тяжести ПН. Полученные результаты лягут в основу комплексного исследования по прогностической оценке течения послеоперационного периода после билиарной декомпрессии желчевыводящей системы с учетом клинико-лабораторных показателей и данных других методов оптической спектроскопии *iv vivo* и *in vitro* в рамках мультимодального подхода.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-25-00487 (<https://rscf.ru/project/23-25-00487/>).

[1] Dremin V., Potapova E., Zherebtsov E., Kandurova K., Shupletsov V., Alekseyev A., Mamoshin A., Dunaev A., *Sci. Rep.*, **10**, 14200, (2020).

[2] Okaya T., Nakagawa K., Kimura F., Shimizu H., Yoshidome H., Ohtsuka M., Morita Y., Miyazaki M., *Hepatogastroenterology*, **55**, №88, 2146-2150, (2008).

[3] Vollmar B., Siegmund S., Menger M.D., *Hepatology*, **27**, №6, 1544-1553, (1998).

**КОРРЕЛЯЦИЯ РЕАКЦИЙ МИКРОСОСУДОВ КОЖИ И ПАРАМЕТРОВ
КЛИНИЧЕСКОГО И ЛАБОРАТОРНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ У
ПАЦИЕНТОВ С СД 2 ТИПА**

Красулина К.А., Глазкова П.А., Глазков А.А., Ковалева Ю.А., Рогаткин Д.А.
ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского, Москва, Россия

Работа посвящена анализу ассоциаций параметров реактивности микрососудов кожи, измеренных методом некогерентной оптической флукуационной флоуметрии, с результатами исследований, отражающих наличие факторов кардиоваскулярного риска, у пациентов с сахарным диабетом 2 типа.

Ключевые слова: некогерентная оптическая флукуационная флоуметрия, кожная микрогемодинамика, сахарный диабет 2 типа.

Введение. В настоящее время существует потребность в неинвазивном количественном способе оценки состояния микрососудов у пациентов с сахарным диабетом (СД), так как микроангиопатические осложнения являются наиболее распространенными последствиями СД и обусловлены поражением именно микроциркуляторного русла. Недавно разработанный метод некогерентной оптической флукуационной флоуметрии (НОФФ) позволяет регистрировать перфузию кожи и реакции микрососудов, которые могут нарушаться при СД и его осложнениях [1]. Цель исследования – анализ ассоциаций показателей микрогемодинамики, измеренных посредством НОФФ, и параметров клинического состояния и биохимического анализа, отражающих риск поражения сердечно-сосудистой системы. **Материалы и методы.** В исследовании приняли участие 52 пациента с СД 2 типа. Ранее нами было показано, что диабетическая ретинопатия (ДР) и нефропатия (ДН) ассоциированы со снижением реактивности микрососудов, поэтому анализ проводился в зависимости от этих осложнений [2]. Перфузия измерялась методом НОФФ на пальце руки, тыльной стороне и большом пальце стопы (датчики 1, 2, 3, соответственно). Проводились функциональные пробы: на руке – окклюзионная, на ноге – тепловая. Оценивались следующие параметры: базовая перфузия (VP_i , где i – номер датчика), площадь под кривой гиперемии после окклюзии и нагрева (AUC_{i_j} , где i – номер датчика, j – секунда, до которой проводился расчет от начала стимула), постокклюзионная реактивная гиперемия (PORH), максимальная (max_LTH_i , где i – номер датчика) и средняя локальная тепловая гиперемия (LTH_{i_j} , где i – номер датчика, j – минута, до которой проводился расчет), время достижения максимальных PORH и LTH (t_max_PORH и t_max_LTH). Проводился корреляционный анализ с использованием коэффициента Спирмена (R_s), в который включали индекс массы тела, объем талии, результаты биохимического анализа крови, отражающие сердечно-сосудистый риск. **Результаты и обсуждение.** У пациентов без ДР наблюдалась корреляция объема талии с реакцией на нагрев: $AUC2_180$ ($R_s = -0,541$; $p = 0,037$) и $LTH3_5$ ($R_s = -0,634$; $p = 0,011$), что соотносится с данными литературы, свидетельствующими, что сосудистая патология более выражена при наличии ожирения, особенно абдоминального. При рассмотрении пациентов без ДР, но имеющих ДН, обнаружены корреляции как объема талии и $AUC2_180$ ($R_s = -0,642$; $p = 0,033$) и $LTH3_5$ ($R_s = -0,510$; $p = 0,037$), так и индекса массы тела с $LTH3_5$ ($R_s = -0,510$; $p = 0,037$). В группе ДР, в которой более вероятны структурные нарушения сосудистой стенки, заметно уже более выраженная ассоциация показателей микроциркуляции и лабораторных маркеров. Мочевая кислота является доказанным фактором кардиоваскулярного риска и повышается с возрастом. Так же было показано, что базовая перфузия может увеличиваться с возрастом и при сердечно-сосудистых заболеваниях в связи со снижением физиологического симпатического тонуса. Это объясняет корреляцию мочевой кислоты с $VP1$ ($R_s = 0,746$; $p = 0,001$) в нашей работе. Также повышение мочевой кислоты ассоциировано с увеличением t_max_PORH ($R_s = 0,657$; $p = 0,008$) и $AUC1_60$ ($R_s = -0,807$; $p < 0,001$), то есть с ухудшением реакции сосудов на стимул. Следовательно, ее влияние на кардиоваскулярный риск может быть опосредовано нарушением реактивности микроциркуляторного русла. Сходным образом, скорость клубочковой фильтрации (СКФ), отражающая микроангиопатическое поражение почек, коррелирует с $VP3$ ($R_s = -0,552$; $p = 0,041$), $AUC3_300$ ($R_s = 0,728$; $p = 0,003$). Если исключить пациентов с ДН, то сохраняется корреляция между СКФ и PORH ($R_s = 0,663$; $p = 0,037$) и реакцией на нагрев ($R_s = 0,650$; $p = 0,042$). Кроме того, чем выше был уровень холестерина и триглицеридов, тем медленнее развивалась реакция на нагрев: t_max_LTH3 : $R_s = 0,669$ ($p = 0,035$) и $0,711$ ($p = 0,032$). Отмечена также отрицательная корреляция глюкозы и $LTH3_3$ ($R_s = -0,767$; $p = 0,016$) и max_LTH3 ($R_s = 0,817$; $p = 0,007$). В группе пациентов, имеющих ДН, и ДР, наблюдалась ассоциация креатинина и $AUC1_120$ ($R_s = -0,581$; $p = 0,037$), мочевой кислоты и $AUC2_120$ ($R_s = -0,786$; $p = 0,021$), ЛПВП и $AUC3_60$ ($R_s = 0,717$; $p = 0,030$). **Заключение.** Таким образом, параметры, оцениваемые методом НОФФ, коррелируют с основными показателями, отражающими риск развития кардиоваскулярной патологии. Следовательно, метод НОФФ перспективен для оценки состояния микрососудов и динамики их функциональных и структурных изменений у пациентов с СД.

[1] Lapitan D., Rogatkin D., *J Biophotonics*, **14**, №5, e202000459, (2021).

[2] Glazkov A., Krasulina K., Glazkova P., Tarasov A., *Photonics*, **10**, 442, (2023).

**О ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ
ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
БИОКОНЬЮГАТОВ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ В
НЕГРЕЮЩИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

**Сёмина П.Н.¹, Исаев И.Л.², Ключанцев А.Б.³, Костюков А.С.¹,
Хренников Д.Е.¹, Замай А.С.⁴, Полюттов С.П.^{1,5}, Карпов С.В.^{1,3,5}**

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, Россия

³Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

⁴ФГБОУ ВО КрасГМУ им. проф. В.Ф.Войно-Ясенецкого Минздрава России, г. Красноярск, Россия

⁵Федеральный Сибирский научно-клинический центр ФМБА России, г. Красноярск, Россия

Обсуждаются схемы апоптоза и перспективы тераностики злокачественных новообразований, механорецепторы которых связаны с биоконъюгатами на основе аптамеров и магнитных наночастиц и подвергаются механотрансдукции в негреющих магнитных полях.

Ключевые слова: тераностика, магнитные наночастицы, механотрансдукция.

Магнитная нанотераностика, включающая в себя наряду с диагностикой также и лечение злокачественных новообразований (ЗНО) при помощи магнитных наночастиц (МНЧ), обладает рядом преимуществ по сравнению с методами лазерной фотодинамической терапии, а также химическим и радиационным воздействием на организм. В разработке тераностических безопасных и эффективных методов особое внимание уделяется магнитомеханическому влиянию на клетки мишени с использованием биоконъюгатов на основе магнитных наночастиц в переменном магнитном поле низкой частоты и при отсутствии нагрева. Одной из компонент биоконъюгата, способствующей селективному связыванию с клетками мишени, являются аптамеры. В экспериментах [1] *in vivo* и *in vitro* наблюдалось эффективное подавление деления клеток карциномы Эрлиха мыши с использованием магнитомеханической терапии. Связывание аптамеров с клетками опухоли обеспечено молекулярным сродством с механорецепторами – трансмембранными белками. Реализация механического воздействия возможна через различные конфигурации магнитных наночастиц, обладающих сохраняющимся постоянным магнитным дипольным моментом, и может включать в себя МНЧ "ядро-оболочка", димеры, состоящие из золотых и магнитных наночастиц, а также смесь отдельных золотых и магнитных наночастиц, образующихся в гетерогенных гидрозолях. Методом броуновской динамики с использованием реалистичных парных потенциалов межчастичного взаимодействия (диполь-дипольное магнитное, ван-дер-ваальсово, экранированное кулоновское, а также диссипативные силы вязкого и касательного межчастичного трения и случайная стохастическая сила) показано, что частицы магнетита, сохраняющие собственный магнитный дипольный момент, благодаря дальнедействующим диполь-дипольным взаимодействиям, могут образовывать многочастичные агрегаты, закреплённые на наночастицах золота. Образование агрегатов из ориентационно-упорядоченных магнитных наночастиц вокруг золотой частицы сопровождается: а) ростом суммарного магнитного дипольного момента агрегата, способствующего увеличению силы воздействия на трансмембранный белок; б) компенсацией тепловых флуктуаций магнитного дипольного момента и его сохранением в одиночных суперпарамагнитных наночастицах размером порядка 15 нм. Показано, что силовое воздействие на трансмембранный белок, превышающее пороговое значение силы и создаваемое движением магнитной наночастицы в переменном негреющем магнитном поле, связанной при помощи аптамера с белком, может запускать каскад внутриклеточных реакций, приводящих к апоптозу клетки опухоли. Предложены схемы реализации магнитодинамической терапии онкологических заболеваний и наиболее вероятные сценарии повреждающего механического воздействия на мембраны злокачественных клеток с использованием магнитных наночастиц различных конфигураций, функционализированных аптамерами. Проанализированы требования к магнитным наночастицам и их пригодности для биомедицинских приложений. Обращено внимание на возможность образования многочастичных агрегатов из магнетитовых наночастиц во внешнем магнитном поле и их локализации вблизи мембран злокачественных клеток. Показано, что сценарий, включающий в себя процесс агрегации наночастиц магнетита, обеспечивает механическое воздействие, амплитуда которого достаточна для достижения терапевтического эффекта. Подтверждена возможность применения функционализированных аптамерами МНЧ в переменном магнитном поле низкой частоты для успешной терапии злокачественных новообразований. Представлено возможное объяснение экспериментальным результатам использования магнитодинамической терапии на основе магнетитовых наночастиц, при которой достигалось полное подавление карциномы Эрлиха в переменном магнитном поле как ответ на магнитомеханический стимул.

[1] Belyanina I.V., Zamay T.N., Zamay G.S., et.al., *Theranostics.*, 7, 13, 3326-3337, (2017).

ХЕМОСЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА ФЛУОРЕСЦЕИНА, ОСНОВАННЫЕ НА МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОМ ПЕРЕНОСЕ ПРОТОНА

Слюсарева Е.А., Суржикова Д.П.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Спектральное детектирование ионного равновесия позволяет использовать флуоресцеин и его производные для микроскопической визуализации биологических объектов. Мы рассмотрели влияние температуры, фосфат-ионов и соразтворителей – вязких агентов – на ратиометрический флуоресцентный сигнал флуоресцеина, традиционно используемый для рН индикации и показали необходимость учета этих факторов при интерпретации результата.

Ключевые слова: люминесцентный сенсор, флуоресцеин, межмолекулярный перенос протона.

Основные применения органического красителя флуоресцеина связаны с его выдающимися флуоресцентными свойствами. Его производные используют для оптической визуализации белков и макромолекул, в качестве лазерных сред, в клинической медицине и др. Однако близким к единице квантовым выходом флуоресценции (0,93) обладает лишь дианион флуоресцеина. При понижении рН ниже 7 краситель обратимо переходит в моноанионную (квантовый выход 0,36) и другие протолитические формы с отличными люминесцентными свойствами. Наибольший практический интерес представляет дианион-анионная ступень диссоциации красителя, проявляющая себя в физиологическом диапазоне рН (рК 6,7 [1]). Безразмерный ратиометрический сигнал (рис. а) - отношение интегральных интенсивностей испускания, полученных при преимущественном возбуждении дианиона (488 нм) и моноаниона (435 нм) – используется для внутриклеточного детектирования рН [2].

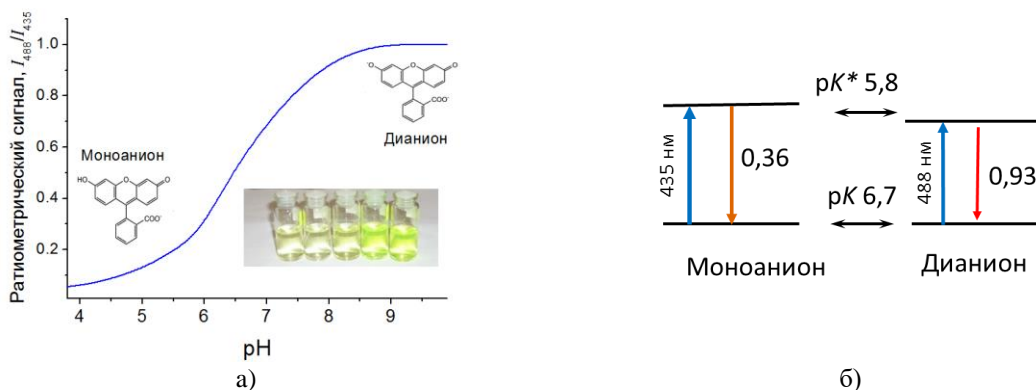


Рисунок. Ратиометрический сигнал (а), схема дианион-анионного равновесия флуоресцеина (б)

В отличие от термодинамической константы ионного равновесия, эффективная константа может быть подвержена влиянию микроокружения (температура, ионный состав, наличие соразтворителей). Дополнительное возмущение вносится тем, что флуоресцеин является фотокислотой и проявляет существенное отличие констант равновесия в основном (рК) и возбужденном (рК*) состояниях (рис. б). Это приводит к неоднозначности трактовки ратиометрического сигнала флуоресценции.

Мы рассмотрели влияние следующих факторов на ратиометрический сигнал флуоресцеина: температура (10-80 °С), присутствие вязких агентов (сахароза 0-40%, глицерин 0-47%), фосфат ионов (0.1 - 2 М) [3]. Все эти факторы выполняют важную, а иногда и принципиальную роль в функционировании биологических сред. Так, фосфат-ионы отвечают за гомеостаз в физиологических жидкостях (напр. в плазме крови), вязкость имеет решающее значение для процессов, контролируемых диффузией, температура определяет эффективность ферментативных реакций.

Мы показали необходимость учета всего набора факторов, влияющих на эффективное значение константы равновесия. Полученные экспериментальные результаты обсуждены с привлечением термодинамического цикла Ферстера, формализма Вант-Гоффа, в терминах температурного и статического тушения флуоресценции, спектральных сдвигов в зависимости от полярности окружения. Определена чувствительность сигнала к разным факторам и даны рекомендации для корректного использования ратиометрического сигнала в аналитических целях.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 22-22-00724.

- [1] Martin M.M., Lindqvist L., *J. Lumin.*, **10**, 381–390, (1975).
 [2] He C.B., Lu K.D., Lin W.B., *J. Am. Chem. Soc.*, **136**, 12253–12256, (2014).
 [3] Surzhikova D.S., Gerasimova M.A., Slyusareva E.A., *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys*, **86**, 1203–1206, (2022).

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РАТИОМЕТРИЧЕСКОГО ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО СИГНАЛА ФЛУОРЕСЦЕИНА

Суржикова Д.П., Слюсарева Е.А.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Флуоресцеин применяется в различных видах биохимического анализа. Мы рассмотрели влияние температуры и вязких соразтворителей на ратиометрический флуоресцентный сигнал флуоресцеина. Благодаря кинетической модели процессов, были оценены факторы, влияющие на величину сигнала.

Ключевые слова: температурный сенсор, флуоресцеин, флуоресцентный ратиометрический сигнал.

Флуоресцеин и его гомолог флуоресцеин-изотиоцианат, успешно используются в биомедицине для маркирования белков. Дополнительно, флуоресцеин демонстрирует рН-индикативные свойства, благодаря изменению зарядового состояния при изменении рН среды. В физиологически важном диапазоне рН 4÷8, краситель существует в виде смеси ионных форм: моноанион (М) и дианион (D), с различными спектральными характеристиками. Для сенсорных приложений красителя удобно использовать безразмерные аналитические сигналы, отнесенные к внутреннему референсу. Таким сигналом является флуоресцентный ратиометрический сигнал. Представляет из себя отношение двух интенсивностей при различных условиях возбуждения, а именно 488 нм и 435 нм, при преимущественном возбуждении М и D форм красителя, соответственно. Краситель чувствителен к изменению своего микроокружения, таких как наличие протон-акцепторных и протон-донорных добавок [1], вязких соразтворителей, изменение температуры. Все перечисленные факторы необходимо учитывать использования флуорофора в качестве флуоресцентного зонда.

Ранее [2] было показано, что амплитуда спектров испускания раствора флуоресцеина в 1М фосфатном буфере при рН 6,5 увеличивается на 13%, при увеличении температуры в диапазоне 10°C÷80°C. Интенсивность увеличивается, не смотря тушение флуоресценции каждой формы на 13%. Данное изменение излучения происходит из-за смещения равновесия ΔpK в основном и возбужденном состояниях на 0,27 в кислую область рН, что в итоге приводит к увеличению концентрации D форм флуорофора с высоким квантовым выходом ~0,93. Ратиометрический сигнал линейно зависит от температуры. Наклон прямой зависит от рН и оказывается достаточным для обеспечения чувствительности метода до 0,5°C (рисунок). Было оценено смещение равновесия в основном состоянии ΔpK равно 0,18, в присутствии двух соразтворителей – глицерин (40% вес.) и сахараза (30% вес.).

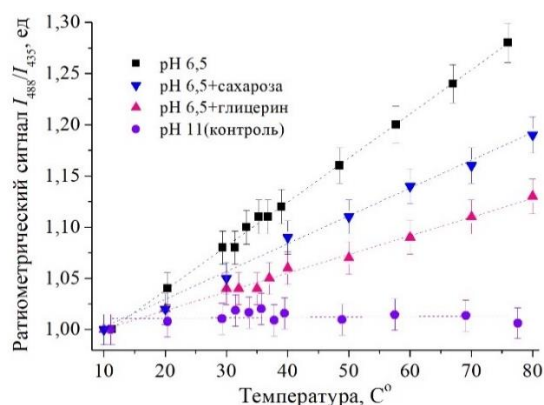


Рисунок. Ратиометрический сигнал водного раствора флуоресцеина при рН 6.5, в присутствии сахаразы и глицерина и рН 11

Для разграничения вкладов трех механизмов использовалась кинетическая модель быстрых процессов, базирующаяся на данных, непосредственно или косвенно получаемых стационарными и время разрешенными флуоресцентными методами с учетом термодинамического цикла Ферстера. Результат работы увеличит информативность флуоресцентного сигнала красителя флуоресцеина и его гомолога флуоресцеина-изотиоцианата в функционально значимых биологических и химических системах.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 22-22-00724.

[1] Surzhikova D.S., Gerasimova M.A., Slyusareva E.A., *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys*, **86**, 1203–1206, (2022).

[2] Лях Д.А., Суржикова Д.П., Слюсарева Е.А., *Материалы всероссийской научной конференции с международным участием конференции «Енисейская фотоника-2022», Красноярск, 19-24 сентября 2022 г.*, **2**, 147–148, (2022).

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФАНТОМНОГО ВОЛОКОННОГО ЭНДОСКОПА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Фроловцев Д.Н., Ивченко А.В., Магницкий С.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

С помощью методов машинного обучения решена задача классификации изображений, измеренных с помощью фантомного волоконного эндоскопа. Точность предсказаний нейросети составила 85-88% при изгибе волокна с радиусом кривизны вплоть до 3 см⁻¹

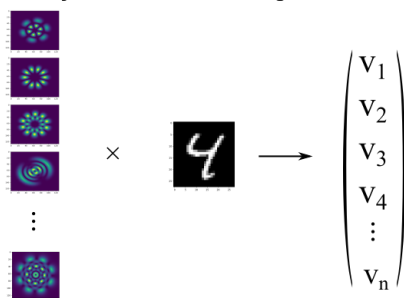
Ключевые слова: фантомные изображения, фантомная эндоскопия, машинное обучение.

Фантомный волоконный эндоскоп [1] (ФВЭ) – это эндоскоп, зонд которого выполнен в виде оптического многомодового волокна. Поперечные размеры такого зонда могут быть доведены до десятых долей миллиметра, что в будущем позволит снизить инвазивность при исследовании биологических живых объектов. В ФВЭ информация об изображениях получается следующим образом. В волокно заводится пространственно-структурированное оптическое излучение. Затем излучение распространяется по оптическому волокну. Тем самым измеряемый объект освещается светом с некоторой пространственной структурой. Рассеянное объектом излучение собирается и регистрируется фотодетектором, значение фототока в котором определяется выражением

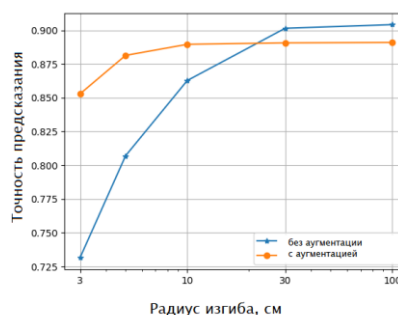
$$v_k = I_k(x, y)T(x, y)dxdy, \tag{1}$$

где v_k – величина зарегистрированного фотодетектором фототока, $I_k(x, y)$ – пространственный профиль интенсивности освещающего света, $T(x, y)$ – изображение измеряемого объекта. Процесс получения v_k повторяется для всего заданного набора $I_k(x, y)$, в результате чего формируется вектор \vec{v} , несущий в себе информацию об изображении $T(x, y)$ (рис. а). В настоящей работе на входе оптического волокна излучение задавалось в виде собственных мод оптического волокна (385 различных мод), затем моделировалось его распространение вдоль оптического волокна (с учетом изгиба волокна) с применением библиотеки pyMMF [2], и рассчитывалась величина $I_k(x, y)$.

В качестве классифицируемых изображений $T(x, y)$ использовался датасет MNIST (пример – цифра «4» на рис. а), состоящий из рукописных цифр от «0» до «9». Задача классификации состояла в предсказании цифры на основе вектора \vec{v} .



(а)



(б)

Рисунок. (а) принцип получения изображения в волоконном фантомном эндоскопе, (б) – зависимость точности предсказания модели при различных радиусах изгиба оптического волокна зонда для модели, без аугментации по изгибу волокна (синяя кривая) и с аугментацией по изгибу (оранжевая кривая)

Созданы и обучены две одинаковые по архитектуре нейронные сети, состоящие из четырех полносвязных слоев с функцией активации ReLU. Первая нейронная сеть обучалась на данных для прямого волокна, а при обучении другой нейронной сети применялась аугментация по изгибу волокна. Результаты предсказания обученных нейронных сетей приведены на рис. б. Из рисунка видно, что применение аугментации по изгибу позволило нейронной сети давать более точные предсказания в области сильно изогнутых волокон (радиус кривизны – 3-30 см).

Полученные результаты свидетельствуют о возможности создания ФВЭ, зонд которого может изгибаться в процессе получения изображения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-12-00155). Исследование выполнено при поддержке Некоммерческого Фонда развития науки и образования "Интеллект".

[1] Magnitskiy S.A. et al, *Optics Letters*, **47**, №4, 754-757, (2022).

[2] pyMMF: [электронный ресурс]. URL: <https://zenodo.org/record/5524192> (Дата обращения: 31 мая 2023 г.)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УВ-СОДЕРЖАЩИХ НАНОЧАСТИЦ
ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ НА
НОВООБРАЗОВАНИЯ (ЭКСПЕРИМЕНТЫ *IN-VIVO*)

Хрущалина С.А., Юрлов И.А., Рябоchkина П.А.,
Куликов О.А., Шляпкина В.И., Агеев В.П.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
г. Саранск, Россия

Представлены результаты экспериментов *in-vivo* по бесконтактному воздействию лазерным излучением с длиной волны 980 нм на новообразования, покрытые Ув-содержащими наночастицами, а также при интратуморальном введении суспензии данных частиц.

Ключевые слова: наночастицы, редкоземельные ионы, гипертермия.

При возбуждении интенсивным лазерным излучением диэлектрических наночастиц, высоколегированных редкоземельными (РЗ) ионами, может происходить их значительный разогрев, приводящий к «белому» излучению [1-3]. Данный эффект может быть использован для усиления теплового действия лазерного излучения на биоткань. В работе [3] в ходе экспериментов *in-vivo* (на крысах) нами была показана принципиальная возможность использования частиц на основе диоксида циркония, легированного ионами Yb^{3+} , для усиления теплового эффекта излучения с длиной волны 980 нм. В работе [4] нами была исследована возможность использования частиц на основе диоксида циркония, легированных различными РЗ ионами (Ho^{3+} , Tm^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+}), для усиления нагрева биоткани лазерным излучением различных длин волн (457, 532, 980, 1550, 1940 нм). В результате экспериментов *in-vivo* было выявлено, что эффект наиболее выражен для иттербий-содержащих частиц и излучения с длиной волны 980 нм.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности использования Ув-содержащих частиц при их возбуждении лазерным излучением с длиной волны 980 нм для лечения подкожного новообразования. Были проведены исследования цитотоксичности указанных частиц (ZrO_2 -30мол.% Yb_2O_3) и эксперименты *in-vivo* (на мышах линии BALB/c). Для исследования использовался опухолевой штамм карциномы легкого. Животные с опухолью были разделены на четыре группы. В первой группе животные с опухолью не получали никакого лечения (контроль). Во второй группе животным интратуморально вводили суспензию ZrO_2 -30мол.% Yb_2O_3 . В третьей группе животным на кожу, покрывающую опухолевый узел, наносилась густая суспензия порошка ZrO_2 -30мол.% Yb_2O_3 в дистиллированной воде. Животным второй и третьей группы двукратно с интервалом 48 часов производили облучение опухолевого узла и прилежащие участки лазером с длиной волны 980 нм и мощностью 1 Вт. В четвертой группе осуществлялось воздействие на опухоль лазерным излучением с длиной волны 980 нм (позитивный контроль). За животными вели ежедневные наблюдения, фиксируя количество летальных случаев и размеры опухоли. Также рассчитывался процент торможения роста опухоли спустя 3 и 13 дней после окончания терапии. На основании полученных данных сделан вывод о влиянии использования наночастиц на перечисленные параметры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (грант №23-72-01099).

[1] Ryabochkina P.A., Khrushchalina S.A., Yurlov I.A., Egorysheva A.V., Atanova A.V., Veselova V.O., Kyashkin V.M., *RSC Adv.*, **10**, 26288 – 26297, (2020).

[2] Tabanlı S., Cinkay Yılmaz H., Bilir G., Erdem M., Eryurek G., Di Bartolo B., Collins J., *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **7**, R3199- R3210, (2018).

[3] Ryabochkina P.A., Khrushchalina S.A., Belyaev A.N., Bushukina O.S., Yurlov I.A., Kostin S.V., *Quant. El.*, **51**, 1038–1043, (2021).

[4] Khrushchalina S.A., Yurlov I.A., Ryabochkina P.A., Ageev V.P., Kulikov O.A., Shlyapkina V.I., Tremasov M.N., Zharkov M.N., Belyaev A.N., Bushukina O.S., *2022 International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, Russian Federation*, 1-1, (2022).

**ФОТОПРОЦЕССЫ В КОМПЛЕКСАХ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ
ФЛАВОНОИДОВ КАЛИНЫ С УЧАСТИЕМ МОЛЕКУЛ КИСЛОРОДА
И НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА**

Цибульникова А.В.¹, Землякова Е.С.^{1,2}, Артамонов Д.А.¹,
Самусев И.Г.¹, Брюханов В.В.¹, Зюбин А.Ю.¹

¹ФГАОУ ВО «БФУ им. И.Канта», Калининград, Россия

²ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия

В работе установлена динамика люминесцентных свойств экстракта *Viburnum Opulus L.* в условиях изменения концентрации молекул кислорода. Показано, что в результате кислородонасыщения происходит формирование люминесцентного максимума на длине волны 580 нм.

Ключевые слова: люминесценция, время затухания, комплексообразование.

Природные экстракты растений в большинстве обладают высокой люминесцентной способностью флавоноидов (кверцетин, морин, таурин, мурецетин и др. [1, 2]), в том в числе и в окисленной форме.

В настоящей работе исследована динамика изменения оптической плотности на длине волны регистрации максимума поглощения (520 нм) экстракта калины красной (*Viburnum Opulus L.-VO*). Было показано, что максимумы поглощения в спектре экстракта соответствуют соединениям кверцетина и цианидина. Установлено, что оптическая плотность экстракта с ростом концентрации наночастиц золота возрастает. Процесс увеличения оптической плотности обусловлен спектральным перекрыванием области плазмонного поглощения наночастиц и области поглощения экстракта. Так же в результате кинетических исследований было установлено наличие долгоживущих состояний люминесцирующих молекул экстракта при возбуждении длиной волны 400 нм. В результате эксперимента по кислородонасыщению экстракта были выявлены спектральные изменения люминесценции в видимом диапазоне длин волн.

На рисунке представлена динамика изменения интенсивностей люминесценции (I - интенсивность люминесценции с кислородом, I_0 - интенсивность люминесценции без кислорода) на длинах волн регистрации в условиях изменения концентрации молекул кислорода ($C[O_2]$).

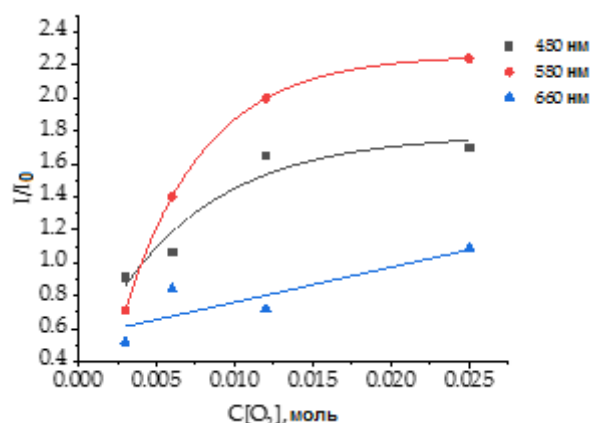


Рисунок. Функции изменения интенсивностей (I/I_0) люминесценции экстрактов с наночастицами золота на различных длинах волн регистрации максимума свечения от концентрации кислорода. Длина волны стационарного фотовозбуждения $\lambda=400$ нм

В условиях изменения концентрации кислорода установлены зависимости изменения интенсивности люминесценции экстракта калины на длинах волн регистрации спектров люминесценции. При допировании кислорода во все растворы, были обнаружены и исследованы спектральные и кинетические особенности затухания люминесценции с максимумами на длинах 480 нм и 580 нм. Показано, что люминесценция на длине волны 580 нм обусловлена окисленной формой кверцетина, входящего в состав флавоноидов калины, возникшей при высоких концентрациях кислорода. Зарегистрирована долговременная хемилюминесценция ($\lambda \sim 580$ нм, $t \sim 15$ мкс) растворов как результат радикальных процессов с участием молекулярного кислорода и молекул экстракта.

Исследование выполнено в рамках Федерального проекта Государственного задания Минобрнауки РФ № FZWM-2020-0003.

[1] Ge M., Liu S., Li J., Li M., Li S., James T.D., Chen Z., *Coord. Chem. Rev.*, **477**, 214951, (2023).

[2] Chen J., Zhao Z., Zhang X., Shao J., Zhao C., *Chem. Biodivers.*, **18**, e2100404, (2021).

**ПРИМЕНЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ
ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ АДЕНОКАРЦИНОМЫ И ПАРЕНХИМЫ ПЕЧЕНИ
НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ
ПРИ ПУНКЦИОННОЙ БИОПСИИ**

**Шуплецов В.В.¹, Потапова Е.В.¹, Жеребцов Е.А.¹, Дрёмин В.В.¹,
Кандурова К.Ю.¹, Сумин Д.С.^{1,2}, Мамошин А.В.^{1,2}, Дунаев А.В.¹**

¹ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Россия

²БУЗ Орловской области «Орловская областная клиническая больница», г. Орёл, Россия

Исследование направлено на разработку метода классификации злокачественных опухолей и паренхимы печени на основе параметров времени жизни флуоресценции. Сравнились результаты использования трех методов машинного обучения. Наиболее эффективным для решения задачи классификации признан метод случайного леса. Полученные результаты показали высокую чувствительность и специфичность метода для дифференциации метастатических опухолей печени от здоровой паренхимы.

Ключевые слова: оптическая биопсия, машинное обучение, время жизни флуоресценции, опухоль печени.

Печень является органом с наиболее частой локализацией метастазов различных видов рака, что связано с характером кровообращения и функцией печени в организме. Прогноз течения заболевания сильно коррелирует с задержкой диагностики. Методы тонкоигольной оптической биопсии являются перспективными для разработки технологий быстрой дифференциации патологических тканей [1]. К сожалению, в тонкоигольной биопсии печени на данный момент остается ряд нерешенных проблем.

Известно, что различные формы флуорофоров NAD(P)H, которые характеризуют метаболический статус тканей и служат биомаркерами опухолевых образований, практически невозможно различить по положению спектров их флуоресценции в биологической ткани. Кроме того, на регистрируемый сигнал оказывает сильное влияние кровь. Такая ситуация создает трудности при анализе данных с использованием стандартных методов оптической регистрации интенсивности флуоресценции. Однако, будучи связанными с белками, параметры времени жизни флуоресценции существенно изменяются, что позволяет анализировать данные компоненты, используя автономные системы счета одиночных фотонов с корреляцией по времени (TCSPC). Цель данного исследования заключалась в разработке метода классификации злокачественных образований и паренхимы печени при проведении тонкоигольной пункционной биопсии печени с целью повышения чувствительности и специфичности их дифференциации.

В данном исследовании использовалась система TCSPC (Becker&Hickle, Германия) на основе платы счета фотонов SPC-130-EMN, детектора HPM-100-40 с фильтром MF530-43 и лазера BDL-SMN с длиной волны 375 нм. В исследовании приняли участие 10 пациентов с диагнозом вторичный метастатический рак печени (темноклеточная аденокарцинома – 3 пациента; тубулярная аденокарцинома – 7 пациентов), подтвержденный впоследствии на основе патоморфологического анализа. Для каждого пациента в ходе проведения стандартной процедуры чрескожной пункционной биопсии проведена регистрация параметров времени жизни флуоресценции в области условно здоровой ткани печени и опухоли [1].

Для классификации опухолевых тканей и паренхимы печени были использованы и сравнены между собой следующие методы машинного обучения: метод опорных векторов, метод логистической регрессии и метод случайного леса. В качестве точностного анализа каждого метода была выбрана метрика площади под ROC-кривой (AUC), полученная методом случайного смешивания (по 10 эпохам), в ходе которого наиболее эффективным классификационным методом был определен метод случайного леса. Для измеренных пар параметров времени жизни флуоресценции были получены следующие значения чувствительности и специфичности: (темноклеточная аденокарцинома/паренхима печени) AUC = 0.99±0.01; (тубулярная аденокарцинома/паренхима печени) AUC = 0.95±0.02.

Использование методов машинного обучения позволило повысить точность дифференциации опухолевых тканей от паренхимы печени по сравнению с нашими предыдущими исследованиями [2], где были использованы простые линейные подходы к классификации. В дальнейшем наша работа будет направлена на расширение набора данных с целью уточнения разработанного классификатора, в том числе для дифференциации различных новообразований печени между собой.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-15-00325.

[1] Dremin V.V., Potapova E.V., Zherebtsov E.A., Kandurova K.Y., Shupletsov V.V., Alekseyev A.G., Mamoshin A.V., Dunaev A.V., *Sci. Rep.*, **10**, 1, 14200, (2020).

[2] Zherebtsov E.A., Potapova E.V., Mamoshin A.V., Shupletsov V.V., Kandurova K.Y., Dremin V.V., Abramov A.Y., Dunaev A.V., *Biomed. Opt. Express*, **13**, 633-646, (2022).

КВАНТОВАЯ ОПТИКА И КОММУНИКАЦИИ

УЯЗВИМОСТЬ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ С ФАЗОВО-ВРЕМЕННЫМ КОДИРОВАНИЕМ В УСЛОВИЯХ ЗАТУХАНИЯ

Кронберг Д.А.

Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва, Россия

Рассматривается стойкость протокола квантовой криптографии с фазово-временным кодированием и строится явная атака, дающая противнику полную информацию о ключе. Описываются ошибки в доказательстве стойкости, делающие рассматриваемую атаку возможной.

Ключевые слова: квантовая криптография, квантовая информация, постселективные квантовые преобразования.

Квантовая криптография ставит своей целью распределение секретного ключа без вычислительных и технологических предположений о перехватчике. Важным преимуществом квантовой криптографии является возможность математического доказательства стойкости против всех возможных атак на состояния в рамках данной физической модели оборудования. Тем не менее, доказательство стойкости является достаточно сложным теоретическим элементом протокола квантового распределения ключей (КРК) [1].

В данной работе рассматривается протокол КРК с фазово-временным кодированием, использующий трёхмерное пространство у отправителя и получателя, а также детектирование вмешательства противника по двум параметрам: битовой ошибке внутри базиса и контрольным временным отсчетам. Показывается, что доказательство стойкости для данного протокола КРК было проведено с ошибкой. Математически эта ошибка соответствует неверному выбору размерности пространства получающей стороны, а физически она соответствует тому, что были неверно рассмотрены атаки в условиях затухания в линии связи, при которых противник может блокировать некоторые посылки.

Построена явная атака, при которой противник блокирует четверть передаваемых однофотонных посылок, и для построенной атаки вычислена информация перехватчика. Показано, что атака демонстрирует критическую уязвимость протокола: возможны параметры атаки, при которых противник знает весь криптографический ключ, в то время как легитимные пользователи считают, что он полностью секретен. Также построена квантовая схема предлагаемой атаки.

Также обсуждается адаптация атаки к реалистичным условиям работы протокола: ослабленным лазерным импульсам вместо однофотонного источника сигналов и использования метода обманных состояний с подходом Готтесмана-Ло-Люткенхауса-Прескилла для оценки доли ключа, соответствующей вкладу однофотонных посылок. Показывается, что в практических условиях протокол перестает быть стойким при любой величине затухания в линии связи, то есть при распределении ключей на любое ненулевое расстояние.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №19-11-00086, <https://rscf.ru/project/19-11-00086/>.

[1] Кронберг Д.А., *ТМФ*, **214**, №1, 140–152, (2023).

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ В АТМОСФЕРЕ

Ерохин К.Ю.¹, Казанцев С.Ю.¹, Казиева Т.В.^{1,2}, Пчелкина Н.В.¹

¹МТУСИ, Москва, Россия

²НЯУ МИФИ, Москва, Россия

Представлено описание экспериментальной научно-образовательной установки для исследования технологии квантового распределения ключей в проводных и беспроводных системах связи. Показана перспективность применения созданного комплекса для отработки отдельных модулей систем защищенной связи в атмосфере.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, лазерная связь в атмосфере, FSO.

Известно, что наиболее перспективным методом передачи криптографического ключа сегодня считается технология квантового распределения ключей (КРК). Технология КРК на физическом уровне позволяет гарантировать передачу данных [1]. Сегодня в мире для защиты передаваемой информации по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) ряд коммерческих фирм предлагает готовое решение в виде блоков КРК, которые производятся серийно [2]. В тоже время во многих случаях прокладка ВОЛС не всегда возможна, либо это требует слишком высоких затрат, поэтому целесообразно использовать передачу данных через атмосферные оптические линии связи (АОЛС) [3]. В работе представлена концепция реализации в свободной атмосфере беспроводной оптической связи, защищенной по технологии КРК. Данный подход предполагает модульное построение системы квантовой связи в атмосфере. С этой целью была создана экспериментальная установка для отработки основных принципов реализации КРК через атмосферную трассу и проведены ключевые эксперименты, показавшие перспективность данного подхода. Схема экспериментов показана на рисунке. Исследования выполнялись на уникальной научной установке для исследований технологии КРК в проводных и беспроводных системах связи [4], в которой модули АОЛС специалистами АО МОСТКОМ были подвергнуты модификации, заключающейся в том, чтобы исключить участки соединения многомодового волокна с одномодовым. Необходимость такой модификации следовала из исследований [5]. Длина атмосферной трассы составляла 180 м и проходила между двумя зданиями МТУСИ, а сами оптические блоки устанавливались на крышах зданий, что позволяло проводить исследования в реальных городских условиях, когда на оптические блоки АОЛС воздействует полный спектр внешних факторов окружающей среды. В качестве блоков КРК использовался научно-образовательный комплекс, позволяющий контролировать основные параметры передачи квантового ключа между блоками НОК 1 и НОК2 [4]. На созданной установке были исследованы затухание сигнала при разных погодных условиях, изменение поляризации излучения на атмосферной трассе 180 м, динамика потерь в канале связи, влияние фоновой засветки на работу блоков КРК. В режиме синхронизации блоков КРК по внешнему кабелю по атмосферной трассе 180 м было осуществлена передача квантового ключа длиной ~1 кбит при QBER<5%.

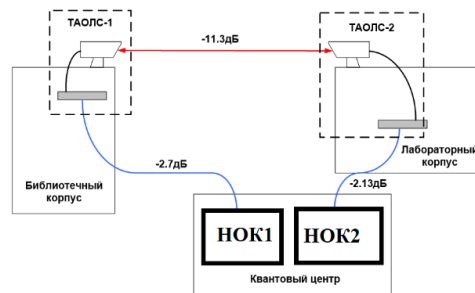


Рисунок. Схема экспериментальной научно-образовательной установки

Исследования, проведенные на созданной установке, выявили значительный потенциал этого комплекса для выполнения учебно-исследовательских проектов студентов и аспирантов, высокая надежность и многофункциональность созданной платформы позволяет проводить не только научные исследования, но и использовать комплекс в образовательных целях.

[1] Martin V. et al., *EPJ Quantum Technology*, **8**, 19-50, (2021).

[2] Боев А.А. и др., *Письма в ЖТФ*, **48**, №15, 15-18, (2022).

[3] Боев А.А. и др., *Лазерно-информационные технологии 2022: труды XXX Международной научной конференции*, 84-85. – EDN GLVYOE.

[4] Болотов Д.В. и др., *Сборник научных трудов, XII международная конференция по фотонике и информационной оптике*, 514-515. – EDN DBXMPK.

[5] Bolotov D.V. et al., *2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, **5**, No1, 57-61, (2022).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОФОТОННЫХ ЛАВИННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПРИ
ТЕМПЕРАТУРАХ ОТ -40 °С ДО -15 °С

Борисова А.В., Степанов К.В., Втюрина А.Г.
АО «ИнфоТеКс», Москва, Россия

В работе представлены зависимости основных параметров однофотонных лавинных детекторов от температуры в диапазоне от -40 °С до -15 °С. Также показано влияние температуры детектора на работу системы квантового распределения ключей.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, однофотонные лавинные детекторы, вероятность послеимпульсов.

Одним из основных факторов, влияющих на качество работы системы квантового распределения ключей (КРК) являются шумы однофотонных лавинных детекторов (SPAD): темновые отсчеты и послеимпульсы [1]. Чем выше уровень шума, тем ниже соотношение сигнал-шум (QSNR) и, соответственно, больше процент квантовых ошибок в просеянном ключе (QBER). Снизить вероятность темновых отсчетов возможно путем охлаждения детектора. Однако с понижением температуры растет вероятность послеимпульсов [1]. Для её уменьшения применяют блокировку детектора на заданное время, называемое мертвым временем [2]. Это неизбежно приводит к ограничению скорости регистрации квантовых состояний, особенно на коротких линиях связи с малыми потерями. Отсюда следует, что важным вопросом при настройке однофотонных детекторов для систем КРК является выбор оптимальной рабочей температуры SPAD и длительности мертвого времени.

С этой целью для двух однофотонных лавинных детекторов Wooriro SPAD Mini-flat измерены вероятность темнового счета DCP и вероятность послеимпульсов P_{ap} в зависимости от температуры в диапазоне от -40 °С до -15 °С при фиксированной квантовой эффективности QE (рис. 1). Затем исследована зависимость параметров работы системы КРК от длины линии связи L при разных температурах детекторов и при нескольких значениях мертвого времени τ : 400 нс, 200 нс, 8 нс. Из результатов (рис. 2) следует, что для каждого расстояния КРК можно выбрать оптимальное сочетание температуры детектора и мертвого времени, при которых достигается большая длина просеянного ключа при неизменном или меньшем значении QBER. В частности, на линии длиной 100 км более высокое качество КРК достигается при температуре -40 °С и мертвом времени 400 нс, на линии 50 км – при температуре от -35 °С до -30 °С и мертвом времени 8 нс, на коротких линиях до 25 км – при -25 °С и мертвом времени 8 нс.

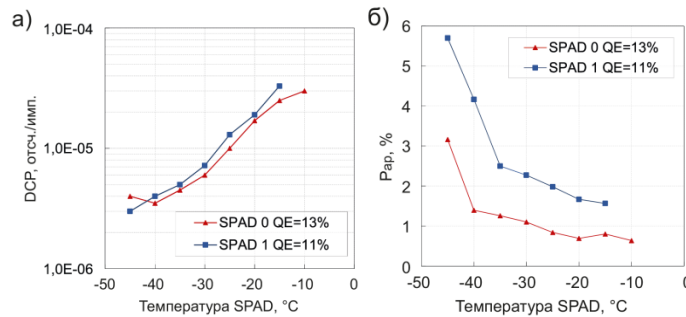


Рис. 1. Температурные зависимости вероятности темновых отсчетов DCP (а) и вероятности послеимпульсов P_{ap} через 8 нс после регистрации фотона (б)

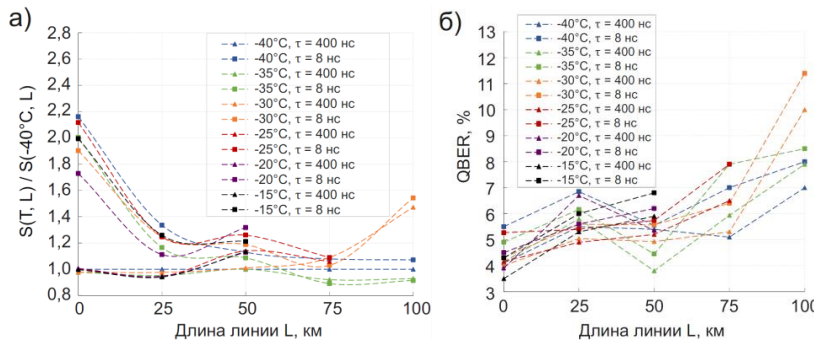


Рис. 2. Относительная длина просеянного ключа $S(T, L)/S(40^\circ\text{C}, L)$ (а) и процент квантовых ошибок QBER (б) в зависимости от длины линии L при разной температуре и мертвом времени τ однофотонных детекторов

[1] Baek S.H., *Journal of the Korean Physical Society*, **78**, №7, 634-641, (2021).

[2] Losev A.V., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **58**, №3, 1-11, (2022).

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НА КРК В ПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Болотов Д.В.¹, Белова О.С.², Бушуев Э.Ю.¹, Грычкин С.Е.¹, Казанцев С.Ю.¹, Колесников О.В.¹, Строганова Е.П.¹

¹МТУСИ, Москва, Россия

²НИУ МЭИ, Москва, Россия

Разработаны методики эксперимента и созданы экспериментальные установки для исследования влияния атмосферных разрядов на передачу данных в проводных линиях связи, защищенных по технологии квантового распределения ключей. Представлены результаты исследований характеристики квантового канала связи, реализованного через оптический кабель, подвергающейся воздействию сильных электромагнитных полей.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, атмосферные разряды, волоконно-оптические линии связи.

В настоящее время начинают широко использоваться квантовые системы коммуникации, основанных на технологии квантового распределения ключей (КРК) [1]. Увеличение потока данных, передающихся в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) с использованием различных технологий уплотнения, выявило значительную чувствительность скорости передачи информации к воздействию атмосферных разрядов [2]. Поэтому квантовые сети, где информация передается одиночными фотонами, могут быть критически чувствительны к воздействию атмосферных разрядов [3]. В связи с этим представляется весьма актуальной задачей исследование влияния атмосферных разрядов на работу квантовых сетей, а также разработка научно-обоснованных методик, позволяющих оценить это влияние. С этой целью были созданы экспериментальные стенды, показанные на рисунке, на которых проводились исследования воздействия различных факторов атмосферных разрядов на характеристики классических и квантовых каналов связи в ВОЛС. В частности, была задействована уникальная научная установка по формированию искусственных молний (рис. (а)) [3], на базе которой проводились исследования воздействия сильных электрических и магнитных полей на изменения поляризации и потерь излучения в ВОЛС. После того как были зафиксированы сильные изменения поляризации лазерного излучения, распространяющегося в ВОЛС от искусственных молний, магнитное поле близкой амплитуды было смоделировано на лабораторной установке в МТУСИ, где через бухту оптического волокна длиной 1 км подключались два блока КРК [4]. В экспериментах на установке, показанной на рис. (б) контролировались основные параметры передачи квантового ключа между блоками НОК 1 и НОК2, аналогично [4]. На созданной установке были исследованы влияние магнитного поля на длину квантового ключа и QBER.

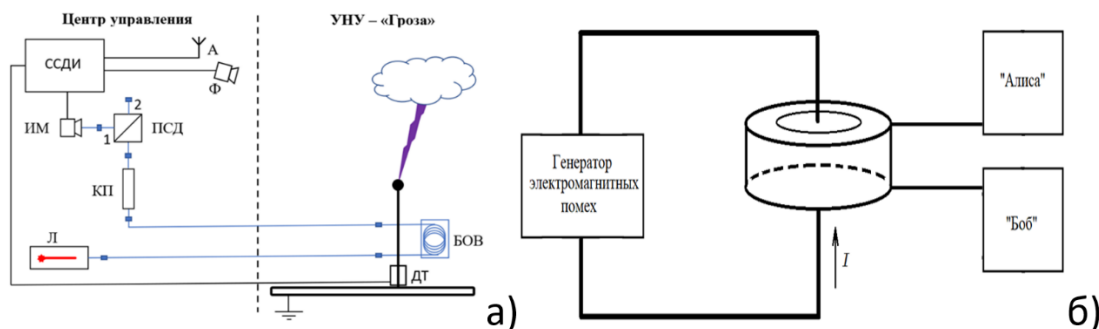


Рисунок. Схема экспериментальной установки: а) воздействие искусственных молний на ВОЛС; б) воздействие магнитных полей на блоки КРК

Установлено, что магнитные поля от синусоидальных импульсов тока частотой 50 Гц с амплитудой от 80 А до 140 А (рис. (б)), существенным образом изменяет поляризацию излучения, распространяющегося по бухте оптического волокна длиной 1 км, однако на работоспособность блоков КРК это воздействие не оказывает существенного деструктивного влияния.

[1] Martin V. et al., *EPJ Quantum Technology*, **8**, 19-50, (2021).

[2] Горбатов Д.В., Дорожкин А.Н., Игуменов А.Ю., Коньшев В.А., Лукиных Т.О., Наний О.Е., Убайдуллаев Р.Р., *Квантовая электроника*, **52**, №10, 923-928, (2022).

[3] Kazieva T.V., Belova O.S., Temnikov A.G., Bolotov D.V., Kolesnikov O.V., *2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, **6**, №1, 1-5, (2023).

[4] Болотов Д.В. и др. *Сборник научных трудов, XII международная конференция по фотонике и информационной оптике*, 514-515. – EDN DBXMPK.

**ТЕРМИНАЛ ЛАЗЕРНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ
СПУТНИКОВОЙ ГРУППИРОВКИ**

**Акбулатов Р.Р.¹, Воеводин Д.Д.¹, Гавриленко М.И.¹, Гусаков А.В.¹, Ройз И.М.¹,
Кузнецов С.Н.², Кернос М.Ю.², Лозов Р.К.¹, Огурцов Н.А.¹, Приходько К.И.²,
Румянцев А.А.¹, Соколова М.А.¹, Сунгатуллин Р.Р.¹, Широбакин С.Е.²**

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия

²АО «Мостком», г. Рязань, Россия

Рассмотрен низкоорбитальный терминал лазерной связи, предназначенный для передачи данных как на аналогичный низкоорбитальный терминал-корреспондент на расстояния до 4500 км, так и на отличный по характеристикам геостационарный на расстояния до 48000 км.

Ключевые слова: космическая лазерная связь, терминал лазерной связи, система наведения.

Работы по созданию систем высокоскоростной космической лазерной связи активно проводятся во всех развитых странах мира. Целью работ является создание глобальных низкоорбитальных и геостационарных спутниковых группировок, которые обеспечат высокоскоростную передачу данных между космическими аппаратами, что позволит доставлять необходимую потребителю информацию в режиме реального времени [1]. Актуальным направлением развития высокоскоростной космической лазерной связи является создание терминалов лазерной связи, имеющих малые массогабаритные характеристики, низкое энергопотребление и позволяющих передавать информацию как на низкоорбитальные терминалы-корреспонденты, так и на геостационарные.

В работе приведены описание и энергетический расчет низкоорбитального терминала лазерной связи, обладающего узкой диаграммой направленности и высокой пропускной способностью. Узкая диаграмма направленности позволяет обеспечить большую дальность связи: между терминалом и аналогичным ему по конструкции и энергетическим параметрам терминалом-корреспондентом с низкой орбиты на низкую орбиту (НО-НО) на расстояния до 4500 км и отличным по техническим характеристикам геостационарным терминалом-корреспондентом с низкой орбиты на геостационарную орбиту (НО-ГСО) на расстояния до 48000 км. Высокая пропускная способность низкоорбитального терминала лазерной связи позволяет достичь скорости передачи информации на расстояниях НО-НО не менее 3 Гбит/с, а НО-ГСО – не менее 512 Мб/с.

Во время сеанса связи между терминалами создается полнодуплексный информационный канал, по которому целевая информация передается одновременно в обоих направлениях. То есть, терминал лазерной связи работает одновременно в режимах передачи и приема, генерируя передаваемое и обрабатывая принимаемое излучение. Средний уровень битовых ошибок BER в таких системах во многом определяется точностью удержания оптических осей терминала и терминала-корреспондента, которая составляет порядка единиц микро радиан [1]. При этом ось передаваемого излучения информационного канала терминала должна быть направлена с упреждением к вектору движения терминала-корреспондента. Для обеспечения этих требований разработана оптическая система, которая включает в себя систему грубого наведения и систему точного наведения. Система грубого наведения обеспечивает требуемые углы обзора, управляет положением оптических осей излучений информационного канала и компенсирует их отклонения от заданного направления, вызванные низкочастотными космическими вибрациями, а также углами тангажа и крена космического аппарата [1]. В основу системы грубого наведения входят предназначенные для наведения на терминал корреспондент маяки [2] и визирная головка [3]. Система точного наведения компенсирует высокочастотные космические вибрации [1]. Её основой являются оптические дефлекторы [4]. Для работы обеих систем используется датчик оси диаграммы направленности [5].

В работе проведена оценка мощности и расходимости передаваемого излучения информационного канала и маяка. Обоснованы технические характеристики низкоорбитального терминала. Диаметр апертуры оптической системы равен 70 мм. Для межспутниковой связи НО-НО на дистанции до 4500 км со скоростью передачи информации 3 Гб/с мощность передаваемого излучения информационного канала – 1 Вт. Мощность излучения маяка на дистанции НО-НО – 1,5 Вт. Для межспутниковой связи НО-ГСО на дистанции до 48000 км со скоростью передачи информации не менее 512 Мб/с мощность передаваемого излучения информационного канала – 2 Вт. Мощность излучения маяка на дистанции НО-ГСО – 8 Вт. Расходимость передаваемого излучения информационного канала как для НО-НО, так и для НО-ГСО – 42 мкрад, а маяка – 2 мрад. Для передачи информации с уровнем битовых ошибок BER не более 10^{-6} , параметр Сигнал/Шум должен быть не менее 7.

[1] Majumdar A.K., Ricklin J.C., *Optic. and fiber commun. reports*, **2**, (2008).

[2] Hemmati H., *Near-earth laser communications*, **2**, (2021).

[3] Yangyang B., *IEEE 2nd Inter. Conf. on Automation, Electronics and Electrical Engineering*, (2019).

[4] Боев А.А., Кернос М.Ю., Кузнецов С.Н., *Лазер.-инф. технологии*, **1**, 80-82, (2021).

[5] Боев А.А., Кузнецов С.Н., Огнев Б.И., Приходько К.И., *Лазер.-инф. технологии*, **1**, 89-90, (2021).

УЯЗВИМОСТИ СИСТЕМ КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

**Наседкин Б.А.¹, Исмагилов А.О.¹, Чистяков В.В.¹, Гайдаш А.А.^{1,2},
Литвин А.П.¹, Цыпкин А.Н.¹, Козубов А.В.^{1,2}, Егоров В.И.¹**

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²ФГБУН Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва, Россия

В работе рассмотрен метод измерения спектров пропускания волоконно-оптических элементов используемых в системах квантовых коммуникаций в диапазоне 400–800 нм. Наличие окон пропускания в рассматриваемом диапазоне может сказаться на защищённости систем квантового распределения ключей.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, квантовый взлом, уязвимости.

Практические реализации систем квантового распределения ключей (КРК) уязвимы к действиям нарушителя, направленным на извлечение информации о распределяемых последовательностях. Актуальной задачей является поиск и устранение уязвимостей приводящих к появлению сторонних каналов, которые могут быть использованы нарушителем. Одной из причин появления сторонних каналов является не идеальность используемого оборудования. Среди таких не идеальностей стоит выделить зависимость пропускания волоконно-оптических элементов от длины волны, которые могут быть использованы для реализации известных атак. Так, было продемонстрировано, что возможна реализация атаки на фазовые и амплитудные модуляторы в системах КРК с использованием оптического излучения видимого диапазона длин волн [1, 2].

Для исследования наличия уязвимостей в диапазоне 400–800 нм волоконно-оптических элементов, используемых в системах КРК телекоммуникационного диапазона, была собрана экспериментальная установка. Широкополосное оптическое излучение фокусировалось в одномодовое оптическое волокно. Далее излучение направлялось на спектрометр, для случая регистрации опорных мощностей, относительно которых рассчитывалось пропускание. При измерении пропускания излучение, направлялось через исследуемый элемент. В результате пропускание в децибелах рассчитывалось как логарифм от отношения измеренного пропускания к опорной мощности, умноженный на десять. Для расширения динамического диапазона измерений на пути следования устанавливались нейтральные светофильтры, которые извлекались при необходимости регистрации мощности меньшего порядка.

В результате были получены спектры пропускания волоконно-оптических элементов в диапазоне 400–800 нм. На рисунке представлена зависимость пропускания фиксированных аттенуаторов, которые ослабляют излучение на 20 дБ на длине волны 1550 нм. Из полученных данных видно, что присутствуют окна пропускания в диапазоне 400–420 нм и 720–800 нм для которых пропускание выше заявленной характеристики. Максимальное пропускание для первого диапазона составило величину порядка -10дБ, для второго в зависимости от аттенуатора лежало в диапазоне – (3–1,5) дБ.

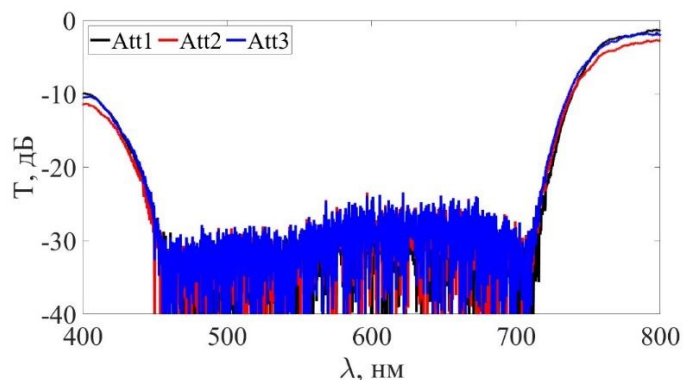


Рисунок. Измеренные спектры пропускания фиксированных аттенуаторов

Представленные результаты позволяют сделать вывод о необходимости более подробного исследования пропускания волоконно-оптических элементов в рассмотренном диапазоне длин волн перед их использованием в системах КРК.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт №2019-0903).

[1] Lu F. Y., Ye P., Wang Z. H., et. al., *Optica*, **10**(4), 520-527, (2023).

[2] Ye P., Chen W., Zhang G. W., Lu F. Y., et. al., *Phys. Rev. App.*, **19**(5), 054052, (2023).

**АБСОЛЮТНАЯ ГРАНИЦА УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ АТАКЕ
«TROJAN HORSE» НА СИСТЕМЫ КРК**

Суцев И.С.^{1,2}, Богданов С.А.¹, Булавкин Д.С.¹, Бугай К.Е.^{1,3},
Сидельникова А.С.^{1,2}, Дворецкий Д.А.^{1,3}

¹ООО «СФБ Лаб», Москва, Россия

²Центр Квантовых Технологий и физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Получены аналитические границы для информации, утекающей к нарушителю при атаке «Trojan Horse» на системы квантового распределения ключей при использовании смешанных зондирующих состояний общего вида.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, квантовая криптография, атаки на техническую реализацию.

Системы квантового распределения ключей (КРК) обеспечивают безопасность передачи данных, гарантированную фундаментальными законами физики. Однако реальные исполнения систем характеризуются техническими недостатками, приводящими к возникновению побочных каналов утечки информации, делая возможными, например, атаки «Trojan Horse».

Как правило, системы КРК содержат фазовый модулятор для кодирования состояния или выбора базиса. Атака «Trojan Horse» на такие системы нацелена на получение информации злоумышленником (Евой) о состоянии фазового модулятора посредством введения внутрь установки отправителя (Алисы) или приемника (Боба) мощного оптического излучения и измерения отраженного сигнала. Для обеспечения безопасности КРК в условиях атаки «Trojan Horse» для каждой системы необходимо оценивать уровень отраженного сигнала [1], так как его величина определяет степень различимости состояний, соответствующих разным битам, и, следовательно, вероятность успеха атаки.

Численно уровень отраженного сигнала выражается как среднее число фотонов в импульсах, возвращающихся к Еве μ_{Eve} . Количественные оценки утекающей информации ранее получались лишь для случая когерентных состояний, либо при менее жестких, но все же модельных допущениях на вид состояния излучения Евы [2]. В данной работе мы показываем, что существует верхняя граница для информации, доступной Еве при атаке «Trojan Horse» на системы КРК, использующие протокол BB84 с поляризационным или фазовым кодированием. Мы получили аналитическое выражение для этой границы. Данная граница определяется величиной фиделити между различными состояниями излучения Евы (вообще говоря, смешанными), которая, в свою очередь, выражается через вероятность вакуумной компоненты в ее излучении. Мы также показываем, что эту вероятность можно ограничить, используя лишь величину μ_{Eve} . Наконец, мы получили явное выражение для длины секретного ключа, используя величину Холево. Как выяснилось, величину Холево для обобщенной атаки можно ограничить функцией, зависящей от фиделити между состояниями разных побочных каналов и состояниями вспомогательной системы Евы по отдельности.

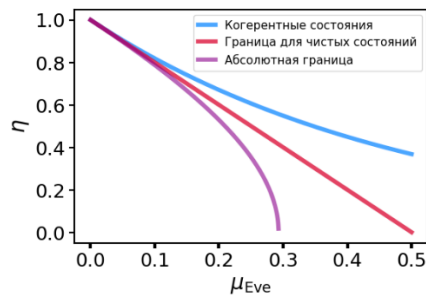


Рисунок. Зависимость квадратного корня из фиделити η между состояниями Евы от среднего числа фотонов в импульсе

На рисунке изображены полученные границы для случая чистых состояний и для общего случая смешанных состояний. Видно, что обе границы асимптотически совпадают с кривой для когерентных состояний при $\mu_{Eve} \rightarrow 0$, оставаясь при этом строго меньше по величине. Это подчеркивает тот факт, что полученные нами границы являются более пригодными для анализа безопасности.

Разработанный нами подход можно расширить в применении к любым побочным каналам утечки информации в системах КРК, и, таким образом, в комбинации с экспериментальными данными использовать его для полного анализа безопасности квантово-криптографических систем. Также предполагается, что подход можно распространить на случай использования метода «Decoy State».

[1] Sushchev I.S., Guzairova D.M., Klimov A.N., Dvoretzkiy D.A., Bogdanov S.A., Bondar K.D., Naumenko A.P., *Proceedings of SPIE*, **11868**, 57-63, (2021).

[2] Vinay S.E., Kok P., *Phys. Rev. A*, **97**, 4, 042335, (2018).

**ВЛИЯНИЕ ДВУХУРОВНЕВОГО АТОМА НА ДИНАМИКУ ПОЛЯ ВНУТРИ
ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА**

Попов Е.Н.¹, Трифанов А.И.²

¹Университет ИТМО, Лаборатория КПИ, Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, НОЦМ, Санкт-Петербург, Россия

В тексте приведен принцип построения квантовой теории электрооптического модулятора с двухуровневым атомом внутри. Частота атомного перехода совпадает с одной из частот линейчатого спектра электрооптического модулятора. Отслеживая состояние атома, можно управлять квантовой статистикой проходящего через модулятор света. Также в теории обсуждается характерное время взаимодействия атома и проходящего света, которое сложно формализуемо из-за непрерывной динамики атомно-полевой системы внутри модулятора.

Ключевые слова: электрооптический модулятор, модель Джейнса-Каммингса.

Электрооптический модулятор – это устройство, которое расщепляет монохроматический свет на серию эквидистантных частотных мод. Квантовая теория электрооптического модулятора подробно описана в работах [1, 2, 3]. Модуляторы широко применяются на практике, например, в качестве источника однофотонных кубитов [4]. Управление модулятором осуществляется с помощью внешнего радиочастотного поля, которое приводит к переходу фотона из одной квантованной моды внутри модулятора в другую квантованную моду.

Мы предлагаем разместить внутри полости модулятора двухуровневый атом, частота перехода которого совпадает с одной из частот спектра выходного света. Выбор частоты связан с тем, какую частотную моду планируется контролировать с помощью атома. Физическая природа контроля заключается в том, что атом может поглощать фотон из контролируемой моды и переизлучать его обратно в эту же моду. Пока атом находится в возбужденном состоянии, процесс модуляции света не останавливается. То есть атом на некоторое время выключает один фотон из процесса модуляции. Важно, что состояние атома может быть измерено в любой момент. Измерение приводит к разрушению волновой функции атомно-полевой системы, а результат измерения предлагается использовать как обратную связь для полевой динамики.

Математически взаимодействие атома с квантованной модой электромагнитного поля описывается с помощью модели Джейнса-Каммингса. Полный гамильтониан атомно-полевой системы состоит из гамильтониана невзаимодействующих эквидистантных мод и свободного атома, оператора взаимодействия полевых мод между собой и оператора взаимодействия контролируемой квантованной моды с атомом. Подобная модель содержит сложность инициализации времени взаимодействия атома и поля. Это связано с тем, что свет непрерывно проходит через модулятор. В то же время оператор эволюции, который показывает изменение состояния света после прохождения через модулятор, должен содержать конкретный временной промежуток. Мы рассматриваем время взаимодействия между атомом и полевой модой как время когерентности модулируемого света.

Результатом размещения атома внутри модулятора является появление эффективного оператора эволюции, который действует в пространстве полевых мод. Он показывает, как фотоны из центральной моды перераспределяются по боковым модам. Этот оператор отличается от известного оператора, который построен на основе квантовой теории электрооптического модулятора. Причём эффективный оператор эволюции может принимать два разных вида, в зависимости от того, в каком состоянии оказался атом. В этом состоит математическое обоснование предлагаемого метода контроля за процессом модуляции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Грант № 2019-0903).

[1] Capmany J., Fernandez-Pousa C., *Laser. Photonics Review*, **27**, A119-129, (2010).

[2] Capmany J., Fernandez-Pousa C., *Laser. Photonics Review*, **5**, 750-772, (2011).

[3] Miroshnichenko G., Kiselev A., Trifanov A., and Gleim A., *JOSA B*, **34**, 1177-1190, (2017).

[4] Bloch M., McLaughlin S., Merolla J.-M. and Patois Fr., *OSA*, **3**, 301-303, (2007).

**ЗАКОНЫ ДИСПЕРСИИ ПОЛЯРИТОННОГО ТИПА ДЛЯ
ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВЫХ АТОМОВ С НЕЭКВИДИСТАНТНЫМ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ ПРИ УЧЕТЕ
МНОГОФОТОННЫХ ПЕРЕХОДОВ**

Коровой О.В., Надькин Л.Ю., Марков Д.А.

ГОУ «ПГУ им. Т.Г. Шевченко», Тирасполь, Приднестровская Молдавская Республика

В приближении заданной плотности фотонов изучены поляритонные законы дисперсии для четырёхуровневых атомов, взаимодействующих с тремя резонансными импульсами когерентного лазерного излучения при учете разрешенных однофотонных, двухфотонных и трехфотонного переходов.

Ключевые слова: закон дисперсии, атомные поляритоны, многофотонные переходы.

Изучение явлений взаимодействия лазерного излучения с веществом в различных структурах ограниченной размерности позволяет развивать нелинейную спектроскопию как инструмент для исследования неравновесной квантовой динамики. При этом в большинстве теоретических и экспериментальных работ исследуются однофотонные индуцированные переходы между последовательными парами соседних уровней под действием света, как это представлено в теории каскадных лазеров [1, 2]. Вместе с тем, в атомных четырёхуровневых системах возможны многофотонные переходы: двухфотонные переходы – между 1 и 3 уровнями, 2 и 4 уровнями, трехфотонный переход между 1 и 4 уровнями. Исследование особенностей протекания когерентных нелинейных оптических явлений при одновременном учете однофотонных и многофотонных процессов вызывает интерес как с теоретической, так и с прикладной точки зрения из-за реализации возможности контроля и управления процессами поглощения и взаимодействия света с материальными возбуждениями среды и, вследствие этого, является актуальной задачей.

Нами представлены результаты исследований закона дисперсии четырёхуровневых атомов, взаимодействующих с тремя импульсами резонансного лазерного излучения. При этом учитываются однофотонные переходы между уровнями $1 \leftrightarrow 2$, $2 \leftrightarrow 3$ и $3 \leftrightarrow 4$, двухфотонные переходы между уровнями $1 \leftrightarrow 3$, $2 \leftrightarrow 4$, а также прямой трехфотонный переход между уровнями $1 \leftrightarrow 4$. В приближении заданной плотности фотонов получено дисперсионное уравнение системы в окрестности частоты ω_0 второго уровня атома, которое имеет вид:

$$\Delta(\Delta - \delta_1)(\Delta + \delta_2)(\Delta + \delta_2 + \delta_3) - (\Delta + \delta_2)(\Delta + \delta_2 + \delta_3) - \omega_{23}^2(\Delta - \delta_1)(\Delta + \delta_2 + \delta_3) - \omega_{34}^2\Delta(\Delta - \delta_1) - \omega_{13}^2\Delta(\Delta + \delta_2 + \delta_3) - \omega_{24}^2(\Delta - \delta_1)(\Delta + \delta_2) - \omega_{14}^2\Delta(\Delta + \delta_2) + \omega_{34}^2 + \omega_{23}^2\omega_{14}^2 + \omega_{13}^2\omega_{24}^2 + 2\omega_{13}\omega_{34}\omega_{14}\Delta\cos\vartheta_4 + 2\omega_{23}\omega_{13}(\Delta + \delta_2 + \delta_3)\cos\vartheta_2 + 2\omega_{14}\omega_{24}(\Delta + \delta_2)\cos\vartheta_1 + 2\omega_{23}\omega_{34}\omega_{24}(\Delta - \delta_1)\cos\vartheta_3 - 2\omega_{23}\omega_{34}\omega_{14}\cos(\vartheta_2 + \vartheta_4) - 2\omega_{13}\omega_{24}\omega_{34}\cos(\vartheta_1 - \vartheta_4) - 2\omega_{23}\omega_{14}\omega_{13}\omega_{24}\cos(\vartheta_1 - \vartheta_2) = 0, \quad (1)$$

где Δ , δ_1 , δ_2 , δ_3 расстройки резонансов, нормированные на частоту Раби Ω_{12} : $(\omega - \omega_0) = \Omega_{12}\Delta$, $(\omega_1 - \omega_0) = \Omega_{12}\delta_1$, $(\omega_2 - \omega_{03} + \omega_0) = \Omega_{12}\delta_2$, $(\omega_3 + \omega_{03} - \omega_{04}) = \Omega_{12}\delta_3$; $\omega_{23} = \Omega_{23}/\Omega_{12}$, $\omega_{34} = \Omega_{34}/\Omega_{12}$, $\omega_{13} = \Omega_{13}/\Omega_{12}$, $\omega_{24} = \Omega_{24}/\Omega_{12}$, $\omega_{14} = \Omega_{14}/\Omega_{12}$ нормированные частоты Раби; $\vartheta_i (i = 1 \div 4)$ разности фаз между константами взаимодействия. Закон дисперсии $\Delta(\delta_1)$ при $\delta_2 = \delta_3 = 0$ и без учета многофотонных переходов $\omega_{14} = \omega_{24} = \omega_{13} = 0$ представляет собой структуру, состоящую из четырех восходящих с ростом δ_1 ветвей, положение и форма которых определяется параметрами системы. При учете процессов двухфотонного возбуждения атома в условиях точного резонанса второго и третьего импульсов $\delta_2 = \delta_3 = 0$ возникают эффекты пересечения верхней и средней ветвей в коротковолновой области спектра при $\vartheta_i = 0$. При $\vartheta_i = \pi/2$ возникает эффект пересечения средних ветвей закона дисперсии в точке $\delta_1 = 0$ при $\omega_{13} = \omega_{24} = 1$, т.е. при условии равенства частот Раби Ω_{12} , Ω_{13} и Ω_{24} . При этом показано, что учет трехфотонного процесса возбуждения атома при отсутствии двухфотонных процессов $\omega_{13} = \omega_{24} = 0$ приводит к возникновению эффекта пересечения верхней и средней ветвей в точке $\Delta = \sqrt{2}$ и нижней и средней поляритонных ветвей закона дисперсии в точке $\Delta = -\sqrt{2}$ при $\vartheta_i = \pi/2$. При одновременном учете двухфотонных и трехфотонных процессов $\omega_{13} = \omega_{24} = \omega_{14} = 1$ и значениях разностей фаз $\vartheta_i = 0$ наблюдается вырождение средних ветвей в одну и пересечение с верхней поляритонной ветвью в коротковолновой области, при условии равенства частот Раби Ω_{12} , Ω_{13} , Ω_{24} и Ω_{14} , которой можно добиться, изменяя плотности фотонов падающих импульсов [3]. Сближение и удаление поляритонных ветвей при изменении плотностей фотонов падающих импульсов соответствует изменению поляритонных частот Раби и возникновению эффекта индуцированной мощным полем первого импульса оптической связи (каплинга) атома с излучением. Представленные результаты свидетельствуют о том, что нормированные частоты Раби двухфотонных ω_{13} , ω_{24} и трехфотонного ω_{14} переходов являются важными параметрами, определяющими особенности поведения ветвей закона дисперсии атомных поляритонов.

- [1] Deng H., Haug H., Yamamoto Y., *Rev. Mod. Phys.*, **82**, 1489-1537, (2010).
 [2] Carusotto I., Ciuti C., *Rev. Mod. Phys.*, **85**, 299-366, (2013).
 [3] Коровой О., *ЖЭТФ*, **160**, вып. 3 (9), 253-271, (2021).

УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТАМИ ФОТОНОВ, ИЗЛУЧАЕМЫХ ОДИНОЧНОЙ
КВАНТОВОЙ ТОЧКОЙ В ОДНОМЕРНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

Гарифуллин А.И.^{1,2}, Гайнутдинов Р.Х.^{1,3}, Хамадеев М.А.^{1,3}

¹Институт физики, Казанский федеральный университет, Казань, Россия

²Казанский квантовый центр, Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева - КАИ, Казань, Россия

³Институт прикладных исследований, Академия наук Республики Татарстан, Казань, Россия

В данной работе на основе квантово-электродинамического эффекта изменения электромагнитной массы электрона показана возможность управления частотами фотонов, излучаемых одиночной квантовой точкой в одномерном фотонном кристалле.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, квантовые точки, квантовая электродинамика.

Фотонные структуры на основе квантовых точек (КТ) являются перспективной системой для создания однофотонных источников и детекторов [1], устройств нанофотоники и наноплазмоники, фотовольтаики и пр. [2]. Данные приложения основаны на уникальных оптических свойствах КТ, таких как высокая фотостабильность, широкий спектр поглощения и узкая линия излучения, высокий квантовый выход и перестраиваемая длина волны люминесценции [3].

В последнее десятилетие большое внимание привлекают КТ, помещенные в среду фотонного кристалла (ФК) [4]. ФК, состоящие из периодического массива оптических резонаторов, значительным образом модифицируют плотность фотонных состояний. Эта модификация приводит к усиленному взаимодействию квантовых излучателей с электромагнитным полем. Данные системы перспективны для создания фотонных кубитов и микролазеров [5], однофотонных источников с управляемой частотой фотонов [6], для наблюдения и исследования фундаментальных квантово-электродинамических (КЭД) эффектов. Преимуществом системы КТ в ФК является достаточно малый модовый объем и возможность интеграции с оптическими волноводами и электроникой на чипе [4].

В работе [7] было показано, что модификация электромагнитного поля в фотонно-кристаллической структуре приводит к существенному изменению взаимодействия атомарного электрона, помещенного в вакуумную полость, с собственным полем излучения. В связи с этим, возникает поправка к собственной энергии заряженной частицы, приводящая к сдвигам уровней энергии атома и значительному изменению его энергии ионизации [8]. Будучи анизотропной по отношению к направлению импульса электрона, данная поправка зависит от состояния заряженной частицы и на несколько порядков больше лэмбовского сдвига в вакууме [8, 9].

В данной работе показана возможность управления спектром излучения одиночной КТ InAs, помещенной на поверхность одномерного ФК. ФК состоит из периодического массива вакуумных полостей в GaAs. Мы рассмотрели три механизма управления спектром излучения одиночной КТ в ФК: модификация электромагнитной массы электрона в среде ФК [7], инжекция свободных носителей заряда и квадратичный электрооптический эффект Керра [10]. Настройка показателя преломления слоев GaAs осуществлялась последними двумя механизмами.

Исследование выполнено за счет субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности (Проект: Вакансии 20-124, 021110124) и за счет средств программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Казанского федерального университета при Правительстве Российской Федерации.

- [1] Krasheninnikov A.V., Openov L.A., *JETP Lett.*, **64**, 231-236, (1996).
- [2] Hosokawa H., Tamaki R., Sawada T., et al., *Nat. Commun.*, **10**, 1-8, (2019).
- [3] Eremchev I.Y., Eremchev M.Y., Naumov A.V., *Phys.-Uspekhi*, **62**, 294-303, (2018).
- [4] Faraon A., Majumdar A., Englund D., et al., *New J. Phys.*, **13**, 055025(1-13), (2011).
- [5] Yu Y., Xue W., Semenova E., et al., *Nat. Photonics*, **11**, 81-84, (2017).
- [6] Chuprina I.N., Kalachev A.A., *Phys. Rev. A*, **100**, 043843(1-7), (2019).
- [7] Gainutdinov R.Kh., Khamadeev M.A., Salakhov M.Kh., *Phys. Rev. A*, **85**, 053836(1-7), (2012).
- [8] Gainutdinov R.Kh., Garifullin A.I., Khamadeev M.A., Salakhov M.Kh., *Phys. Lett. A*, **404**, 127407 (1-7), (2021).
- [9] Gainutdinov R.Kh., Garifullin A.I., Khamadeev M.A., *B. Lebedev Phys. Inst+*, **46**, 115-117, (2019).
- [10] Mondia J.P., Tan H.W., Linden S., et al., *JOSA B*, **22**, 2480-2486, (2005).

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В
ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ

Кузнецов К.А., Фролов А.Д., Коновалов А.М., Ковалева П.М., Китаева Г.Х.

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

Исследована сверхбыстрая релаксация носителей заряда в топологически-защищенных состояниях с дираковским спектром, приводящая к эффективной генерации третьей и пятой терагерцовых гармоник в топологических изоляторах $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Se}_{3-y}\text{Te}_y$.

Ключевые слова: топологический изолятор, высшие терагерцовые гармоники.

Топологические изоляторы (ТИ) - чрезвычайно перспективные материалы для терагерцовой фотоники [1]. Свойства безмассовых электронов в поверхностных состояниях благодаря их топологической защите от обратного рассеяния приводят к огромным значениям подвижности [2]. Высокие нелинейные свойства в видимом [3] и терагерцовом [4] диапазонах частот делают ТИ одними из лучших нелинейных материалов для генерации высших терагерцовых гармоник. В работе исследованы образцы ТИ с халькоген-упорядоченной структурой тетрадимита с различной проводимостью (рисунок); у исследуемых образцов энергия Ферми находится: в валентной зоне (Sb_2Te_3 , Bi_2Te_2), в объемной запрещенной зоне ($\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Se}_{3-y}\text{Te}_y$) и в зоне проводимости (Bi_2Se_3).

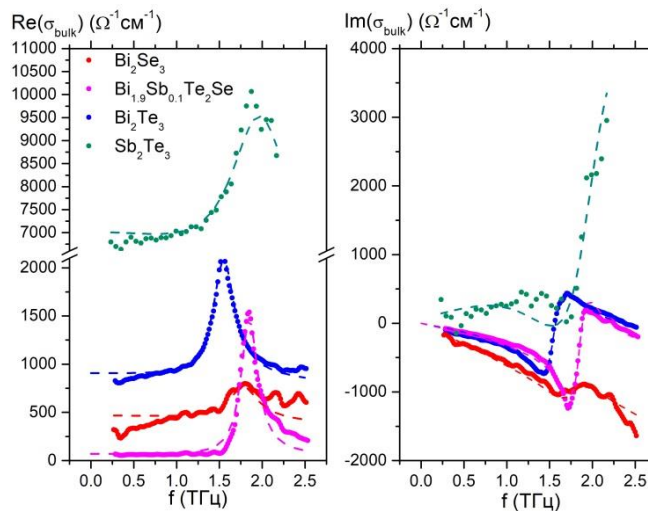


Рисунок. Дисперсия проводимости исследуемых образцов топологических изоляторов

Получены различия во временной динамике оптического отклика при исследовании образцов ТИ методом «терагерцовая накачка-оптическое зондирование», что позволило отличить поверхностный вклад на фоне объемного. Измерена генерация третьей и пятой гармоник накачки терагерцовой частоты в образцах ТИ. Никаких признаков насыщения или наличия порога не наблюдалось до управляющих полей напряженностью 140 кВ/см, что указывает на режим генерации высших ТГц гармоник в топологических изоляторах без насыщения. Сверхбыстрая релаксация поверхностных состояний (несколько сотен фемтосекунд) приводит к отсутствию эффектов накопления в течение большой длительности терагерцового импульса возбуждения, что приводит к явному режиму без насыщения, в отличие от графена с сильным насыщением генерации гармоник излучения терагерцового диапазона и с длительностью релаксации несколько пикосекунд. Проведенный анализ экспериментальных результатов указывает на возможность получения более высокой эффективности преобразования в третью гармонику в ТИ, чем в графене [5]. Наибольшей эффективностью преобразования с учетом поглощения обладает образец Sb_2Te_3 с наименьшей энергией Ферми, что согласуется с теорией. Полученные результаты открывают многообещающие возможности для повышения эффективности нелинейного преобразования излучения терагерцового диапазона, а также для различных широкополосных оптоэлектронных, спинтронных приложений для передачи информации и коммуникации.

Авторы выражают огромную благодарность С.П. Ковалеву и И.Е. Ильякову за помощь в измерениях «накачка-зондирование» и генерации третьей и пятой гармоник, а также за плодотворные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-00758).

- [1] Zhang X., Wang J., Zhang S.-C., *Phys.Rev.B*, **82**, 245107, (2010).
- [2] Kozlov A. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 196801, (2014).
- [3] Yinxiao X. et al., *Nano Lett.*, **21**, 8872, (2021).
- [4] Kovalev S. et al, *NPJ Quantum Materials*, **6**, 84, (2021).
- [5] Kuznetsov K.A. et al, *Nanomaterials*, **12**, 3779, (2022).

ОБ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДАХ В
РАВНОВЕСНОЙ КВАНТОВОЙ СИСТЕМЕ

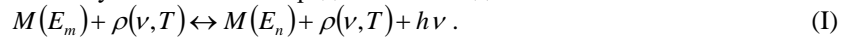
Невдах В.В.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Показано, что в равновесной системе, состоящей из молекул с дискретными уровнями энергии и теплового излучения, могут происходить только вынужденные излучательные переходы, обусловленные взаимодействием молекул между собой и с тепловым излучением и протекающие со своими скоростями.

Ключевые слова: излучательный переход, константа скорости перехода, тепловое излучение.

Рассмотрены излучательные переходы в равновесной квантовой системе, состоящей из молекул с дискретными уровнями энергии и теплового излучения. Система рассматривается как трехкомпонентная, состоящая из взаимодействующих между собой молекул на рассматриваемом энергетическом уровне, например, $M(E_m)$ или $M(E_n)$, остальных молекул M и теплового излучения с плотностью энергии $\rho(\nu, T)$ (в единичном интервале частот), где E_m и E_n – энергии уровней, T – температура молекул, ν – частота излучения, определяемая из условия $h\nu = E_m - E_n$, h – постоянная Планка. Для любой молекулы, совершающей хаотическое тепловое движение, следует различать возможность её взаимодействия с остальными молекулами M или с тепловым излучением, и результаты этого взаимодействия. Выбор молекулой партнеров для взаимодействия носит случайный характер и, следовательно, может характеризоваться вероятностью, тогда как результаты таких взаимодействий – это результаты конкретных детерминированных физических процессов, протекающих со своими скоростями. Физические процессы взаимодействия, происходящие в рассматриваемой системе и сопровождающиеся излучательными переходами, можно представить аналогично представлению химических реакций. Взаимодействие молекул с тепловым излучением можно представить в виде:



Излучение, появляющееся в результате прямого процесса в (I), является вынужденным излучением, резонансным вынуждающему тепловому излучению и воспроизводящим все его свойства. Такое излучение ансамбля молекул является когерентным. $R_{mn}\rho(\nu, T)N_m$ – скорость прямого процесса в (I), а $R_{nm}\rho(\nu, T)N_n$ – скорость обратного процесса, где R_{mn} и R_{nm} – константы скоростей процессов, N_m и N_n – плотности молекул с энергией E_m и E_n , соответственно. Взаимодействие молекул между собой при их хаотическом тепловом движении может стимулировать и излучательные переходы, при которых внутренняя энергия молекулы будет преобразовываться в энергию излучения. Эти процессы можно представить в виде:



Излучение, появляющееся в результате прямого процесса в (II), также является вынужденным излучением. Но такое излучение ансамбля молекул является некогерентным, так как взаимодействия разных молекул носят случайный характер. $K_{mn}N_m n$ – скорость прямого процесса в (II), а $R_{nm}\rho(\nu, T)N_n n$ – скорость обратного процесса, где K_{mn} и R_{nm} – константы скоростей этих процессов, соответственно, n – плотность молекул M . В соответствии с принципом детального равновесия состояние термодинамического равновесия в системе реализуется только тогда, когда его поддерживает каждая из возможных реакций в этой системе [1]. Следовательно, для реакций (I) и (II) должны выполняться условия:

$$\frac{R_{mn}}{R_{nm}} = \exp(h\nu/kT), \quad (1)$$

$$\frac{K_{mn}}{R_{nm}\rho(\nu, T)} = \exp(h\nu/kT). \quad (2)$$

Из (1) и (2) видно, что константы скоростей излучательных переходов R_{mn} , R_{nm} и K_{mn} и их отношения зависят от температуры, а также, что при любой температуре излучательные переходы, обусловленные взаимодействием молекул между собой и взаимодействием молекул с резонансным излучением, дают одинаковый вклад в равновесное тепловое излучение. Из (1) видно, что при условии $kT \gg h\nu$

$$R_{mn} \approx R_{nm}. \quad (3)$$

[1] Зельдович Я.Б. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович [и др.]. - М.: Наука, 478 с. (1980).

**МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ
КРАЕВЫХ ВОЛН В НЕЛИНЕЙНЫХ ФОТОННЫХ РЕШЁТКАХ**

Смолина Е.О.^{1,2}, Смирнов Л.А.^{1,2}, Смирнова Д.А.^{1,2}

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

²Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

Численно и аналитически проанализирована модуляционная неустойчивость нелинейной краевой волны, распространяющейся вдоль топологической доменной стенки в фотонной решётке, к малоамплитудным длинноволновым возмущениям: в частности, получена область параметров, отвечающая устойчивому решению.

Ключевые слова: нелинейные эффекты, фотонные решётки, топологическая защищённость.

Для дальнейшего развития телекоммуникационных и вычислительных технологий важно преодолеть различные ограничения, среди которых выделяют эффект рассеяния сигнала на дефектах волноведущей структуры. Один из способов решить данную проблему заключается в использовании фотонных топологических изоляторов, представляющих собой периодические структуры, границы раздела в которых могут поддерживать локализованные спин-поляризованные электромагнитные моды, топологически защищённые от рассеяния на дефектах [1]. При исследовании свойств данных материалов необходимо учитывать нелинейность, присущую физическим платформам, используемым в топологической фотонике. Поэтому важны задачи анализа нелинейных особенностей таких систем; мы остановились на рассмотрении эффектов самовоздействия [2] и развитии модуляционной неустойчивости [3-5].

В данной работе [5] мы изучили модуляционную неустойчивость нелинейных краевых мод к длинноволновым низкоамплитудным возмущениям в топологических решетках геометрии «пчелиные соты» с димеризацией. Этот эффект можно наблюдать в массиве одномодовых диэлектрических волноводов, ориентированных вдоль оси z , и представляющим собой гексагональную решетку в плоскости, перпендикулярной z . Такая система может быть изготовлена с помощью лазерной записи в кварцевом стекле. Для начала мы провели аналитический анализ в континуальном пределе, для описания волнового транспорта применялись нелинейные уравнения Дирака. Система уравнений записывается для двухкомпонентной функции, что соответствует наличию двух треугольных подрешеток в геометрии «пчелиные соты». Мы ввели доменную стенку, расположенную вдоль линии $y=0$, что отвечает инверсии знака эффективной массы M (диагонального члена Гамильтониана) на этом интерфейсе. Затем с помощью асимптотических методов для малой нелинейности и дисперсии было получено уравнение, описывающее эволюцию вдоль координаты x комплексной огибающей волнового пакета [2]. Оно отличается от традиционного нелинейного уравнения Шрёдингера членом, соответствующим нелинейной групповой скорости. Стационарное решение этого уравнения описывает нелинейную краевую волну. Мы реализовали стандартный метод исследования данного решения на неустойчивость: построили спектр возмущений малой амплитуды в линеаризованной задаче. Полученное аналитическое выражение для инкремента неустойчивости предсказывает эффект стабилизации при достаточно большой величине нелинейного вклада (что можно достичь путем увеличения амплитуды краевой моды), – особенность, ранее не отмеченная в подобных моделях, анализ которых ограничивался традиционным нелинейным уравнением Шрёдингера без каких-либо модификаций. Данный аналитический результат был верифицирован при непосредственном моделировании спектра линейных возмущений в полной системе нелинейных Дираковских уравнений, а также в дискретной решётке, описываемой с помощью Гамильтониана, записанного в пределе сильной связи только с ближайшими элементами (для нашей конфигурации это означает взаимодействие каждого элемента с тремя соседними).

Результаты моделирования распространения длинноволновых возмущений к краевой волне вдоль доменной стенки с помощью непосредственного численного решения параксиального уравнения, описывающего распространение света в реалистичной фотонной решетке, показало отличное согласие с аналитическими выкладками.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (0729-2021-013). Работа Смолиной Е.О. была поддержана грантом 22-1-5-80-1 Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

[1] Ozawa T., et al, *Reviews of Modern Physics*, **91**, 015006, (2019).

[2] Smirnova D.A., Smirnov L.A., Smolina E., Angelakis Dimitris G., and Leykam D, *Physical Review Research*, **3**, 043027, (2021).

[3] Leykam D., Smolina E., Maluckov A., Flach S., and Smirnova D.A., *Physical Review Letters*, **126**, 073901, (2021).

[4] Maluckov A., Smolina E., Leykam D., Gundogdu S., Angelakis D.G., and Smirnova D.A., *Physical Review B*, **105**, 115133, (2022).

[5] Smolina E.O., Smirnov L.A., Leykam D., and Smirnova D.A., препринт arXiv:2305.06544.

**ДИССИПАТИВНАЯ ДИНАМИКА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО
СОСТОЯНИЯ МНОГОМОДОВОГО СВЕТА ПРИ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ**

Матвеева М.В., Табиева А.В., Тушавин Г.В., Трифанов А.И.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В настоящей работе мы исследуем модель квантовой динамики поляризационного состояния модулируемого по фазе излучения с учетом возможности спонтанного изменения поляризации фотона в процессе перехода из одной спектральной компоненты в другую

Ключевые слова: фазовый модулятор, поляризация, оператор Стокса.

Квантовые системы, построенные на принципах частотного кодирования, представляются перспективным путем реализации квантовых технологий. Это связано прежде всего с тем, что современные оптические коммуникационные системы уже построены на таких принципах и допускают свое применение для работы с сигналами, в которых информация закодирована в квантовых состояниях электромагнитного поля.

Мотивацию к квантованию классических коммуникационных устройств дает возможность эффективного их использования в протоколах частотного кодирования, когда информация передается в квантовых состояниях частотных мод. Устройства типа фазового модулятора позволяют создавать и обрабатывать коллективные квантовые состояния, что делает процесс передачи и обработки информации более эффективным и экономичным.

Прямое использование классических моделей устройств для описания фазовой модуляции квантового сигнала на основе электрооптического эффекта выявило ряд принципиальных проблем, связанных с эволюцией сигнала в модуляторе. Для их решения потребовалось построить квантовую теорию электрооптического эффекта, в основе которой была положена модель квантового многомодового параметрического процесса [1, 2]. Подход, основанный на применении эффективного гамильтониана, управляющего процессом фазовой модуляции, в котором допускалась возможность взаимодействия произвольного, но конечного числа мод, показывает адекватность построенной модели и согласовывается в классическом пределе с классической моделью процесса фазовой модуляции.

Переход к моделированию фазовой модуляции квантовых сигналов открывает перспективы также для изучения поляризационных состояний их частотных компонент [3]. В частности, компоненты поляризационного оператора Стокса могут демонстрировать нетривиальное поведение при взаимодействии частотных мод. Разность групповых скоростей, связанная с анизотропией кристалла, приводит к разнице групповых скоростей различных поляризационных компонент, что приводит к изменению статистических свойств наблюдаемых, описывающих поляризацию частотных мод. В частности, эволюция средних значений и высших моментов компонент операторов Стокса приводит к интересной динамике как степени поляризации сигнала, так и поляризационных моментов высших порядков.

Корректная модель, описывающая эволюцию любой динамической системы, должна содержать механизмы учета неидеальности взаимодействия, связанные с различными факторами окружения. Так, для процесса фазовой модуляции необходимо учитывать спонтанное искажение характеристик сигнала, связанных с неидеальностью геометрических характеристик кристалла, а также других факторов, оказывающих существенное влияние на процесс фазовой модуляции. Время взаимодействия сигнала с модулятором определяется степенью его когерентности и может изменяться в весьма широких пределах. В технологически значимых случаях это время не превышает 10^{-8} сек. При таких условиях искажение сигнала, связанное с неучтенным взаимодействием частотных мод друг с другом, маловероятно. Однако процесс спонтанного изменения поляризации фотонов в модах может привести к существенному изменению статистики даже в случае одиночных переходов.

В настоящей работе мы формулируем и исследуем модель спонтанного изменения поляризации частотных компонент оптического сигнала в процессе фазовой модуляции. В форме Линдблада получено уравнение для поляризационных компонент матрицы плотности. Получены аналитические оценки и численные результаты, описывающие эволюцию моментов операторов Стокса компонент матрицы плотности.

Проект поддержан Министерством образования и науки Российской Федерации (2019-0903).

[1] Miroshnichenko G.P., et al., *JOSA B*, **34**, №7, 061177-14, (2017).

[2] Tushavin G.V. et al., *Nano: PCM*, **13**, №3, 299-307, (2022).

[3] Trifanov A.I. et al., *Proc. DD'17*, 315-318, (2017).

АРТФОТОНИКА

КОМБИНИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ОЧИСТКИ СЛОЖНЫХ
МНОГОСЛОЙНЫХ ОБЪЕКТОВ ЖИВОПИСИ

Васильева А.В.¹, Карева А.К.², Кафарова О.Б.², Старостина И.В.², Парфенов В.А.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

²СПГХПА им. А.Л. Штигица, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассматривается прикладное значение комбинированного метода очистки объектов живописи, включающего лазерную, механическую и химическую очистку, для решения сложных задач реставрации многослойных окрашенных предметов искусства.

Ключевые слова: лазерная очистка, многослойная живопись, комбинированная методика очистки.

Метод лазерной очистки в области сохранения культурного наследия исследовался еще с конца прошлого столетия [1]. Известны примеры лазерной очистки каменных поверхностей памятников от различных загрязнений [2, 3], металлических артефактов [3], а также гипсовых объектов, покрытых черными корками [4]. Однако многообразие объектов культурного наследия, их сложность и уникальность не позволяет создать универсальную методику лазерной очистки артефактов.

Отдельно рассматривается вопрос необходимости применения лазерной очистки в реставрации объектов живописи [5], включающей не только поверхностные загрязнения, но и, в отдельных случаях, нежелательные красочные слои, которые также необходимо удалить, чтобы восстановить авторский замысел, или снять слои старой растрескавшейся краски для обновления внешнего облика объекта живописи.

Основная проблема универсального применения лазерной очистки для реставрации живописи – неоднородное распределение красочных слоев по поверхности объекта, а также разнообразие красочных пигментов, которые по-разному взаимодействуют с лазерным излучением. Поэтому часто реставраторы избегают использования лазера для очистки таких объектов и применяют традиционные методики очистки с использованием химических растворителей. Но известны случаи, когда традиционный метод очистки не способствует эффективному удалению поверхностных красочных слоев. Так, например, авторы данного исследования имели опыт работы с окрашенным гипсовым барельефом XVIII века, на поверхности которого были поздние закраски белого цвета, слабо поддающиеся химическому воздействию растворителей [6, 7]. Было предложено использовать комбинированный метод очистки с использованием лазерного излучения с длиной волны 1064 нм и химического растворителя. Разработанная методика позволила решить сложную задачу очистки многослойного объекта, которую традиционный метод не решал в полной мере.

В продолжение исследований в данном направлении в настоящей работе рассматриваются основные принципы комбинированной методики очистки сложных окрашенных объектов, а также исследуются границы применимости такого метода на примере реставрационных расчисток деревянных окрашенных объектов декоративно - прикладного искусства (конец XVIII – начало XIX века).

[1] Cooper M., *Butterworth-Heinemann, UK*, (1998).

[2] Siano S., Giamello M., Bartoli L., Mencaglia A., Parfenov V., Salimbeni R., *Laser Physics.*, **18**, I.1, 1 – 10, (2008).

[3] Siano S., Agresti J., Cacciari I., Ciofini D., Mascacchi M., Osticioli I., Mencaglia A.A., *Applied Physics A*, **106**, 419 – 446, (2012).

[4] Grammatikakis G., Demadis K.D., Melessanaki K., Pouli P., *Studies in Conservation*, **60**, I.1, S3 – S11, (2015).

[5] Sgamellotti A., Brunetti B.G., Miliani C., *The Royal Society of Chemistry publ., UK*, (2014).

[6] Карева А.К., Васильева А.В., Жанкашева Г., Данилович Д.П., Парфенов В.А., *Научные труды Санкт-Петербургской академии художеств.*, **62**, 162 – 178, (2022).

[7] Vasilieva A., Kareva A., Zhankasheva G., Danilovich D., Parfenov V., *Heritage*, **6**, №2, 1891 – 1902, (2023).

**ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНЕВЕКОВЫХ СЕРЕБРЯНЫХ МОНЕТ МЕТОДОМ
ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Леонидова А.А.¹, Прокуратов Д.С.^{1,2}, Асеев В.А.¹, Горлов К.В.³

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Государственный Эрмитаж, Санкт-Петербург, Россия

³Институт истории материальной культуры РАН, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты исследования химического состава двух серебряных артигов методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС). Методом ЛИЭС выполнено профилирование по глубине и показано, что состав поверхности отличается от состава глубинных слоев.

Ключевые слова: лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ, средневековые артиги.

Более тридцати лет метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС) применяется для качественной характеристики элементного состава различных материалов. Однако только в последние несколько лет данный метод начал широко применяться для исследования произведений искусства и исторических объектов, что побудило исследовательское сообщество усовершенствовать технологию. Одним из главных преимуществ ЛИЭС является возможность исследовать не только поверхность, но и предповерхностные слои объекта при минимальном вмешательстве. Данная способность незаменима для анализа исторических памятников, материал которых не должен быть подвергнут какому-либо повреждению, а также для объектов, поверхность которых претерпела воздействие различных физико-химических факторов [1].

Многочисленную категорию подобных объектов представляют собой металлические изделия, долгое время хранившиеся в неблагоприятных условиях. В результате взаимодействия с окружающей средой поверхность таких объектов часто покрыта коррозией, которая, как правило, является смесью оксидов металлов, входящих в состав объекта. Анализ химического состава таких объектов затруднен, поскольку большинство методов (рентгенофлуоресцентный анализ, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, атомно-эмиссионная спектроскопия) позволяют исследовать состав поверхностного слоя, поэтому их результаты часто оказываются недостоверными. Данная проблема может быть решена с помощью метода ЛИЭС, поскольку с помощью многократного воздействия лазерного излучения можно исследовать химический состав материала после каждого импульса, т. е. послойно [2].

Основной недостаток работы с лазерно-искровой эмиссионной спектроскопией заключается в необходимости наличия эталонов, сверяясь с которыми можно производить количественный анализ неизвестного материала. В рамках данного исследования были изготовлены эталонные сплавы с серебром, медью, золотом и свинцом в диапазонах концентраций, наиболее характерных для серебряных монет позднесредневековой Европы [3]. На основе данных, полученных с данных эталонов методом ЛИЭС, были построены калибровочные зависимости для определения процентного содержания вышеперечисленных химических элементов в исследуемых монетах.

Данные количественного анализа монет методом ЛИЭС показали, что химический состав их поверхности отличается от глубинного состава. Для подтверждения результатов был изготовлен микрошлиф одной из монет и проанализирован методом РФЛА. Показано, что при постепенном испарении образца под действием лазерных импульсов возможно построение концентрационных профилей приповерхностного слоя. Таким образом, возможность выполнять профилирование по глубине образца позволяет исследовать изменение состава исторических образцов и выявлять исходный химический состав объектов, подвергшихся коррозионным повреждениям.

[1] Vincent D., Xueshi B., *Atom. Spectr.*, **191**, 1021-1042, (2022).

[2] Botto A., Campanella B., Legnaioli S., Lezznerini M., Lorenzetti G., Pagnotta S., Poggialini F., Palleschi V., *J. of Anal. Atom. Spectr.*, **34**(1), 81-103, (2019).

[3] Сапрыкина И.А., *Сиб. истор. иссл.*, **2**, 148-169, (2020).

**ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД СОЗДАНИЯ ПОЛНОЦВЕТНЫХ РИСУНКОВ НА
ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ: ОТ ЦВЕТНОЙ МАРКИРОВКИ ДО
“РУКОТВОРНОЙ” ЖИВОПИСИ**

Вейко В.П., Морозова А.А., Наволоцкая К.С., Одинцова Г.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассматриваются методы лазерного окрашивания металлов с точки зрения их применения при создании предметов искусства. Показаны отличительные особенности технологии цветной лазерной маркировки и лазерной живописи, представлены примеры их совместного использования.

Ключевые слова: лазерная живопись, цветная лазерная маркировка, оксидные пленки.

Интегрирование новых технологий в современное искусство является распространенной практикой. Лазерные технологии также могут быть использованы как инструмент творческой деятельности. Диапазон возможностей лазера как инструмента для модификации формы и фактуры поверхности создаваемого изделия довольно широк: в настоящее время здесь находят применение такие лазерные технологии как резка, сварка, ковка, гравировка.

В данной работе мы акцентируем внимание на использовании лазерных технологий для изменения цвета поверхности металлических изделий. Рассматривается технология цветной лазерной маркировки (ЦЛМ), в основе которой лежит процесс формирования на поверхности металлов тонких оксидных пленок, видимый цвет которых определяется интерференцией света в них. Получаемые оксиды являются результатом физико-химических процессов, происходящих при тепловом воздействии лазерного излучения на металл. Контроль параметров лазерного излучения предоставляет возможность манипулировать получаемой палитрой цветов.

Ранее в наших работах мы демонстрировали создание цветных художественных миниатюр с использованием технологии ЦЛМ [1], а также новые технологические возможности – перезаписи и стирания [2], которые позволили расширить инструментарий такой технологии. Следующим этапом интегрирования лазерных технологий в сферу искусства стала разработка нового инструмента – Лазерной кисти, отличительной особенностью которого стало ручное управление траекторией и скоростью перемещения лазерного пучка [3]. В результате использования вместо программы творческого воображения художника, а вместо исполнительного устройства (например, сканаторов в ЦЛМ) лазерной кисти, по сути, происходит переход от цветной лазерной маркировки к лазерной живописи.

В работе рассматриваются особенности использования каждого из способов нанесения цветного изображения лазером – технологии ЦЛМ с использованием стационарной лазерной системы и лазерной живописи, реализуемой с помощью Лазерной кисти. Предлагается совместное использование данных методов и демонстрируются примеры такого симбиоза.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030».

[1] Andreeva Ya.M., Luong V.C., Lutoshina D.S., Medvedev O.S., Mikhailovskii V.Yu., Moskvina M.K., Odintsova G.V., Romanov V.V., Shchedrina N.N., Veiko V.P., *Optical Materials Express*, **9**, №3, 1310-1319, (2019).

[2] Veiko V.P., Andreeva Ya., Luong V.C., Lutoshina D., Polyakov D., Sinev D., Mikhailovskii V., Kolobov Yu.R., Odintsova G., *Optica*, **8**, №5, 577-585, (2021).

[3] Вейко В.П., Лыонг В.К., Горный С.Г., Андреева Я.М., Лутошина Д.С., Одинцова Г.В., *Оптический журнал*, **87**, №10, 103-109, (2020).

**АНАЛОГО-ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ В
ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОЙ ГОЛОГРАФИИ**

Петров Н.В., Рабош Е.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассматриваются возможности изобразительной голографии для хранения информации о форме объектов. Голографические носители обладают высокой информационной емкостью, но недостаточный прогресс в развитии методов аналого-цифрового преобразования информации с изобразительных голограмм является существенным препятствием для их использования. Мы проанализировали существующие технологии преобразования в цифровой формат информации, содержащейся в изобразительных голограммах, а также комплиментарные технологии цифро-аналогового преобразования. Также будут обсуждаться потенциальные применения этих технологий в различных областях.

Ключевые слова: изобразительная голография, аналого-цифровое преобразование информации, хранение информации.

Мы подробно рассмотрели аргументы в пользу использования изобразительной голографии для архивного и кратко/среднесрочного хранения информации о форме объекта. Преимущества изобразительной голографии вкупе с техническими характеристиками материалов позволяют сделать вывод, что она имеет перспективы дальнейшего развития и активного использования в области архивного хранения информации, наряду с решением задач оперативного использования записанной информации. Мы выявили ключевой фактор, ограничивающий дальнейшее развитие этого метода: отсутствие систематизации методов аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования информации в изобразительной голографии. Данный фактор препятствует активному использованию изобразительной голографии и ограничивает возможности применения современных компьютерных и цифровых методов для анализа и обработки информации, хранящейся в изобразительных голограммах. Таким образом, консолидация существующих подходов, а также разработка и внедрение новых методов необходимы для проведения цифрового анализа и реставрации объектов, которые уже были утеряны или сильно повреждены, но чьи трехмерные изображения ранее были записаны на изобразительные голограммы.

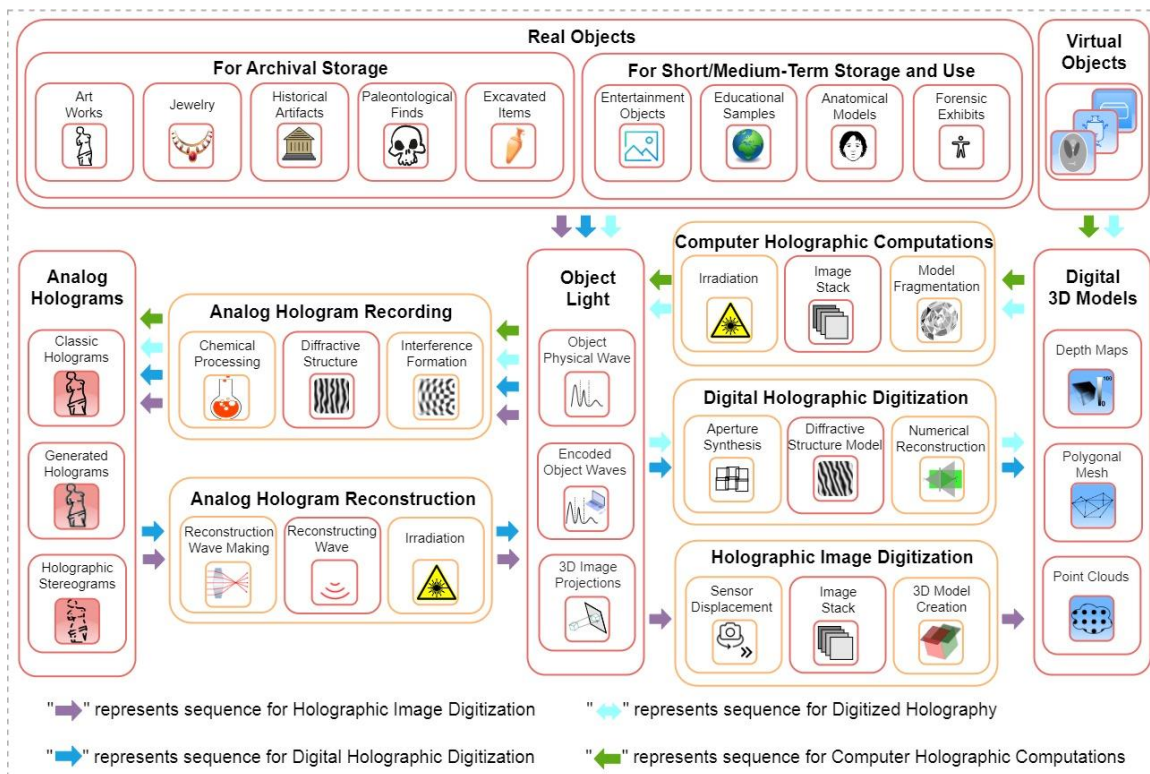


Рисунок. Подходы для ЦА- и АЦ-преобразования информации в изобразительной голографии [1]

В качестве альтернативы уже предложенным и внедренным методам мы рассмотрели фотограмметрию как легкодоступный инструмент для оцифровки волнового фронта объекта. Этот метод позволяет решить проблему аналого-цифрового преобразования информации, считанной из отражательной голограммы.

[1] Rabosh E.V., Balbekin N.S., Petrov N.V., *J. Opt. Soc. Am. A*, **40**, №4, B47, (2023).

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАБОТЫ С ПЛОТНЫМИ ВОКСЕЛЬНЫМИ ДАННЫМИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЖИВОПИСИ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

Пинаев З.А., Волынский М.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В статье описаны результаты исследований для создания системы хранения, обработки и визуализации данных в оптической когерентной томографии. Достигнуты точность объединения и качество визуализации, позволяющие исследовать трехмерную структуру живописных слоев.

Ключевые слова: большие данные, плотное воксельное пространство, станковая теперная живопись.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) позволяет решать широкий спектр задач, включая предоставление полезной информации для исследования трехмерной микроструктуры предметов живописи [1]. Поскольку произведения искусства не помещаются полностью в поле зрения систем ОКТ, необходимо использовать специальные методы, например сканирование перекрывающихся объемов. Объединение таких объемов позволяет увеличить поле зрения без усложнения конструкции оптической системы. В работе проведено исследование методов объединения, хранения и визуализации больших данных в плотном воксельном пространстве с учетом специфика данных в ОКТ. Общая схема разработанной системы представлена на рисунке.

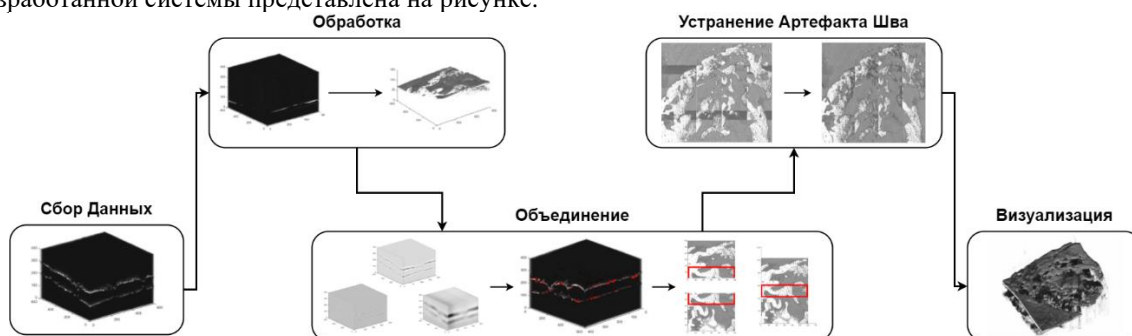


Рисунок. Схема системы для работы с большими данными в ОКТ

Экспериментальные данные получены с помощью установки на основе модифицированного микроинтерферометра Линника [2]. В качестве объекта для исследования была взята икона "Спас Вседержитель" (середина XIX века) размером 29,2×34,5 см². Для реставраторов представляли интерес характеристики лакокрасочных слоев разного возраста (авторский слой и слои поздней реставрации), определение загрязнений, а также степень сохранности живописного слоя в местах утрат и повреждений (трещины, отслоения, технологическая консервация и т.д.).

После анализа существующих методов объединения объемных данных решено использовать SIFT-дескрипторы [3]. Это позволило добиться высокой точности объединения, а также обеспечило независимость от изменения экспозиции. После ряда успешных экспериментов по совмещению воксельных данных удалось объединить все части исходного набора данных.

По результатам сшивки был получен объём с явными «артефактами шва», которые усложняют анализ исследуемого объекта. Артефакт шва заключается в том, что область перекрытия исходных частей объекта отличается по средней интенсивности от остального объема сшитого объекта. В работе проанализированы возможные причины возникновения этого артефакта (разница в экспозиции, проблемы с алгоритмами совмещения и визуализации), а также способы их устранения. В результате удалось избавиться от артефакта шва и значительно увеличить качество визуализации.

Для последнего этапа визуализации была использована передискретизация, а также проведена работа с памятью, поскольку исходный набор данных составляет более $2 \cdot 10^9$ вокселей.

В результате исследования была разработана система объединения, хранения и визуализации данных для ОКТ. Алгоритм на основе SIFT позволил объединять данные с высокой точностью, а вспомогательные техники – качественно визуализировать объединенные данные, содержащие полезную информацию для решения реставрационных задач.

Работа выполнена при поддержке Правительства РФ (грант 075-15-2021-593 в рамках Постановления № 220) в части полученных исходных экспериментальных данных и Российского научного фонда (грант 19-79-10118) в части разработки системы для работы с большими данными в ОКТ.

[1] Fichera G.V. et al., *Studies in Conservation*, **63**, 351-354, (2018).

[2] Volynsky M.A. et al., *Journal of Optical Technology*, **88** (8), 435-440, (2021).

[3] Park S. et al., *Journal of Korea Multimedia Society*, **17** (10), 1205-1212, (2014).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗУРИТА МЕТОДОМ
ИНФРАКРАСНОЙ ФУРЬЕ СПЕКТРОСКОПИИ

Андреев И.И.^{1,2}, Сирро С.В.^{1,2}, Асеев В.А.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Государственный Русский музей, Санкт-Петербург, Россия

Решение прикладных исследовательских задач с использованием математических методов анализа актуально в области науки о наследии. Классические методы идентификации лазурита, такие как микроскопия поляризованного света, рамановская спектроскопия, дифракция рентгеновских лучей, с учетом их недостатков и ограничений, могут быть сведены к использованию только одного метода - инфракрасной Фурье-спектроскопии. Возможность использования спектральных данных инфракрасного диапазона в сочетании с методом главных компонент позволяет точно отделять синтетический лазурит от натурального.

Ключевые слова: лазурит, инфракрасная спектроскопия, метод главных компонент.

Ляпис-лазурь - полудрагоценный камень, который с древних времен известен своим темно-синим оттенком. Он широко использовался на протяжении веков в самых разных областях, начиная от глиптики и заканчивая живописью. Основным синим хромофором является анион-радикал серы (Sn-, n = 2, 3), присутствующий в лазурите - $\text{Na}_6\text{Ca}_2[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}]\text{S}_2$ [1].

В европейских странах сам минерал широко использовался в качестве пигмента в порошкообразном виде вплоть до XVIII века. Однако популярность натурального пигмента начала снижаться в первые десятилетия XIX века из-за промышленного производства менее дорогостоящего искусственного пигмента - ультрамаринового синего [2].

Методология основана на анализе примесных соединений, которые являются маркерами для анализа. Наличие диопсида ($\text{MgCaSi}_2\text{O}_6$) в составе природного ультрамарина подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа, в то время как в синтетическом ультрамарине примеси либо отсутствуют, либо являются инертными наполнителями, такими как мел (CaCO_3), гипс (CaSO_4), барит (BaSO_4). Данные были получены на основе 27 красок с синтетическим ультрамарином 19-го и 20-го веков, 2 чистых пигментов, 3 образцов натурального ультрамарина. Анализ спектрального массива данных с использованием метода главных компонент позволяет автоматизировать процесс определения источника лазурита (рисунок).

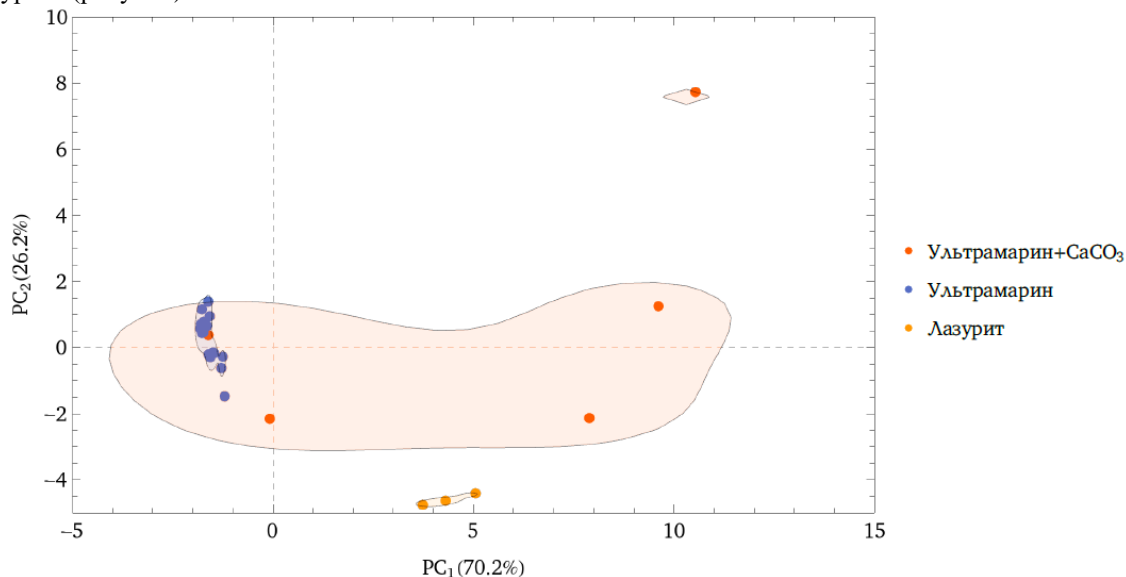


Рисунок. График счетов 1 и 2 главной компоненты в диапазоне 857-893 см⁻¹

[1] Favaro M., Guastoni A., Marini F., Bianchin S., Gambirasi A., *Anal. Bioanal. Chem.*, **402**, 2195-2208, (2012).

[2] Wang X., Zhen G., Hao X., Zhou P., Wang Z., Jia J., Gao Y., Dong S., Tong H., *Microchem. J.*, **171**, 106828, (2021).

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

ИНДУСТРИАЛЬНАЯ ФОТОНИКА (ИНЖЕНЕРНАЯ СЕКЦИЯ)

ПЕРЧАТКА-КОНТРОЛЛЕР С ДАТЧИКОМ ИЗГИБА НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Зарипов А.Э., Завалишина Л.Д., Ликумович Л.Б., Ушаков Н.А., Маркварт А.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена созданию макета перчатки-контроллера с датчиком изгиба на основе полимерного оптического волокна. Показана работоспособность макета.

Ключевые слова: полимерное оптическое волокно, интенсивностный датчик изгиба, перчатка-контроллер.

Работа направлена на создание простого макета перчатки-контроллера из легкодоступных компонентов. Существуют различные виды перчаток-контроллеров, которые отличаются друг от друга типом используемого датчика изгиба. Перспективным является использование волоконно-оптического датчика (ВОД) за счет ряда его преимуществ, таких как компактные размеры, помехозащищенность, электробезопасность, устойчивость к коррозии, биосовместимость. Известны работы, в которых применяются различные типы ВОД в составе перчаток контроллеров: с обычным [1] или эластичным необработанным волокном [2] и с волоконным брэгговскими решетками [3]. В данной работе был выбран другой тип датчика – с образованной чувствительной областью методом боковой полировки. Он более чувствительный, чем необработанное волокно и не требует дорогостоящего оптического оборудования.

Была реализована следующая схема макета перчатки-контроллера (рис. 1). Полимерное оптическое волокно диаметром 1 мм с образованной в нем чувствительной областью длиной 1 см и глубиной полировки 0,2 мм был подключен с одной стороны к светодиоду, а с другой к фоторезистору. Радиус кривизны изгиба влияет на интенсивность проходящего через волокно света, а, следовательно, на сопротивление фоторезистора, которое измерялось при помощи делителя напряжения и платы Arduino UNO R3. Написанный программный код для опроса платы позволял осуществить чтение данных с аналогового порта и конвертация этих данных в сопротивление фоторезистора, которое после процедуры калибровки пересчитывалось в значение угла изгиба пальца руки.

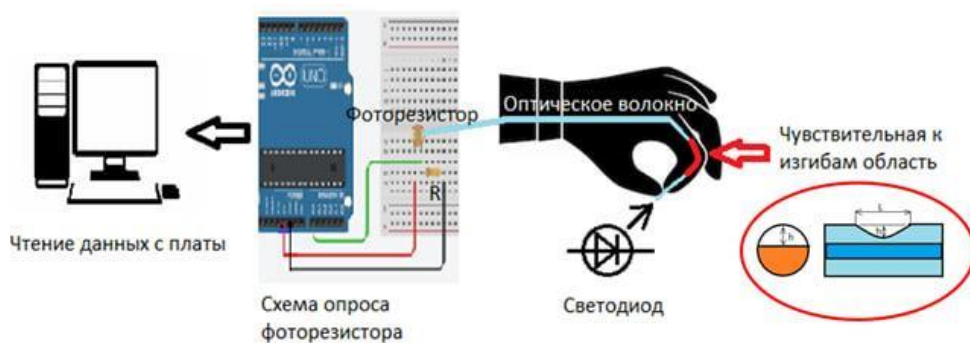


Рис. 1. Общая схема макета

Фотография перчатки с установленным на нее датчиком изгиба представлена на рисунке 2а, а на рисунке 2б представлены результаты эксперимента, в котором периодически изменялся угол изгиба пальца руки от минимального до максимального значения (от 0 до 110 град.). Ошибка нахождения угла изгиба составила порядка от 5 градусов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на снижение ошибок путем улучшения метода крепления датчика к перчатке.

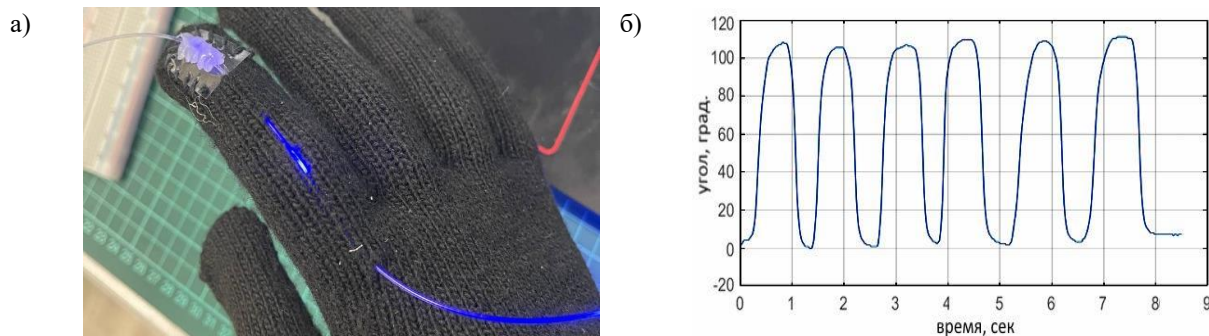


Рис. 2. а) Перчатка-контроллер с датчиком изгиба б) Зависимость угла изгиба от времени

[1] Henderson J.P., Condell J., Connolly J.L., Kelly D.J., Curran K., *Sensors*, **21**, 1576, (2021).

[2] Yu H., Zheng D., Liu Y., Chen S., Wang X., Peng W., *Polymers*, **15**, 100, (2022).

[3] Da Silva A.J., Gonçalves A.P., Mendes P.M., Correia J.H., *IEEE Sensors Journal*, **11**, 2442–2448, (2011).

НЕЙРОМОРФНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, ОСНОВАННАЯ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МЕТАЛЛАХ ОКСИДОВ

**Иванов Ф.Л., Чежегов А.А., Красников В.В., Балашов И.И.,
Чижов А.С., Грунин А.А., Федянин А.А.**

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Современные архитектуры вычислительных систем имеют существенные недостатки, это приводит к необходимости создания устройств на основе новых архитектур. В нашей работе мы создали, смоделировали и обучили энергонезависимое вычислительное устройство.

Ключевые слова: нейроморфная фотоника, искусственный интеллект.

Для создания нейроморфного устройства был разработан искусственный электрооптический синапс (рис. 1) на основе оксидов полупроводниковых металлов. Для демонстрации и реализации обучения спайковых нейронных сетей на основе нанокристаллитов полупроводниковых металлов была создана блок-схема нейроморфных вычислений.

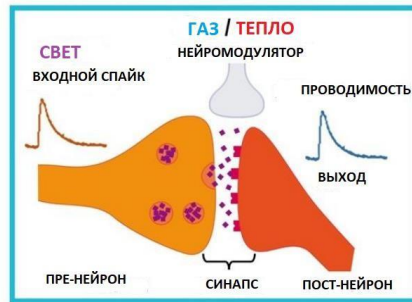


Рис. 1. Модель искусственного синапса

Для демонстрации визуального восприятия и обучения структур, размещенных на вычислительной плате, которая содержит 64 синаптические связи, мы создали полностью связанную спайковую нейронную сеть (рис. 2).

Для описания нейрона мы использовали частотное кодирование и упрощенную модель Integrate and fire. Мы обучили нейронную сеть, используя метод STDP. После 200 итераций обучения мы восстановили паттерны изображений, показанные на рисунке 2.

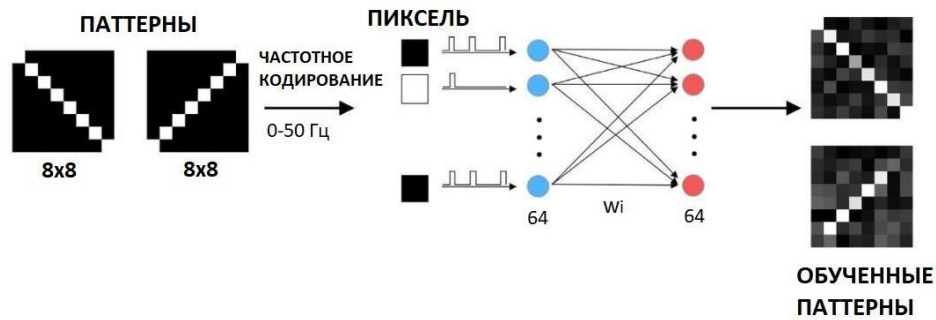


Рис. 2. Схема обучения спайковой нейронной сети

В результате моделирования был проведен эксперимент, в котором энергонезависимое нейроморфное вычислительное устройство на основе искусственных синапсов смогло обучаться с высокой точностью.

[1] Powell J.R., *Proceedings of the IEEE*, **96**, №8, 1247-1248, (2008).

[2] Schuman C.D., Kulkarni S.R., Parsa M., Mitchell J.P., Date P., Kay B., *Nature Computational Science*, **2**, №1, 10-19, (2022).

**СДВИГИ ЧАСТОТЫ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В
КВАНТОВЫХ МАГНИТОМЕТРАХ НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ
ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ АТОМОВ**

Картошкин В.А.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Проводится расчет сечений и сдвигов частоты магнитного резонанса оптически ориентированных щелочных атомов K, Cs и Rb, обусловленных спиновым обменом и используемых в качестве рабочих сред в квантовых магнитометрах.

Ключевые слова: оптическая ориентация, сдвиги.

Взаимодействие поляризованного резонансного оптического излучения с ансамблем атомов приводит к хорошо известному эффекту оптической ориентации атомов - передаче углового момента от поляризованного резонансного оптического излучения ансамблю атомов, находящихся либо в основном, либо в возбужденном состоянии и имеющих не спаренный электронный спин на внешней оболочке.

Прогресс в создании полупроводниковых лазеров дал в последние годы дополнительный толчок к развитию приборов и устройств, построенных на основе явления оптической ориентации атомов. К подобного рода устройствам можно отнести квантовые магнитометры [1], квантовые гироскопы, магнитоэнцефалографы, а также квантовые стандарты частоты и времени. В этих устройствах в качестве рабочих сред и объектов оптической ориентации используются как атомы щелочных металлов, так и их смеси. Источником информации является линия магнитного резонанса ориентированных атомов ширина и положение которой зависит от внешнего магнитного поля, столкновительных процессов, диффузии и т.д. Фактором, влияющим на точность устройств, является соответствие частоты линии магнитного резонанса приложенному внешнему магнитному полю. На частоту линии магнитного резонанса влияют также и столкновительные процессы, происходящие между ориентированными атомами – спиновый обмен (обмен электронной поляризацией между сталкивающимися атомами). Спиновый обмен влияет как на ширину, так и на сдвиг частоты линии магнитного резонанса (спин обменный сдвиг) [2].

Присутствие в камере поглощения смеси щелочных атомов ведет к тому, что в условиях оптической ориентации атомов происходят столкновения как между одинаковыми, так и между разными щелочными атомами, что влияет на величину сдвига частоты. Можно показать, что сдвиги частоты двух сверхтонких состояний щелочного атома ($F_+ = S + I$ (1) и $F_- = S - I$ (2), здесь S -электронный, а I -ядерный спины) равны:

$$\delta^{(1)}\omega(+) = -P_z(B)/2(2I_A + 1) \left[\bar{v}_{AB} - \bar{v}_{AA}B_- \left(2I_A - 1/2I_A + 1 \right)^{1/2} \right], \quad (1)$$

$$\delta^{(1)}\omega(-) = -P_z(B)/2(2I_A + 1) \left[\bar{v}_{AB} + \bar{v}_{AA}B_- \left(2I_A + 3/2I_A + 1 \right)^{1/2} \right], \quad (2)$$

здесь $P_z(B)$ – степень поляризация атома B в результате оптической ориентации атомов, $\bar{v}_{AA,AB}$ – мнимые части комплексной скорости спинового обмена при столкновении одинаковых и разных атомов, которая может быть выражена через мнимые части комплексного сечения спинового обмена ($\bar{v}_{AB} = \langle v_{AB} \rangle N_B \bar{\sigma}_{AB}$), N_B – концентрация частиц B (в нашем случае – атомов ^{39}K , при столкновении одинаковых атомов индекс B заменяется на индекс A), $\langle v_{AB} \rangle$ – средняя относительная тепловая скорость сталкивающихся частиц, $\bar{\sigma}_{AB}$ – мнимая часть сечения спинового обмена). Коэффициенты B_+ и B_- зависят от величины ядерного момента атома A . На рисунке представлены расчетные зависимости сдвига частоты магнитного резонанса атомов калия при оптической ориентации атомов изотопа ^{85}Rb в смеси калий-рубидий.

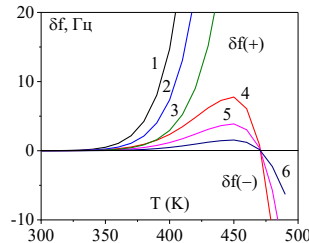


Рисунок. Температурная зависимость величин сдвига магнитного резонанса ($\delta f = \delta\omega/2\pi$) атомов калия в F_+ и F_- состояниях при спин обменных столкновениях с оптически ориентированными атомами рубидия 85 . Кривые 1, 4 соответствуют степени поляризации атомов рубидия $P_z(B)$ – 100%, 2,5 – 50%, 3,6 – 20%

Как видно из рисунка, сдвиг частоты магнитного резонанса сверхтонкого состояния F_- при росте температуры меняет знак с положительного на отрицательный и проходит через ноль в области $T = 475$ K. Это позволяет подобрать условия, когда спин обменный сдвиг будет минимален или равен нулю в приборе.

[1] Александров Е.Б., Балабас М.В., Вершовский А.К., Пагалев А.С., *ЖТФ*, **70**, №7, 118-124, (2000).

[2] Картошкин В.А., *Опт. и спектр.*, **130**, №11, 1634-1637, (2022).

СВЕРХБЫСТРАЯ ФОТОНИКА И КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИКА

**БИСТАБИЛЬНОСТЬ НЕЛИНЕЙНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО
НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ В
ТЕРАГЕРЦОВОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ**

Бабенко А.Д., Гендрина А.А., Козлов С.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Показано, что беззеркальные интерферометры Фабри-Перо на основе пластин кристалла ниобата лития миллиметровых толщин демонстрируют бистабильное пропускание терагерцового излучения при его интенсивностях меньших 10^5 Вт/см².

Ключевые слова: бистабильность интерферометра Фабри-Перо.

Важной особенностью ряда кристаллов в терагерцовом (ТГц) спектральном диапазоне является большое значение их линейного и нелинейного показателей преломления [1]. В настоящей работе рассмотрена возможность использовать эти материалы в нелинейном интерферометре Фабри-Перо, на основе которого могут быть созданы такие устройства нелинейной фотоники, как оптические транзисторы и ячейки оптической памяти [2].

Для изучения бистабильности нелинейного пропускания интерферометра Фабри-Перо в работе использовано соотношение между значениями интенсивности на входе интерферометра I_0 и на его выходе I_t вида:

$$I_0 = I_t \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \left(\frac{2\pi L n_0}{\lambda} + \frac{3\pi L}{\lambda} \frac{1+R}{1-R} n_2 I_t \right) \right], \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения, R – энергетический коэффициент отражения зеркал интерферометра, L – толщина оптической среды внутри интерферометра, n_0 – её линейный показатель преломления, n_2 – коэффициент нелинейного показателя преломления.

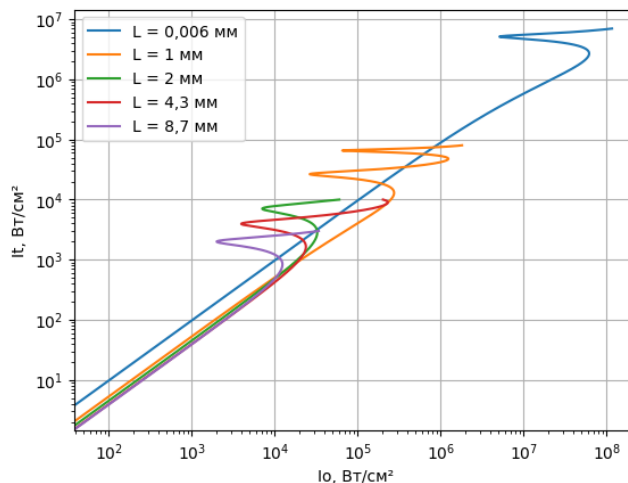


Рисунок. Зависимость интенсивности излучения на выходе интерферометра I_t от интенсивности на его входе I_0 для разных толщин нелинейной оптической среды интерферометра

Высокие показатели преломления кристалла позволяют упростить создание интерферометра Фабри-Перо, сделав его “беззеркальным”. Так, Френелевские коэффициенты отражения интерферометра для кристалла ниобата лития при значении его линейного показателя преломления в 5,15 в ТГц диапазоне составляют 0,67. Значение коэффициента нелинейного показателя преломления этого кристалла в терагерцовом диапазоне составляет $5 \cdot 10^{-11}$ см²/Вт. На рисунке представлены результаты расчета по формуле (1) пропускания нелинейного интерферометра Фабри-Перо на основе пластинки кристалла ниобата лития для излучения 1 ТГц.

[1] Gibbs H.M., *Optical Bistability, Controlling Light with Light*, 471, (1985).

[2] Tsyupkin A.N, et al., *Optics Express*, **27**, №8, 10419-10425, (2019).

**ЧИСЛЕННЫЕ СХЕМЫ С РАСЩЕПЛЕНИЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ
УРАВНЕНИЯ ГИНЗБУРГА-ЛАНДАУ**

Васева И.А.^{1,2}, Медведев С.Б.^{1,2}, Штырина О.В.^{2,1}, Федорук М.П.^{2,1}

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Проведён сравнительный анализ численных схем с расщеплением по физическим процессам для решения уравнения Гинзбурга-Ландау, описывающего распространение оптического сигнала в лазерном резонаторе.

Ключевые слова: уравнение Гинзбурга-Ландау, фурье-метод расщепления по физическим процессам, диссипативный солитон.

Общие характеристики оптического сигнала, как результата генерации в резонаторе, могут быть описаны при помощи динамической модели, основанной на комплексном кубическом уравнении Гинзбурга-Ландау, учитывающем насыщенное усиление и диссипативные члены, отвечающие за распределенное действие различных внутррезонаторных устройств:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -i \frac{\beta L}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i \gamma L |A|^2 A + \sigma A + \frac{\kappa}{P_{SAM}} |A|^2 A, \quad (1)$$

где $A(z, t)$ – огибающая электромагнитного поля, t – временная переменная, z – эволюционная пространственная переменная, нормированная на длину резонатора $L = L_A + L_P$, βL – хроматическая дисперсия за проход, γL – нелинейность за проход, κ – глубина модуляции насыщающегося поглотителя (SAM), P_{SAM} – мощность насыщения. Параметр σ определяет разность между насыщенным усилением сигнала и ненасыщенными потерями за один проход резонатора

$$\sigma = \frac{g_s}{2} - \frac{\alpha}{2} - \kappa - \frac{\delta}{2}, \quad g_s = \frac{g_A L_A}{1 + E/E_{SAT}}, \quad (2)$$

где g_s – насыщенное усиление, $g_A L_A$ – ненасыщенное усиление в активном волокне за проход, E_{SAT} – энергия насыщения, $\alpha = \alpha_P L_P$ – линейные потери в пассивном волокне за проход. Потери на ответвителе δ учитываются либо усредненно и входят в коэффициент уравнения σ (2), либо точно. В последнем случае считается, что в соотношении (2) $\delta = 0$, но при этом на каждом целом z часть поля, остающаяся в резонаторе, нормируется следующим образом

$$A_{in}(z, t) = \exp\left(\frac{\delta}{2}\right) A(z, t). \quad (3)$$

Уравнение (1) является нелинейным уравнением в частных производных, которое в общем случае нельзя решить аналитически. Одним из наиболее широко используемых методов численного решения таких уравнений является фурье-метод расщепления по физическим процессам [1]. Как правило используется расщепление на линейный и нелинейный шаги и применяется разложение Стренга, позволяющее получить второй порядок точности по шагу dz . В уравнении (1) присутствуют дополнительные члены помимо дисперсии и нелинейности, действие которых также необходимо учесть при численном решении. Дополнительную сложность представляет тот факт, что в коэффициенты уравнения входит член, зависящий от энергии поля. В работе предложена модификация метода расщепления по физическим процессам для численного решения уравнения (1), учитывающая эволюцию энергии. Исследованы различные схемы с расщеплением по физическим процессам [2], позволяющие получить меньшую погрешность решения, чем разложение Стренга.

Уравнение Гинзбурга-Ландау (1) может быть использовано для описания одномерной волновой турбулентности оптических волн в волоконных лазерах [3] при сосуществовании случайных дисперсионных волн и когерентных структур, в частности солитонов. Насыщающееся поглощение мощности учитывается в модели в виде кубической нелинейности, поскольку в этом случае стационарное решение принадлежит семейству гиперболических секансов с чирпом C :

$$A(z, t) = a [\operatorname{sech}(\tau t)]^{1+iC} \exp(i\phi z). \quad (4)$$

Такое решение является устойчивым нелинейным пакетом волн, локализованным благодаря балансу накачки и диссипации энергии в системе, и называется оптическим диссипативным солитоном.

В работе определены параметры стационарного решения вида (4) в зависимости от исходных параметров модели (1). Анализ численных схем проведён на основе сравнения численного решения уравнения (1) с аналитическим стационарным решением (4).

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ (проект № 22-11-00287, <https://rscf.ru/project/22-11-00287/>).

[1] Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика Москва, Мир, 1996.

[2] Coefficients of various splitting methods. [Электронный ресурс] URL: <https://www.asc.tuwien.ac.at/~winfried/splitting/> (Дата обращения: 09.06.2023).

[3] Churkin D.V., Kolokolov I.V., Podivilov E.V. et al, *Nature communications* **6**, 6214, 1-6, (2015).

ПОСТОЯННЫЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИ ИЗГИБЕ
СТУПЕНЧАТОГО МНОГОМОДОВОГО СВЕТОВОДА

Завалишина Л.Д., Зарипов А.Э., Ликумович Л.Б., Ушаков Н.А., Маркварт А.А.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

Произведен численный расчет постоянных распространения мод изогнутого многомодового оптического волокна со ступенчатым профилем показателя преломления. Показано, что зависимости постоянных распространения от квадрата кривизны изгиба имеют нелинейный и немонотонный характер.

Ключевые слова: постоянные распространения, многомодовый световод, изгиб.

Многомодовые оптические волокна широко используются для построения волоконно-оптических линий связи, волоконно-оптических датчиков и других оптических устройств. В таких системах волокно может испытывать изгиб, что приводит к изменению постоянных распространения мод в многомодовом волокне и может влиять на работу системы. Например, это изменение непосредственно влияет на сигнал межмодовых волоконных интерферометров, что обуславливает возможность создания датчиков изгиба на их основе. Поэтому актуальным является исследование поведения постоянных распространения мод при изгибе. Однако в известных работах такое исследование проведено либо в малом диапазоне кривизны изгиба [1], либо всего для нескольких мод оптического волокна [2]. Настоящая работа направлена на восполнения данного пробела.

Исследование изгиба многомодового волокна осуществлялось при помощи численного моделирования в программе COMSOL Multiphysics в интерфейсе «The Radio Frequency, Electromagnetic Waves, Frequency Domain». Была рассмотрена модель реального многомодового световода Thorlabs FG050LGA, в котором материал сердцевины – кварц, а материал оболочки – кварц, легированный примерно 3.5% фтора [1]. Диаметры сердцевины и оболочки – 50 мкм, 125 мкм, соответственно. Численное моделирование проводилось на длине волны 1.55 мкм. В ходе численного моделирования рассчитывались осесимметричные HE_{1p} (LP_{0p}) моды. Для расчета мод изогнутого световода был использован общепринятый подход, а именно замена изогнутого световода с прямолинейным в каждом сечении ступенчатым профилем показателя преломления на эквивалентный прямолинейный с возмущенным профилем показателя преломления [2]. При этом упруго-оптический эффект в модели не учитывался. Учет этого эффекта для кварцевого волокна можно произвести при помощи поправочного коэффициента: $\rho_{eff} = \rho/1.28$ [3], где ρ – кривизна изгиба реального волокна, а ρ_{eff} – кривизна изгиба в модели волокна, не учитывающей упруго-оптический эффект.

Численное моделирование проводилось в большом диапазоне кривизны изгиба: от 0 до 100 м^{-1} . На рисунке приведены графики зависимостей приращений постоянных распространения β_{0p} от квадрата кривизны изгиба ρ_{eff}^2 . В небольшом диапазоне (от 0 до 100 м^{-2}) зависимости имеют линейный вид, причем каждая последующая мода имеет все меньшее приращение (рис. (а)). Однако, в большом диапазоне кривизны изгиба зависимости имеют сложный нелинейный немонотонный характер (рис. (б)). Это приведет, например, к сложному отклику датчика изгиба, основанного на межмодовом волоконном интерферометре с использованием исследуемого в работе многомодового оптического волокна.

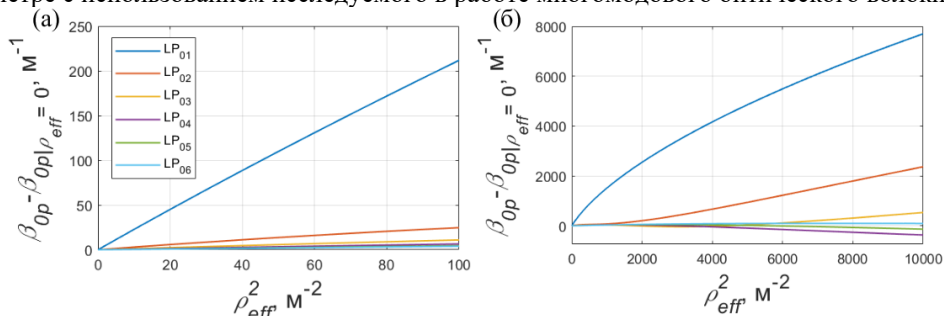


Рисунок. Графики зависимости (а) приращений β_{0p} от изгиба для LP_{0p} мод в диапазоне ρ_{eff}^2 от 0 до 100 м^{-2} , (б) приращений β_{0p} от изгиба для LP_{0p} мод в диапазоне ρ_{eff}^2 от 0 до 10000 м^{-2}

[1] Маркварт А.А., Многопараметрические волоконно-оптические измерения на основе спектральной интерферометрии: дис. ... к.ф.-м.н, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 197, (2022).

[2] Schermer R.T., Mode scalability in bent optical fibers, *Opt. Express. Optica Publishing Group*, **15**, №24, 15674–15701, (2007).

[3] Schermer R., Cole J., Improved Bend Loss Formula Verified for Optical Fiber by Simulation and Experiment, *Quantum Electronics, IEEE Journal*, **43**, 899–909, (2007).

О ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ

Казаков И.И., Гусельников М.С., Козлов С.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: продемонстрированы принципы управления терагерцовым излучением с помощью интенсивного излучения той же частоты в нелинейном интерферометре Фабри-Перо с рабочей средой, обладающей гигантской колебательной нелинейностью.

Ключевые слова: оптический транзистор, нелинейный интерферометр Фабри-Перо.

В последнее десятилетие было теоретически предсказано [1], а затем экспериментально подтверждено [2] наличие у ряда материалов в терагерцовом (ТГц) диапазоне спектра гигантской (до 6 порядков больше, чем в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах) малоинерционной нелинейности показателя преломления. Обнаружение такой нелинейности открыло возможность для создания сверхбыстрых устройств ТГц фотоники. В настоящей работе теоретически показано, что слабое ТГц излучение может быть в десятки раз усилено в нелинейном интерферометре Фабри-Перо с рабочей средой, обладающей гигантской колебательной нелинейностью, толщиной несколько миллиметров при достижимых от современных источников интенсивностях излучения накачки.

Функция пропускания нелинейного интерферометра Фабри-Перо для квазимонохроматического излучения имеет вид [3]

$$I_t = I_0 \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left(\frac{2\pi L}{\lambda} n_0 + \frac{3}{2} \frac{1+R}{1-R} \frac{2\pi L}{\lambda} n_2 I_t \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где I_0 и I_t - входная и выходная интенсивности излучения, L - толщина интерферометра, λ - длина волны излучения, n_0 - линейный показатель преломления среды интерферометра, n_2 - ее нелинейный коэффициент показателя преломления, R - коэффициент отражения зеркал интерферометра.

В режиме максимального усиления нелинейный интерферометр Фабри-Перо приобретает свойства оптического транзистора. В работе показано, что чтобы перевести нелинейный интерферометр в такой режим, эффективная толщина его рабочей среды и интенсивность входного излучения должны удовлетворять выведенным из формулы (1) условиям

$$L_{nz} = \frac{1}{n_0} \left(-\sqrt{3} \frac{1-R}{2\sqrt{R}} + \pi Z \right), \quad (2)$$

$$I_{0m}(L_{nz}) = \frac{8\sqrt{3}}{27} \frac{(1-R)^2}{(1+R)\sqrt{R}n_2 L_{nz}}, \quad (3)$$

где Z - номер участка бистабильности, I_{0m} и L_{nz} - входная интенсивность излучения и приведенная толщина интерферометра, соответственно, при которых достигается максимальное усиление. В случае нарушения условий, налагаемых соотношениями (2)-(3), нелинейный интерферометр может перейти в режим бистабильности. На рисунке приведены кривые пропускания, соответствующие переходу нелинейного интерферометра Фабри-Перо на основе беззеркальной (на френелевском отражении) пластинки кристалла ниобата лития из режима транзистора в режим бистабильности при изменении его эффективной толщины.

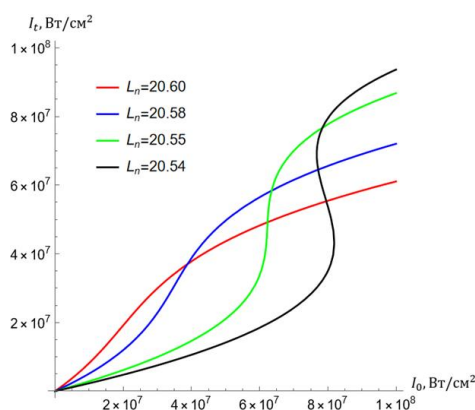


Рисунок. Переход нелинейного интерферометра Фабри-Перо на основе кристалла ниобата лития из режима усиления в режим бистабильности при изменении толщины кристалла ($R = 0,548$, $\lambda = 0,3$ мм)

Из рисунка видно, что при интенсивностях излучения накачки $(4 - 6) \times 10^7$ Вт/см² сигнальная волна с интенсивностью до 10^6 Вт/см² может усиливаться нелинейным интерферометром в десятки раз.

[1] Dolgaleva K. et al., *Phys. Rev. A*, **92**, №2, 023809, (2015).

[2] Тсупкин А.Н. et al., *Opt. Express*, **27**, №8, 10419, (2019).

[3] Gibbs H.M., "Optical Bistability: Controlling Light with Light", NY.: Academic Press, (1985).

**ОДНОПИКСЕЛЬНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ
ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С РАЗРЕШЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ**
Лаппо-Данилевская А.К, Исмагилов А.О., Черных А.В., Цыпкин А.Н.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе произведено восстановление изображений двух объектов, разнесенных в пространстве, методом однопиксельной визуализации в случае случайного считывания. Произведён расчёт расстояния между объектами по измеренным данным о времени полёта излучения.

Ключевые слова: однопиксельная визуализация, случайное считывание, лазерные дальномеры.

Трёхмерная визуализация на протяжении многих лет представляет высокий интерес по причине необходимости передачи информации о реальном расположении объекта в пространстве. Распространённой технологией являются лазерные дальномеры (Лидар, LIDAR). Их преимущество состоит в устойчивости к шумам, вносимым окружающей средой, и высоком разрешении. В данной работе рассматривается Лидар технология, основанная на расчете расстояния через время пролёта импульса от источника до цели и обратно до детектора. На данный момент была проверена возможность восстановления изображения объекта с помощью объединения технологии LiDAR и однопиксельной визуализации в случае случайного освещения [1]. Однако в случае случайного считывания достигается более высокое качество восстановленного изображения при увеличенном расстоянии относительно методов случайного освещения [2], в связи с чем совмещение лазерных дальномеров и однопиксельной визуализации является перспективным направлением.

В ходе работы было произведено восстановление изображения объекта методом однопиксельной визуализации в случае случайного считывания с использованием в качестве шаблонов масок Адамара, подаваемых на пространственный модулятор света DLP 6500 за 4096 итераций, результат которого представлен на рисунке.

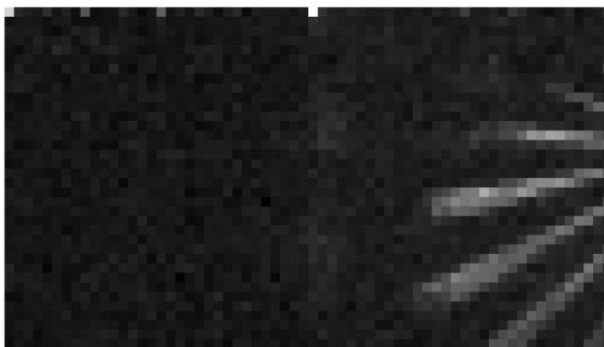


Рисунок. Восстановленное изображение миры

С помощью USB осциллографа Nantek DSO-6022BE с частотой дискретизации 48 МГц была зарегистрирована форма сигналов, проходящих от двух зеркал, расположенных на расстоянии 5 метров, и оценено необходимое расстояние между объектами. Затем была собрана схема для реализации восстановления изображений двух объектов, находящихся на расстоянии методом однопиксельной визуализации в случае случайного считывания с временным разрешением и восстановлены изображения обоих объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт No 2019-0903).

[1] Sun M.J. et al., *Nature communications*, **7**, №1, 1-6, (2016).

[2] Gong W., *Optics & Laser Technology*, **152**, 108140, (2022).

**ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ
УПРАВЛЯЕМЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ
ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ВИХРЕЙ**

Пантелеева Е.П., Кабанова О.С., Мельникова Е.А.

Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

Оптимизирован метод поляризационно-голографической записи поверхностной анизотропии в тонких плёнках фоточувствительного азокрасителя AtA-2 и на этой основе созданы электрически переключаемые жидкокристаллические решетки с вилочной дислокацией, формирующие оптические вихри с заданной величиной топологического заряда. Экспериментально исследована пространственная устойчивость генерируемых оптических вихрей при разных значениях управляющего напряжения.

Ключевые слова: поляризационная голография, дифракционная решетка, жидкие кристаллы.

В последние два десятилетия поляризационные решетки являются объектом пристального внимания исследователей во всем мире благодаря превосходным дифракционным и поляризационно-селективным свойствам [1]. Жидкокристаллические (ЖК) материалы, характеризуясь управляемой оптической анизотропией, успешно применяются для разработки одномерных и двумерных дифракционных структур, обеспечивающих эффективную модуляцию света. Перспективным методом формирования поляризационных ЖК-решеток является голографическая запись [2].

Цель работы – оптимизация условий поляризационно-голографической записи и создание вилочных ЖК-решеток, обеспечивающих формирование оптических вихрей с заданной величиной топологического заряда.

Для изготовления переключаемой вилочной ЖК-решетки использовался метод поляризационной голографии, основанный на наведении поверхностной анизотропии в фоточувствительном ориентирующем слое азокрасителя AtA-2 при когерентном сложении сингулярного пучка с плоской волной. В качестве регистрирующей среды использовались тонкие плёнки (порядка 30 нм) азокрасителя AtA-2, имеющего полосу поглощения в диапазоне 450-520 нм [3]. В эксперименте применялась схема Лейта-Упатниекса с ортогональными и круговыми поляризациями в сигнальном и опорном пучках на длине волны 488 нм. Для повышения эффективности голографической записи дифракционных ЖК-решеток выполнен экспериментальный анализ оптимальных условий экспонирования пленок азокрасителя AtA-2 интерференционной картиной когерентных световых пучков.

Управление дифракционной эффективностью изготовленной вилочной ЖК-решетки реализовывалось в условиях воздействия низкочастотного напряжения в диапазоне 0-10 В. Установлено, что максимальное значение дифракционной эффективности в ± 1 порядках дифракции достигается при величине управляющего напряжения порядка 2.5-3.0 В, что обусловлено частичной переориентацией директора жидкого кристалла во внешнем электрическом поле (переход Фредерикса).

Методом оптической интерферометрии исследованы профили распределения интенсивности световых пучков в направлении ± 1 порядков дифракции (рисунок), что позволило сделать вывод о пространственной устойчивости формируемых оптических вихрей при разных значениях напряжения.

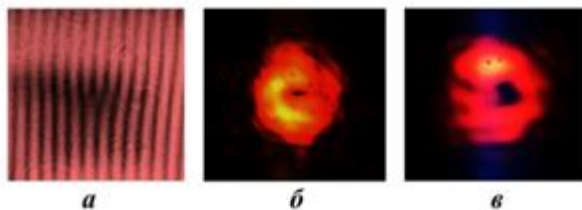


Рисунок. Экспериментальные микрофотографии: *a* – картина интерференции плоской волны и оптического вихря с топологическим зарядом $|l| = 1$; *б* – пространственное распределение интенсивности восстановленного He-Ne лазером в -1 порядок дифракции оптического вихря; *в* – пространственное распределение интенсивности восстановленного в +1 порядок дифракции оптического вихря

Область применения полученных результатов включает разработку и создание систем управления фазово-поляризационной структурой световых пучков, оптический захват и манипулирование микрочастицами, визуализацию биообъектов с высоким пространственным разрешением, лазерную обработку материалов, кодирование и передачу информации по оптоволоконным линиям связи.

[1] Zuo K., Shi Y., Luo D., *Crystals*, 11(9):1015, (2021).

[2] Melnikova E.A., Kurapov J.D., Romanov O.G., Tolstik A.L., *Proc. of 11-th International conference "HoloExpo'2014"*, 99-104, (2014).

[3] Mikulich V.S., Murauski An.A., Muravsky Al.A., Agabekov V.E., *Appl. Spectr.*, **83**, 115-120, (2016).

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД НИЗКОПОРОГОВОЙ БИСТАБИЛЬНОСТИ
ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОПУСКАНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО
ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО**

Терещенко Г.Р., Шипов М.Д., Козлов С.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Метод низкопороговой бистабильности расчета пропускания излучения нелинейным интерферометром Фабри-Перо модифицирован на случай существенно отличных от единицы коэффициентов отражения зеркал интерферометра. Получена зависимость индуцированного излучением изменения показателя преломления среды в интерферометре, необходимого для бистабильности пропускания, от ее толщины для разных значений коэффициента отражения зеркал.

Ключевые слова: нелинейный интерферометр Фабри-Перо, бистабильное пропускание интерферометра.

Интенсивности монохроматического излучения на входе в нелинейный интерферометр Фабри-Перо I_0 и на его выходе I_t связаны соотношением (1):

$$I_0 = I_t \left(1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left(\frac{2\pi L}{\lambda} + \frac{6\pi L}{\lambda} n_2 \frac{1+R}{1-R} I_t \right) \right), \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения; R – коэффициент отражения зеркал интерферометра; L – толщина оптической среды интерферометра; n_2 – ее коэффициент нелинейного показателя преломления.

Для получения аналитических соотношений удобно ввести нормированные параметры (2):

$$J_i = 3\eta n_2 \frac{1+R}{1-R} I_i, \quad \eta = \frac{2\pi L}{\lambda}, \quad (2)$$

где J_i – приведенная интенсивность излучения, индекс $i = 0, t$; η – нормированная толщина среды.

В безразмерных величинах (2) соотношение (1) примет вид:

$$J_0 = J_t \left(1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2(\eta + J_t) \right). \quad (3)$$

В методе низкопороговой интенсивности малым параметром рассматривается величина $\eta + J_t$ [2], при этом коэффициент отражения зеркал рассматривается близким к единице. В настоящей работе мы полагаем малой только величину J_t . Раскладывая выражение (3) в ряд по этому малому параметру, получаем:

$$J_0 = \left(1 + \frac{2R(1-\cos 2\eta)}{(1-R)^2} \right) J_t + \frac{4R \sin 2\eta}{(1-R)^2} J_t^2. \quad (4)$$

Экстремум функции (4) соответствует появлению бистабильности в пропускании интерферометра. Ему соответствует значение приведенной интенсивности:

$$J_t = -\frac{1+R^2-2R \cos(2\eta)}{4R \sin(2\eta)}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует соотношение для индуцированного излучением изменения показателя преломления среды интерферометра:

$$\Delta_{\text{нлпор}} = n_2 I_{t \max} = -\frac{(1+R^2-2R \cos(2\eta))(1-R)}{12R \sin(2\eta)(1+R)}. \quad (6)$$

Зависимости (5) и (6) отражены на графиках для разных значений коэффициентов отражения зеркал R .

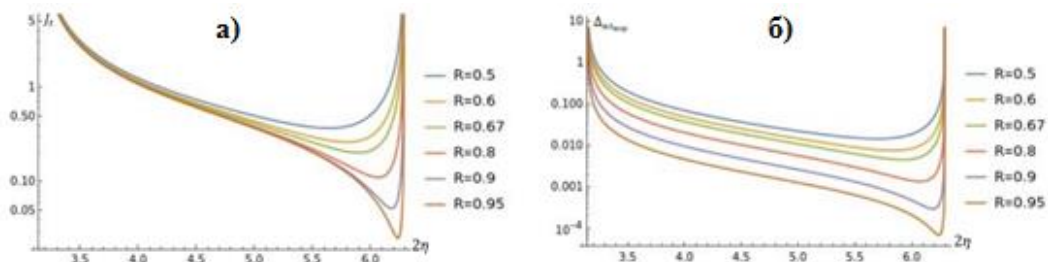


Рисунок. а) Зависимость приведенной интенсивности излучения на выходе интерферометра J_t от его удвоенной нормированной толщины 2η . **б)** Зависимость индуцированного изменения показателя преломления среды интерферометра от его удвоенной нормированной толщины 2η

Из рисунка (а) видно, что предлагаемое приближение применимо вплоть до коэффициента $R = 0.6$, а не близкого к 1, как в известном приближении низкопороговой интенсивности. Из рисунка (б) видно, что при таком R бистабильность возможна при $\Delta_{\text{нлпор}} = 0.2$, которое достижимо в средах с гигантской нелинейностью в ТГц спектральном диапазоне.

[1] Гиббс Х. Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света. – М.: Мир, 1988, – 520 с.

[2] Розанов Н.Н. Оптическая бистабильность и гистерезис в распределенных нелинейных системах. – М.: Наука. Физматлит, 1997.– 336 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СВЕТОВЫХ ПУЛЬ,
РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ДИЭЛЕКТРИКЕ

Бугай А.Н.¹, Халяпин В.А.²

¹Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия,

²ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет», БФУ им. И. Канта, Калининград, Россия

Проведена аналитическая оценка параметров световых пуль, формирующихся в области аномальной групповой дисперсии в диэлектриках в условиях туннельной фотоионизации. Предложено новое аналитическое приближение для расчета вклада туннельной ионизации. Используя метод моментов и теорию устойчивости Ляпунова, найдено квазистационарное решение и условия квазиустойчивого распространения.

Ключевые слова: световые пули, туннельная ионизация, устойчивость.

Распространение интенсивного продольно-поперечного импульса в диэлектрике можно описать уравнением

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 \psi}{\partial \tau^3} - \frac{i\mu}{2} \Delta_{\perp} \psi - i\gamma \psi |\psi|^2 + \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial}{\partial \tau} (\psi |\psi|^2) + i\eta \psi \int_{-\infty}^{\tau} W d\tau' = 0. \quad (1)$$

Здесь ψ – медленно меняющаяся огибающая, ω – центральная частота сигнала, Δ_{\perp} – поперечный лапласиан, z – координата, вдоль которой распространяется сигнал, τ – время в сопутствующей системе координат, ω – центральная частота, $\mu = c/n_0\omega = 1/n_0k_0$, n_0 – показатель преломления на частоте ω , k_0 – волновое число в вакууме, $k = n_0k_0$, β_2 – коэффициент дисперсии групповой скорости (ДГС), β_3 – положительный параметр, определяющий дисперсию третьего порядка, γ – коэффициент кубической нелинейности, $\eta = s\omega\tau_c N_0/2$, e и m – соответственно заряд и масса электрона, N_0 – концентрация неионизированных молекул, $s = k_0\omega\tau_c/n_0N_c(1+\omega^2\tau_c^2)$ – поперечное сечение лавинной ионизации, $N_c = \varepsilon_0 m_e \omega^2 / e^2$ – критическая плотность плазмы, выше которой плазма перестает быть прозрачной, ε_0 – восприимчивость вакуума, τ_c – время столкновения электронов, W – степень ионизации, описываемая формулой Келдыша для диэлектриков [1]. Для упрощения аналитических расчетов будем рассматривать длины распространения, при которых приближенно можно пренебречь истощением энергии сигнала. Анализ динамики параметров импульса проводился на основе метода моментов [2]. Пробное решение выбиралось в виде

$$\psi = B \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - T}{\tau_p} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + i \left(\phi + \Omega(\tau - T) - C \frac{(\tau - T)^2}{2\tau_p^2} - \frac{\varepsilon r^2}{2R^2} \right) \right], \quad (2)$$

где B – амплитуда сигнала, τ_p – его длительность, C – параметр, определяющий частотную модуляцию, ϕ – фаза, R – параметр, пропорциональный радиусу сигнала, ε – описывает кривизну волновых поверхностей, T – временное запаздывание. Все параметры зависят от координаты z . Используя метод моментов [2], можно получить систему уравнений для параметров сигнала

$$\frac{dv}{d\xi} = \frac{P_v}{m_v}, \quad \frac{dP_v}{d\xi} = -\frac{\partial U}{\partial v}, \quad \frac{d\rho}{d\xi} = \frac{P_\rho}{m_\rho}, \quad \frac{dP_\rho}{d\xi} = -\frac{\partial U}{\partial \rho} + \tilde{F}. \quad (3)$$

Здесь P_v, P_ρ – величины, играющие роль проекций импульса частицы, движущейся в поле U , на соответствующие оси. В данной механической интерпретации величины m_v, m_ρ представляют собой массу частицы при ее движении вдоль осей v и ρ соответственно, $\xi = z/L_d$ – безразмерная координата, L_d – характерная дисперсионная длина, $v = \tau_p/\tau_0$, $\rho = R/R_0$, R_0, τ_0 – начальные значение радиуса сигнала и его длительности. Роль внешней силы, действующей вдоль координаты ρ , играет слагаемое \tilde{F} , связанное с ионизацией. Из (3) получено квазистационарное решение и исследована его устойчивость относительно малых возмущений.

Работа Халяпина В.А. выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ No. 075-02-2023-934.

[1] Келдыш Л.В., *ЖЭТФ*, **50**, 1307-1314, (1996).

[2] Santhanam J., Agraval G., *Opt. Commun. A.*, **222**, 413-420, (2001).

ДИНАМИКА ИМПУЛЬСОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ
С ДИСПЕРСИЕЙ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА

Цой Э.Н.¹, Суюнов Л.А.²

¹Физико-технический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан

²Каршинский государственный университет, Карши, Узбекистан

С помощью вариационного подхода изучено распространение оптических импульсов в волноводах при учете дисперсии второго и четвертого порядков. Получены и проанализированы динамические уравнения на параметры импульсов.

Ключевые слова: оптические солитоны, дисперсия четвертого порядка.

Известно, что в микро-структурированных оптических волноводах и наноструктурах, выбором геометрии можно получить необходимые дисперсионные свойства системы. В частности, можно создать такие структуры, у которых при определенных частотах, дисперсии второго и третьего порядков будут подавлены, и дисперсия четвертого порядка (ДЧП) будет доминировать. Недавно было показано [1], что в средах с ДЧП и керровской нелинейностью могут существовать устойчивые оптические импульсы. Также было показано, что такие импульсы могут существовать в микрорезонаторах [2, 3] и оптоволоконных лазерах. В данной работе исследуется динамика оптических импульсов при совместном влиянии дисперсии второго и четвертого порядков. Уравнение, описывающее распространение импульсов в волноводе имеет вид:

$$i\psi_z - \frac{1}{2}\beta_2 \psi_{\tau\tau} + \frac{1}{24}\beta_4 \psi_{\tau\tau\tau\tau} + \gamma|\psi|^2\psi = 0, \quad (1)$$

где $\psi(\tau, z)$ – огибающая электрического поля; β_2 и β_4 – параметры дисперсии; $\gamma > 0$ – параметр керровской нелинейности; τ – время в движущейся системе координат; z – координата вдоль волновода.

Используя плотность лагранжиана уравнения (1) и пробную функцию, получен усредненный лагранжиан, который зависит от параметров импульса. Вариация усредненного лагранжиана приводит к динамическим уравнениям на параметры импульса. Из этих уравнений найдены параметры стационарных импульсов, которые существуют в системе при $\beta_2 = 0$. Найдены частоты малых колебаний длительности и амплитуды импульсов в случае, когда начальный профиль отличен от стационарного. Также проанализировано влияние квадратичной дисперсии на динамику импульсов. Показано, что динамика зависит от соотношений параметров β_2 и β_4 . Численное моделирование уравнения (1) показывает, что приближенные динамические уравнения хорошо описывают изменение параметров при распространении импульса в волноводе.

Таким образом, в данной работе с помощью вариационного подхода определены параметры стационарного импульса в средах при наличии только дисперсии четвертого порядка. Кроме того, получены динамические уравнения на параметры импульса в случае, когда его форма отлична от стационарной, или при дополнительном воздействии квадратичной дисперсии.

[1] Blanco-Redondo A. et al., *Nature Commun.*, **7**, №1, 10427, (2016).

[2] Taheri H., Matsko A.B., *Opt. Lett.*, **44**, 3086, (2019).

[3] Melchert O., Yulin A., Demircan A., *Opt. Lett.*, **45**, 2764, (2020).

НОВЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ОГИБАЮЩЕЙ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ЗАХАРОВА-ШАБАТА

Медведев С.Б.^{1,2}, Чеховской И.С.², Качулин Д.И.^{2,3}, Васева И.А.^{1,2}, Федорук М.П.^{2,1}

¹Федеральный исследовательский центр институт вычислительных технологий, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

Разработано семейство эффективных схем для численного решения прямой задачи Захарова-Шабата. Схемы имеют удобный вид для «быстрого» вычисления.

Ключевые слова: задача Захарова-Шабата, нелинейное преобразование Фурье, нелинейное уравнение Шредингера.

Нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) широко применяется в области телекоммуникационных приложений и используется для описания распространения импульсов в оптическом волокне. В последнее время исследуются новые подходы к решению НУШ с использованием метода обратной задачи рассеяния (МОЗР) [1], также называемом в литературе нелинейным преобразованием Фурье. Первым этапом в МОЗР является решение прямой задачи рассеяния для системы Захарова-Шабата (ЗШ). На этом этапе определяются нелинейные спектральные данные на основе заданного сигнала $q(t)$. Несмотря на большое количество работ, посвященных численному решению прямой задачи ЗШ, все еще актуальной остается проблема разработки методов повышенной точности. Высокая точность является важным фактором в задачах, где требуется анализировать сложные сигналы. Для правильного описания таких сложных сигналов и их спектральных параметров требуются более точные и быстрые численные методы.

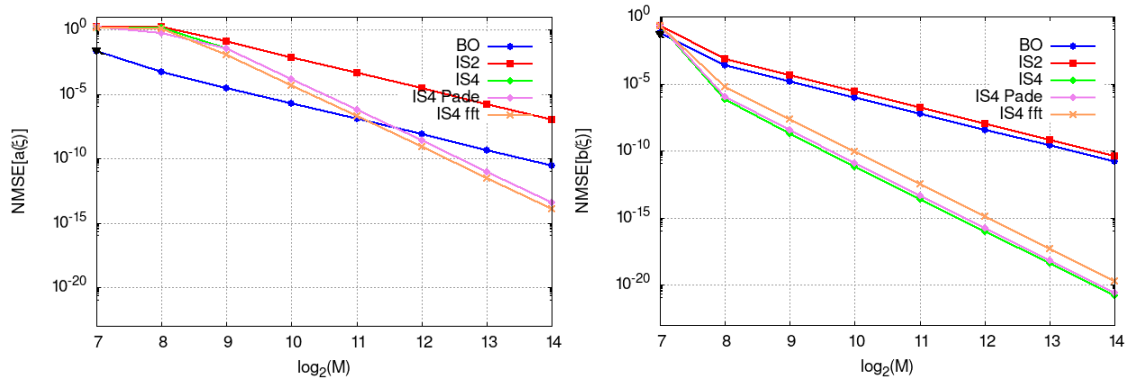


Рисунок. Среднеквадратичная погрешность вычисления спектральных данных в зависимости от числа точек M , в которых задан исходный сигнал $q(t) = A[\operatorname{sech}(t)]^{1+iC}$ при $A = 5.2$, $C = 4$

В работе предлагается семейство новых схем численного решения системы ЗШ:

$$\mathbf{v}_t = (S + U(t))\mathbf{v}, S = \begin{pmatrix} -i\xi & 0 \\ 0 & i\xi \end{pmatrix}, U = \begin{pmatrix} 0 & q(t) \\ r(t) & 0 \end{pmatrix}.$$

Здесь S – постоянная матрица, которая исключается заменой $\mathbf{v} = e^{tS}\bar{\mathbf{v}}$. В результате для системы

$$\bar{\mathbf{v}}_t = \bar{U}(t)\bar{\mathbf{v}}, \bar{U}(t) = e^{-tS}U(t)e^{tS}.$$

схема, например, 2-го порядка записывается в терминах огибающих как

$$T_n = X^{1/2}e^{hU_n}X^{1/2}, X = \begin{pmatrix} z^{-1} & 0 \\ 0 & z \end{pmatrix}.$$

Аналогично выписывается схема 4-го порядка. Данные схемы имеют удобный вид для «быстрого» вычисления, т.е. $O(n(\log n)^2)$ вместо $O(n^2)$ [2], поскольку спектральный параметр входит через экспоненту: $z = e^{ih\xi}$. Это позволяет записать передаточную матрицу на каждом шаге в виде полинома от z и использовать алгоритмы быстрого перемножения полиномов для вычисления итогового решения.

В работе исследуются точность и эффективность предложенных схем (рисунок). Реализованы различные варианты предложенных схем, использующие, как прямое вычисление матричной экспоненты, так и аппроксимацию Паде. Также исследуется возможность использования быстрого преобразования Фурье (БПФ) для вычисления использующихся в записи схем производных от начального сигнала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания на проведение фундаментальных исследований FSUS-2020-0034 (М.С.Б., В.И.А. – теоретические исследования, Ф.М.П. – постановка задачи). Работа Ч.И.С. и К.Д.И. (численные исследования) выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант No.17-72-30006).

[1] Zakharov V.E., Shabat A.B., *JETP*, **34**, 62-69, (1972).

[2] Wahls S. and Poor H.V., *2013 ICASSP*, Vancouver, BC, Canada, 5780-5784, (2013).

**АНАЛИЗ ЗАЩИЩЕННОСТИ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ
ФАНТОМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И МЕТОДА МНОЖЕСТВЕННОГО
ДОСТУПА С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ**

**Мочалов М.А., Старцева А.М., Шумигай В.С.,
Опарин Е.Н., Исмагилов А.О., Цыпкин А.Н.**

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлен анализ защищенности системы передачи данных на основе фантомной визуализации и метода множественного доступа с кодовым разделением. По результатам численного моделирования было показано, что данная оптическая система передачи данных устойчива к атаке зашифрованным текстом и дифференциальной атаке.

Ключевые слова: фантомная визуализация, защищённость передачи данных, метод множественного доступа с кодовым разделением.

Фантомная визуализация (ФВ) – итеративная методика получения изображений, основанная на пространственной корреляции пучков света. В рамках данной методики объект наблюдения освещается набором заданных оптических полей, формирование которых обеспечивается пространственным модулятором света. Информация об объекте извлекается из корреляционной функции, для расчета которой используется набор оптических полей и интегральных интенсивностей излучения, прошедших через объект. В свою очередь метод множественного доступа с кодовым разделением (МДКР) – метод передачи данных для нескольких пользователей, при использовании которого каждому получателю ставится в соответствие индивидуальная кодирующая последовательность (секретный ключ). При этом вся информация передается по одному каналу связи в виде закодированного текста, а идентификация данных осуществляется путем наложения секретного ключа на закодированный текст каждым пользователем.

Оптическая система передачи изображений на основе ФВ и метода МДКР [1] состоит из блока отправителя, содержащего блок кодирования векторов интегральных интенсивностей с помощью секретных ключей и блок генерации заданных оптических полей, а также из блока получателя, содержащего камеру и блок декодирования информации. Исходная информация для каждого пользователя представляет собой область на плоскости объединенного изображения. Передача заданных оптических полей происходит по оптическому каналу, который является открытым каналом связи, а канал с закрытой передачей информации используется только один раз для получения пользователями индивидуальных кодирующих последовательностей, используемых для дешифрования закодированного вектора интегральных интенсивностей и получения информации о координатах областей на плоскости объединенного изображения. Важно отметить, что преимуществом такой системы относительно аналогов [2, 3] является тот факт, что для ее работы нет необходимости передавать большое количество оптических полей через закрытый канал связи. При этом введение дополнительного этапа кодирования координат областей в плоскости оптических полей позволяет сохранить защищенность процесса передачи оптических изображений, при этом уменьшив нагрузку на канал с закрытой передачей информации.

Для анализа безопасности данной системы было проведено численное моделирование основных атак на каналы связи, по которым передаются данные. Одной из самых распространенных атак является атака зашифрованным текстом, а именно закодированным вектором интегральной интенсивности. Этот тип атак сводится к тому, что злоумышленник вычисляет секретный ключ из зашифрованного текста с помощью алгоритмов обработки данных. Данная атака не нарушает безопасность процесса передачи данных ввиду того, что зашифрованный текст, представленный закодированным вектором интегральных интенсивностей, не несет информацию об исходной информации. Далее рассмотрена дифференциальная атака, при которой злоумышленник, зная зашифрованную информацию и его исходный текст, подбирает секретный ключ для декодирования информации. Для того, чтобы процессе передачи данных был устойчив к данной атаке, следует на каждом акте кодирования нового изображения менять секретные ключи. Таким образом, будут меняться положения объектов на плоскости объединенного изображения, тогда при декодировании злоумышленник не сможет вычислить алгоритм шифрования. Устойчивость системы к данной атаке подтверждается результатами моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт № 2019-0903).

[1] Лейбов Л.С., Цыпкин А.Н., *XI Конгресс молодых учёных*, 237-240, (2022).

[2] Kang Y., Zhang L., Ye H., Zhao M., Kanwal S., Bai C., Zhang D., *Photonics Research*, **7**, 12, 1370-1380., (2019).

[3] Yi K., Leihong Z., Hualong Y., Mantong Z., Kanwal S., Dawei Z., *Optics and Lasers in Engineering*, **134**, 106154, (2020).

**КЛАССИЧЕСКАЯ ФАНТОМНАЯ ПОЛИМЕТРИЯ С
ПРОСТРАНСТВЕННЫМ МОДУЛЯТОРОМ СВЕТА**

Морева П.Е., Шумигай В.С., Альхалил Д., Наседкин Б.А., Цыпкин А.Н.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе предложена схема классической фантомной полиметрии с использованием пространственного модулятора света для создания спекл-структур. Введение модулятора позволяет избавиться от необходимости использования плеча с ПЗС камерой, а также свободно контролировать характеристики спекл-структур в плоскости объекта.

Ключевые слова: фантомная полиметрия, пространственный модулятор света, спекл-структура.

В настоящее время устройства, основанные на методике фантомной визуализации (ФВ), активно применяются в различных областях науки и техники [1]. Идеи, заложенные в основу фантомных измерений, были успешно применены для решения ряда прикладных задач. Так, например, для определения поляризационных свойств объектов ранее была предложена фантомная полиметрия (ФП) [2, 3]. В рамках данной методики лазерное излучение разделяется по поляризации на два пучка, каждый из которых взаимодействует со своим вращающимся диффузором, в результате чего в плоскости объекта формируется две спекл-структуры с ортогональными поляризациями. При этом каждая из спекл-структур детектируется в дополнительном канале на ПЗС камеру, а излучение, прошедшее через объект, регистрируется в основном канале на однопиксельный интегрирующий детектор. Данный алгоритм повторяется заданное количество раз, после чего вычисляются две корреляционные функции интенсивностей для спекл-структур с ортогональными поляризациями. После анализа двух корреляционных функций становится возможным оценить поляризационные свойства объекта, в том числе азимут и величину анизотропии.

Однако в существующих схемах нет возможности контролировать характеристики используемых спекл-структур, а также остается необходимым использовать детектор с пространственным разрешением для детектирования спекл-структур в плоскости объекта. Для решения аналогичной проблемы в ФВ ранее была предложена модификация методики – вычислительная ФВ [4], где плечо с ПЗС камерой было заменено на пространственный модулятор света (SLM). Насколько известно авторам данной работы, техническая реализация соответствующего перехода в ФП ранее не была осуществлена. В соответствии с этим в настоящей работе предлагается модификация существующей системы классической ФП, схема которой представлена на рисунке. Суть данной модификации состоит в использовании SLM для модуляции лазерного излучения и создания в плоскости объекта заданных спекл-структур. При этом формирование спекл-структур в двух поляризационных каналах обеспечивается разными областями SLM. Такая техническая особенность необходима, чтобы спекл-структуры с ортогональными поляризациями были независимы друг от друга, что является необходимым условием для фантомных измерений.

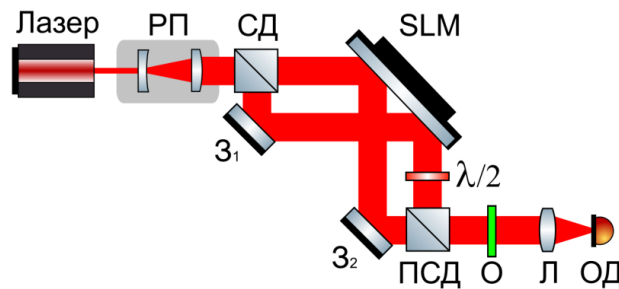


Рисунок. Схема экспериментальной установки фантомной полиметрии с пространственным модулятором света (SLM). РП – расширитель пучка, СД – светоделитель 50/50, З_{1,2} – зеркала, ПСД – поляризационный светоделитель, λ/2 – полуволновая пластинка, О – объект, Л – линза, ОД – однопиксельный детектор

Важно отметить, что SLM производит модуляцию излучения только с горизонтальной поляризацией. В связи с этим с разными областями SLM взаимодействует излучение заданной поляризации, однако в одном из каналов после модулятора излучение проходит через полуволновую пластину, которая поворачивает плоскость поляризации излучения на 90 градусов. Таким образом, в плоскости объекта формируется две заданные спекл-структуры с ортогональными поляризациями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт № 2019-0903).

- [1] Gong W. et al., *Scientific reports*, **6**, №1, 26133, (2016).
- [2] Chirkin A.S. et al., *Laser Physics Letters*, **15**, №11, 115404, (2018).
- [3] Magnitskiy S.A., Agapov D.P., Chirkin A.S., *Optics Letters*, **45**, №13, 3641-3644, (2020).
- [4] Shapiro J.H., *Physical Review A*, **78**, №6, 061802, (2008).

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ P-I-N-ДИОДАХ $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ

Фань С.^{1,2}, Малевич В.Л.^{3,4}, Мустафин И.А.¹, Калиновский В.С.¹, Контрош Е.В.¹, Прудченко К.К.¹, Толкачев И.А.¹, Трухин В.Н.^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²НИУ ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь,

⁴Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

Исследован процесс ТГц генерации в p-i-n диодах $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ при возбуждении фемтосекундными оптическими импульсами, обусловленного ускорением электронов в электрическом поле до скорости более 10^7 см/сек и последующим замедлением, вследствие междолинных переходов электронов.

Ключевые слова: гетероструктурный pin-диод, терагерцовое излучение, эффект «velocity overshoot».

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса генерации терагерцового излучения в гетероструктурных p-i-n-диодах $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ при возбуждении фемтосекундными оптическими импульсами. Было показано, что максимальная амплитуда ТГц импульса резко растет при росте величины обратного смещения на диоде, причем начало этого роста зависит от энергии кванта возбуждения. Соответственно, временное положение ТГц импульса также меняется при изменении величины обратного смещения на p-i-n-диоде $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$, причем при изменении величины смещения от положительных значений до значения напряжения на диоде, при котором начинается резкий рост амплитуды импульса, происходит запаздывание ТГц импульса. При дальнейшем увеличении обратного смещения на p-i-n диоде происходит обратный сдвиг (уменьшение задержки) ТГц импульса на временной шкале (рисунок). Выполненное методом Монте-Карло моделирование процесса ТГц генерации в p-i-n-диоде $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ при учете баллистического движения неравновесных носителей с последующим возможным набором средней скорости, намного превышающей значения 10^7 см/сек, подтвердило экспериментальные результаты. При высоких уровнях возбуждения амплитуда ТГц импульсов значительно изменяется при различных обратных смещениях на гетероструктурном p-i-n диоде и сложным образом зависит от уровня возбуждения, что обусловлено перераспределением потенциала на внутреннем сопротивлении и в обедненной области.

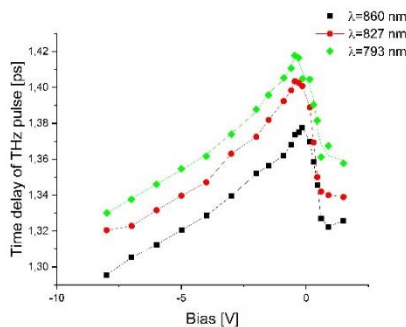


Рисунок. Зависимость временной задержки ТГц импульса от приложенного смещения

Таким образом, в результате экспериментальных исследований было определено, что механизм генерации электромагнитного излучения связан с баллистическим движением электронов: ускорением в электрическом поле до скорости, значительно превышающей скорость насыщения на временах сотен фемтосекунд («velocity overshoot»), и последующего резкого спада, связанного с междолинным переходом электронов из Г-долины в L-долину. Показано, что эффективность ТГц генерации в p-i-n-диоде $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ на порядок выше по сравнению с эффективностью ТГц генерации в объемном полупроводнике p-InAs, являющимся сегодня наиболее эффективным когерентным терагерцовым эмиттером [1].

[1] Adomavicius R., Urbanowicz A., Molis G., Krotkus A., Šatkovskis E., *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 2463, (2004).

**НАРУШЕНИЕ ПРИНЦИПА ВЗАИМНОСТИ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ СРЕДАХ
ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО НАГРЕВА**

Левковская В.М., Харитонов А.В., Харинцев С.С.

Институт физики, Казанский федеральный университет, Казань, Россия

В работе предложен метод нарушения принципа взаимности на основе модуляции диэлектрической проницаемости среды во времени. Метод основан на эффекте преобразования частоты света при взаимодействии с нестационарной средой. Характерная длительность переключения должна быть на порядок меньше периода колебаний волны. При наличии оптических потерь в нестационарной среде можно добиться отклонения от закона Кирхгофа. Это позволяет увеличить эффективность фотонагрева за счет уменьшения скорости оттока тепла через механизм теплового излучения.

Ключевые слова: принцип взаимности, закон Кирхгофа, нестационарные среды.

Принцип взаимности накладывает фундаментальные ограничения на распространение электромагнитных волн. Согласно ему, распространение света в системе не будет видоизменяться, если поменять местами источник и приемник. Разработка физических механизмов, позволяющих нарушить принцип взаимности, играет ключевую роль в развитии таких технологий, как сверхплотная передача информации, радиационное охлаждение, беспроводная передача энергии и др. Настоящая работа посвящена разработке наноструктур с невзаимным откликом для приложений в термофотонике.

В последние годы были достигнуты значительные успехи в создании резонансных наноструктур, с помощью которых можно реализовать идеальное поглощение света в широком спектральном диапазоне. Тем не менее, даже при таких условиях температура фотонагрева может оставаться незначительной. Это связано с оттоком тепла через механизмы теплопроводности и теплового излучения. Для того, чтобы ограничить первый канал потерь, необходимо уменьшить коэффициент температуропроводности, что достигается путем выбора материала или наноструктурирования подложки [1]. В случае же теплового излучения возникает принципиальная сложность. Согласно закону Кирхгофа, поглощательная и испускательная способности тела равны, вне зависимости от материала и формы. Если объект хорошо поглощает энергию, то он также хорошо будет ее терять из-за теплового излучения. Закон Кирхгофа является прямым следствием принципа взаимности. Его нарушение позволит увеличить эффективность фотонагрева. Один из известных способов нарушить взаимность основан на использовании магнитооптических сред. Однако их внедрение в компактные оптические устройства ограничено, так как требуются сильные постоянные магнитные поля и/или протяженные среды. Существует растущая потребность в создании новых физических механизмов нарушения принципа взаимности.

Для этих целей в настоящей работе предлагается использование нестационарных сред [2]. Под нестационарностью понимается быстрое изменение одного из параметров среды во времени, например, показателя преломления. Недавно данный класс искусственных материалов вызвал большой фундаментальный и практический интерес, что связано с обнаружением ряда экзотических эффектов [2]. В работе показано, что при отражении света от нестационарной среды, можно добиться нарушения принципа взаимности. В основе разработанного принципа лежит эффект изменения частоты света при взаимодействии с нестационарной средой. Известно, что при отражении от границы раздела двух сред тангенциальная и нормальная компоненты волнового вектора остаются непрерывными. В случае, когда вторая среда является нестационарной, нормальная компонента волнового вектора терпит разрыв. Это связано с тем, что при изменении частоты также изменяется модуль волнового вектора, тогда как тангенциальная компонента остается неизменной в силу граничных условий. По этой причине происходит изменение направления волнового вектора отраженной волны. Важно, что приращение частоты будет всегда иметь одинаковый знак. Если поменять местами источник с приемником, т.е. обратить отраженный луч, то траектория распространения будет отличаться от первоначальной, что говорит о невзаимном отклике. С помощью методов численного моделирования в работе исследовано влияние параметров модуляции диэлектрической проницаемости на эффективность конверсии и величину сдвига частоты. Установлено, что характерная длительность переключения должна быть на порядок меньше периода колебаний волны. Для нарушения закона Кирхгофа необходимо, чтобы в среде также было поглощение. Это приводит к тому, что модуляцию будет неминуемо испытывать как действительная, так и мнимая часть диэлектрической проницаемости. Для этого в работе рассматривалась модель среды с лоренцевской дисперсией с зависящими от времени параметрами.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

[1] Kharintsev S.S., Kharitonov A.V., Chernykh E.A., Alekseev A.M., Filippov N.A., & Kazarian S.G., *Nanoscale*, **14**, №33, 12117-12128, (2022).

[2] Galiffi E., Tirole R., Yin S., Li H., Vezzoli S., Huidobro P.A., Pendry J.B., *Adv. Photonics*, **4**, №1, 014002-014002, (2022).

КВАНТОВАЯ ОПТИКА И КОММУНИКАЦИИ

**ИНТЕГРАЦИЯ ПРОТОКОЛОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КВАНТОВЫХ КЛЮЧЕЙ,
НЕ ЗАВИСЯЩИХ ОТ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ, В
ИНФРАСТРУКТУРУ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ**

Воронцова И.О.¹, Гончаров Р.К.^{1,2}, Тупяков Д.В.¹, Киселев Ф.Д.^{1,2}

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²СМАРТС-Кванттелеком, Санкт-Петербург, Россия

В работе методами численного моделирования проведено теоретическое исследование влияния шумов, вызванных спонтанным комбинационным рассеянием, четырехволновым смешением и линейными перекрестными помехами в канале на производительность систем квантового распределения ключей, не зависящих от измерительных устройств для различных практических схем реализации в рассмотрении случаев протокола для дискретных и непрерывных переменных. Анализ учитывает симметричность и асимметричность плеч системы, а также возможные схемы распределения каналов на стандартной DWDM сетке для квантового канала, расположенного в С- и О-диапазонах.

Ключевые слова: квантовые коммуникации, квантовое распределение ключей, независимость от измерительных устройств, мультиплексирование, оптические транспортные сети.

Технологии квантового распределения ключей (КРК) делают возможным рассылать криптографически стойкий ключ между двумя и большим количеством аутентифицированных пользователей, соединенных между собой квантовым и информационными каналами. В условиях постоянно растущего трафика и необходимости поиска практически удобного и экономически выгодного способа реализации квантового канала оптимальным по многим признакам оказывается одновременное распространение квантового и информационных каналов в одном оптическом волокне с применением технологий плотного мультиплексирования с разделением по длине волны – DWDM. Классифицировать КРК можно в соответствии с различными комбинируемыми критериями: протокол КРК может быть односторонним или двусторонним [1] дискретно-переменным (ДП) или непрерывно-переменным (НП) [2] зависящим от устройства или (полу)независимым от устройства [3] и др.. В данном исследовании рассмотрение ведется для случая ДП и НП протоколов КРК, не зависящих от измерительных устройств (от англ. measurement-device-independent – MDI). Парадигма независимости от устройств представляет особый интерес сама по себе, поскольку она значительно снижает риск подверженности системы ко многим атакам по сторонним каналам. Однако реализация и теоретический анализ таких протоколов и схем требует отдельного подробного рассмотрения.

В работе в контексте таких протоколов впервые решается известная проблема одновременного распространения классических и квантовых сигналов в одном волокне [4], которая оказывается актуальной для вопроса о внедрении технологии КРК в существующую телекоммуникационную инфраструктуру. В качестве источников канальных шумов рассматриваются эффекты спонтанного комбинационного рассеяния (СКР), четырехволнового смешения (ЧВС) и линейных перекрестных помех (ЛПП) каналов для протоколов MDI–КРКДП и MDI–КРКНП. В работе обсуждаются принципы оптимального выделения расположения квантового и классических каналов в соответствии с логикой сетей DWDM. Анализ проводится в соответствии с известными теоретическими границами стойкости и выражается в численной оценке производительности потенциальных практических реализаций систем MDI–КРК. Как итог, показывается существенная разница между протоколами КРКНП и КРКДП как самими по себе, так и при их реализации в телекоммуникационных сетях. Данные результаты помогают определить реальные условия (топологию сети, ее масштабируемость, скорость передачи информации), при которых рассматриваемые системы показывают наилучшую производительность. Полученные численные оценки позволят корректно осуществлять выбор конкретного протокола для потенциальной интеграции КРК в существующую телекоммуникационную инфраструктуру в зависимости от необходимых клиентских потребностей, ограничений сети, размера области обслуживания, требований к стойкости. Эти знания помогут корректно анализировать потенциальные квантовые сети в контексте их реальной имплементации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта «Разработка методов совместной передачи квантовых и информационных каналов в одном оптическом волокне» № 221068.

[1] Pirandola S., Braunstein S.L., Lloyd S., *Physical Review Letters*, **11**, №101 (20), 200504, (2008).

[2] Grosshans F., Van Assche G., Wenger J., Brouri R., Cerf N.J., & Grangier P., *Nature*, **1**, №421 (6920), 238-341, (2003).

[3] Lo H.K., Curty M., Qi B., *Physical Review Letters*, **3**, №108 (13), 130503, (2012).

[4] Mlejnek M., Kaliteevskiy N., Nolan D., *arXiv preprint arXiv:1712.05891*, (2017).

**КОНТРОЛЬ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО
АМПЛИТУДНОГО МОДУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ КВАНТОВОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА НА НЕПРЕРЫВНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ**
Геллерт М.Е., Наседкин Б.А., Филипов И.М., Чистяков В.В., Самсонов Э.О.
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В данной работе реализуется устройство контроля рабочей точки волоконно-оптического амплитудного модулятора. Также в данной работе экспериментально оценивается шум, вносимый контроллером в систему квантового распределения ключа на непрерывных переменных.

Ключевые слова: волоконно-оптический амплитудный модулятор, дрейф рабочей точки, квантовое распределение ключа.

Электрооптический амплитудный модулятор на базе интерферометра Маха-Цендера является важной частью большого количества различных оптических систем. Данный электрооптический элемент можно часто встретить в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС), а также в системах квантового распределения ключей. Однако на данный момент большинство электрооптических амплитудных модуляторов имеют большой недостаток, связанный высокой подверженностью разнообразным дрейфовым явлениям [1]. С течением времени дрейф рабочей точки проявляется, как изменение напряжения необходимое для достижения определенного уровня пропускания электрооптического модулятора. Одними из основных причин возникновения данного явления чувствительность модулятора к изменениям температуры и старение модулятора [2].

Именно поэтому целью данной работы стала разработка устройства контроля амплитудного модулятора на базе интерферометра Маха-Цендера. Данное устройство позволяет избавиться от негативного эффекта дрейфовых явлений, тем самым позволив реализовать наиболее корректную работу амплитудного модулятора. Основной принцип работы данного устройства базируется на непрерывном мониторинге части излучения прошедшего через модулятор и коррекции подаваемого на модулятор напряжения на основе проводимых измерений. Также стоит отметить тот факт, что, несмотря на коррекцию работы амплитудного модулятора, работа контроллера приводит к флуктуациям модулируемого оптического излучения. Данные флуктуации вызваны непрерывной подстройкой напряжения рабочей точки. В рамках данной работы рассматривалось несколько различных конфигураций контроллеров амплитудных модуляторов. Была проведена оценка работы каждого из них. Оценка работы устройства стабилизации амплитудного модулятора проводилась как для случая поддержания максимального пропускания модулятора, так и для случая поддержания различных модуляций. С целью демонстрации работоспособности предлагаемого устройства с различными модуляторами в данной работе исследования проводились на нескольких амплитудных модуляторах, имеющих различного производителя и характеристики.

Поскольку амплитудные модуляторы является важной частью системы квантового распределения ключа на непрерывных переменных [3, 4], было также решено в рамках данной работы провести оценку шума вносимого устройством контроля амплитудного модулятора в систему квантового распределения ключа на непрерывных переменных.

[1] Афанасьев В.М., Пономарев Р.С., *Прикладная фотоника*, **4**, №4, 245, (2017).

[2] Li Y., Zhang Y., Huang Y., *IEEE photonics technology letters*, **25**, №24, 2412-2415, (2013).

[3] Diamanti E., Leverrier A., *Entropy*, **17**, №9, 6072-6092, (2015).

[4] Jouguet P. et al., *Nature photonics*, **7**, №5, 378-381, (2013).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К РАЗРАБОТКЕ И ПРИМЕНЕНИЮ
КВАНТОВОГО ПОВТОРИТЕЛЯ В КОНТЕКСТЕ
ПОСТРОЕНИЯ КВАНТОВОЙ СЕТИ

Гончаров Р.К.^{1,2}, Воронцова И.О.¹, Туляков Д.В.¹, Киселев А.Д.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²СМАРТС-Кванттелеком, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассматривается схема квантового повторителя, в которой используются запутанные многомодовые когерентные состояния, полученные путем электрооптической модуляции симметричных и антисимметричных состояний кота Шредингера. Рассмотрены эффекты декогеренции в квантовом канале и их влияние на статистику фотоотсчетов. Задача решается в аналитической и численной формах.

Ключевые слова: квантовые коммуникации, квантовый повторитель, квантовая память, квантовые сети, топология сети, архитектура сети.

Распределение квантовых состояний на большие расстояния имеет важное значение для практических применений в сфере квантовых технологий, таких как, в частности, квантовое распределение ключа на большие расстояния и построение квантовых сетей. Особенно актуальным данный вопрос становится в контексте создания и широкого внедрения технологий квантового интернета и систем квантового интернета вещей, в которых значительно возрастает число подключенных абонентских устройств, которые в общем случае могут быть подвижными и большую часть времени находиться на значительном удалении от узлов квантовых сетей. На практике квантовые каналы подвержены потерям и воздействию эффектов декогеренции, вследствие чего возникает ограничение характерных расстояний, на которые информация может быть передана напрямую. На практике самой острой насущной проблемой являются оптические потери. В классической телекоммуникации данная проблема решается за счет использования оптических усилителей, что неприменимо в случае квантовых коммуникаций из-за теоремы о запрете клонирования. Однако проблема может быть решена с помощью более сложного метода — путем применения квантовых повторителей [1, 2]. Идея квантового повторителя часто подразумевает использование явления квантовой запутанности (создание запутанности между двумя удаленными системами), а именно распределение запутанности, а также квантовой телепортации. Большое внимание уделяется теоретическому изучению и экспериментальной реализации квантовых повторителей. К 2023 году уже были предложены теоретические модели квантовых ретрансляционных систем, основанных на различных физических принципах (например, на основе захваченных ионов, или даже полностью фотонных систем) [3].

В работе рассматриваются как аналитические, так и численные подходы. Проводится теоретический анализ функционирования системы элементарного звена квантового повторителя путем расчета его характеристик производительности. А именно, оценивается вероятность щелчка фотодетектора и точность воспроизведения для различных наборов параметров декогеренции. Эти оценки необходимы в контексте дальнейших экспериментальных исследований на стыке с другими ветвями квантовых коммуникаций, чтобы использовать распределение запутанности при работе протоколов квантовой телепортации и квантового распределения ключа, основанных на запутанности. Модель будет развиваться как универсальное программное обеспечение, имитирующее полноценную работу протокола замены запутанности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов «Фундаментальные и прикладные вопросы фотоники» № 621317 (Воронцова И.О., Туляков Д.В.) и «Программное обеспечение для решения задач оптимизации систем квантовой криптографии» (Гончаров Р.К.) № 622287 Университета ИТМО, а также при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт № 2019-0903) (Киселев А.Д.).

[1] Duan L.M., Lukin M.D., Cirac J.I., Zoller P., *Nature*, **414**, №6862, 413-418, (2001).

[2] Sangouard N., Simon C., De Riedmatten H., Gisin N., *Rev. Mod. Phys.*, **83**, №1, 33, (2011).

[3] Azuma K., Economou S.E., Elkouss D., Hilaire P., Jiang L., Lo H.K., Tzitrin I., *arXiv preprint arXiv:2212.10820*, (2022).

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЙ - ЛОВУШЕК В ПРОТОКОЛАХ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ НА ОСНОВЕ МОДУЛЯЦИИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

Алфёров С.В.¹, Демкин К.В.¹, Сущев И.С.²

¹АО Инфотекс, Москва, Россия

²ООО "СФБ Лаб", Москва, Россия

В данной работе предложен способ формирования состояний - ловушек в протоколах квантового распределения ключей на основе модуляции длительности лазерного импульса.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, состояния-ловушки, PNS-атака.

В большинстве современных систем квантового распределения ключей (КРК) в качестве квантовых состояний используются сильно ослабленные лазерные импульсы [1]. Такой подход, с одной стороны, прост и недорог в реализации, но с другой несет уязвимость. Дело в том, что квантовые состояния, полученные с помощью ослабления, имеют пуассоновскую статистику распределения по числу фотонов. Соответственно, в некоторых квантовых состояниях содержатся два и более фотона. Неоднотонность источника дает злоумышленнику (Еве) возможность провести атаку с расщеплением по числу фотонов (PNS-attack) [2]. Для противодействия этой атаке применяют decoy-state метод [3], суть которого заключается в использовании состояний-ловушек. То есть, помимо информационных состояний со средним числом фотонов μ , передающая сторона (Алиса) готовит состояния со средним числом фотонов ν , при этом тип состояния выбирается случайным образом. Реализовать decoy-state метод можно с помощью внешнего модулятора интенсивности. Как правило, модулятор собран на основе интерферометра Маха-Цандера, поэтому для стабилизации выходной мощности необходимо контролировать дрейф рабочей точки [4]. Помимо этого, к недостаткам такого подхода можно отнести большую стоимость модулятора интенсивности.

В настоящей работе мы предлагаем способ формирования состояний ловушек с помощью модуляции длительности лазерного импульса. Известно, что энергия оптического импульса (суть среднее число фотонов) зависит от его амплитуды и длительности. Меняя амплитуду с помощью модулятора интенсивности, либо меняя длительность импульса, мы достигаем одинакового результата: изменяем среднее число фотонов в импульсе. Для осуществления способа сначала задается число k – требуемое соотношение среднего числа фотонов в информационных импульсах и состояниях ловушек. Далее с помощью измерителя мощности, либо с помощью осциллографа, определяется длительности информационного состояния t_μ и состояния-ловушки t_ν , которые обеспечивают требуемое соотношение.

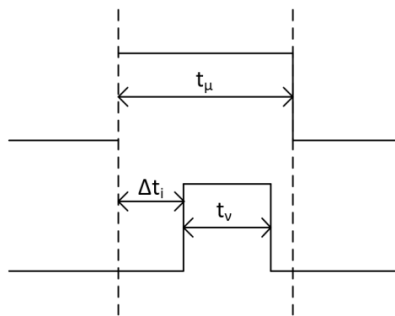


Рисунок. Временная диаграмма оптических импульсов

На рисунке отображена диаграмма, показывающая взаимное расположение информационного импульса и состояния-ловушки во времени. Важным аспектом является невозможность злоумышленника отличить информационные состояния и состояния –ловушки. Для этого, положение состояния-ловушки меняется случайным образом внутри временного отрезка, соответствующего длительности информационного состояния, на величину $\Delta t_i = \frac{i \cdot (t_\mu - t_\nu)}{N}$, где i – случайное целое число из промежутка $[0, N]$, а N – верхняя граница промежутка, задаваемая пользователем.

Таким образом, предложен способ формирования состояний - ловушек в протоколах квантового распределения ключей на основе модуляции длительности лазерного импульса. Указанный подход позволяет избавиться от необходимости использования внешнего модулятора интенсивности.

[1] Молотков С.Н., *Письма в ЖЭТФ*, **79**, №11, 691-704, (2004).

[2] Dušek M., Haderka O., Hendrych M., *Optics Communications*, **169**, 103-108, (1999).

[3] Hoi-Kwong Lo, Xiongfeng Ma, Kai Chen, *Phys.Rev. Lett.*, **94**, 230504, (2005).

[4] Афанасьев В.М., Пономарев Р.С., *Прикладная фотоника*, **4**, №4, (2017).

**СИНХРОНИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ
КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА**

Жуковский Д.Д., Миронов Ю.Б., Тимошенко А.С.

МТУСИ, Москва, Россия

Продемонстрирована возможность синхронизации времени устройств на основе использования технологии квантового распределения ключей. Представлены результаты исследования временных задержек передачи сигналов точного времени при использовании различных протоколов схем подключения оборудования.

Ключевые слова: синхронизация, квантовое распределение ключей, квантовая сеть.

Синхронизация времени важная часть работы критически важных систем, таких как телекоммуникации, финансовый сектор, энергетика, интернет вещей, беспроводные сети 5G, оборудование мониторинга. Все эти сферы зависят от синхронизации времени, и атака на них может нанести непоправимый ущерб [1]. В банковском секторе злоумышленник может получить выгоду в 2-3 секунды и биржа понесет репутационные убытки, что приведет к денежным убыткам, в энергетическом секторе в случае рассинхронизации оборудования мониторинга и предохранительного оборудования в случае нештатной ситуации вывести из строя всю подстанцию. Традиционные методы синхронизации времени, такие как использование протоколов NTP или PTP, могут быть уязвимы к атакам, таким как атаки типа man-in-the-middle, атаки перебора паролей и другие. Технология квантового распределение ключей (КРК) может обеспечить более высокий уровень безопасности, защищая процесс синхронизации времени от подобных атак. В КРК используется принцип квантовой механики, позволяющий передавать ключи для шифрования с использованием квантовых состояний. Ключи шифрования формируются путем измерения состояний квантовых систем, например, фотонов [2]. КРК позволяет генерировать и распределять ключи шифрования между устройствами, обеспечивая высокий уровень безопасности синхронизации времени [1].

Таким образом, с помощью квантового распределения ключей можно создать безопасный канал связи для передачи общих ключей, которые используются для шифрования и аутентификации сообщений в протоколах синхронизации времени. Квантовое распределение ключей позволяет обеспечить надежность и безопасность синхронизации времени между устройствами и предотвратить атаки, связанные с перехватом и подменой сообщений. В работе рассмотрены несколько моделей угроз, которые могут повлиять на синхронизацию времени:

Атака на протокол синхронизации времени (Time Synchronization Protocol Attack) - в данной атаке злоумышленник пытается нарушить синхронизацию времени между устройствами путем отправки ложных пакетов данных, что может привести к сбоям в работе сети [3].

Атака "человек посередине" (Man-in-the-Middle Attack) - злоумышленник перехватывает трафик между устройствами и подменяет данные, которые передаются между ними, что может привести к несоответствию времени между устройствами.

Смена времени (Unauthorized Time Change) - злоумышленник изменяет время на одном или нескольких устройствах, что может привести к несоответствию времени между устройствами [4].

На основе открытой межвузовской сети МТУСИ-МИСиС [5] был создан экспериментальный стенд, на котором отработывались варианты синхронизации времени между компьютерами серверами, подключенными к разным узлам квантовой сети. Представлены результаты исследований задержек времени передачи пакетов при использовании разных протоколов синхронизации времени. Показано, что применение технологии КРК для передачи сигналов точного времени обеспечивает не только высокую защищенность передачи данных, но и дает значительный выигрыш по скорости и точности и синхронизации времени между узлами сети.

[1] Льюис А.М., *Безопасная инфраструктура квантовых коммуникаций для Европы: техническая основа для видения политики*, 34-34, (2022).

[2] Быковский А.Ю., Компанец И.Н., *Квантовая криптография и комбинированные схемы коммуникационных сетей на ее основе*, *Квантовая электроника*, №9, 777-801, (2018).

[3] Чан Т.З., Ха Т.К., *Защита NTP-серверов от DDOS-атак*, *Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине*, 204-205, (2014).

[4] Колосок И.Н., Коркина Е.С., *Анализ кибербезопасности цифровой подстанции на основе дерева атак*, №2, 40-42, (2018).

[5] Панков К.Н., Миронов Ю.Б., *Применение квантовых методов защиты информации*, *Горячая линия телеком*, №1, 17-18, (2022).

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУОПРЕДЕЛЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ

Иванков Н.А.¹, Зиновьев А.В.¹, Гончаров Р.К.^{1,2}

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²ООО «СМАРТС-Кванттелеком», Санкт-Петербург, Россия

В работе продемонстрировано, что при помощи полуопределённого программирования возможно провести оценку нижней границы скорости генерации секретного ключа для протокола КРКНП с дискретной модуляцией, а также произвести оптимизацию параметров системы.

Ключевые слова: полуопределённое программирование, квантовое распределение ключей.

Квантовая криптография, также известная как КРК, представляет собой метод передачи безопасной криптографической информации, который использует квантовые явления. Она обеспечивает защиту коммуникации между двумя или более доверенными сторонами, которые соединены через открытый классический канал связи. Любая система КРК требует теоретического обоснования криптографической стойкости. Необходимо, используя методы квантовой теории информации и теории кодирования, доказать невозможность взлома такой системы даже квантовым компьютером. К сожалению, для анализа различных систем не существует единого аналитического подхода. Более того, для многих систем, в том числе для простых в реализации, даже частной аналитической оценки не может быть представлено вовсе. В связи с этим, разрабатываются численные подходы, и наибольшей популярностью пользуется подход с использованием полуопределённого программирования, одной из важных черт, которого является универсальность.

В работе проблема скорости секретного ключа формулируется в терминах полуопределённой программы (SDP), которая рассматривает практический случай только конечного числа передаваемых сигналов. Для выполнения численного расчета секретного ключа применяется двухэтапная процедура [1]. На первом этапе используется алгоритм Франка-Вульфа [2] для нахождения субоптимальной атаки, приводящей к субоптимальной матрице плотности совместного состояния между отправителем и получателем. На втором этапе полученное субоптимальная матрица плотности используется для решения полуопределённой программы, чтобы получить надежную нижнюю границу ключевой скорости. Поскольку этот алгоритм оптимизации может иметь очень низкую скорость сходимости вблизи оптимальной точки в некоторых сценариях, чтобы иметь разумное время работы, ограничивается максимальное количество итераций алгоритма Франка-Вульфа до 300. Помимо нахождения нижней границы скорости генерации секретного ключа, SDP можно применить для нахождения оптимальных параметров системы. Результаты скорости генерации секретного ключа с оптимальным значением амплитуды когерентного состояния для каждого значения дистанции распространения приведены на рисунке.

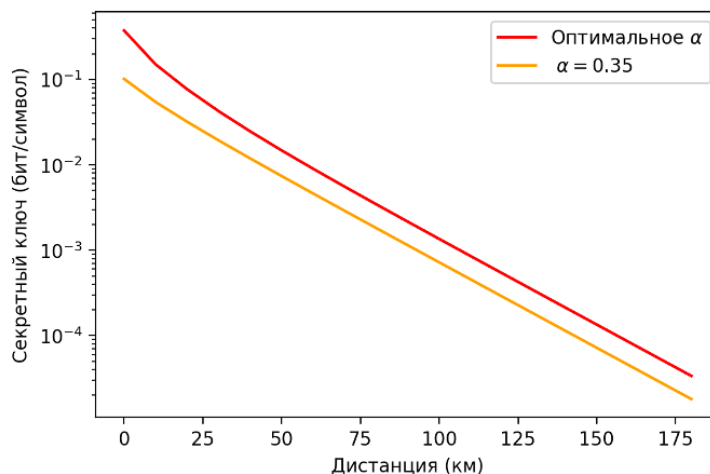


Рисунок. Скорость генерации секретного ключа от дистанции распространения. Красная линия соответствует результатам текущей работы при оптимальном значении амплитуды когерентного состояния, фиолетовая линия - результаты работы программы при значении амплитуды когерентного состояния равным 0.35

[1] Winick A., Lütkenhaus N., Coles P.J., *Quantum*, **2**, 77, (2018).

[2] Frank M., Wolfe P., *Research Logistics Quarterly*, **3**, 95, (1956).

ОБЗОР ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ КРК И ИХ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

Казиева Т.В.^{1,2}, Трофимов Н.С.¹, Казанцев С.Ю.¹,
Зайцев А.И.¹, Шаховой Р.А.¹, Волков А.А.²

¹МТУСИ, Москва, Россия

²НЯУ МИФИ, Москва, Россия

Описаны основные структурные компоненты современных промышленных систем квантового распределения ключа, Представлено сравнение промышленных систем квантового распределения ключа.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, источники одиночных фотонов, детекторы одиночных фотонов.

Системы квантового распределения ключа сейчас постепенно переходят от теоретических моделей и лабораторных установок к серийному производству и промышленному использованию. Как известно модули КРК могут работать как на основе дискретных, так и на основе непрерывных переменных. Однако, в настоящее время использование систем на непрерывных переменных на существующей инфраструктуре ВОЛС осложняется наличием уязвимостей, реализуемыми в данной аппаратуре. Другое направление развития систем КРК связано с использованием запутанных состояний, которые могут быть подготовлены третьей стороной. В перспективе, данная технология может позволить вырабатывать и распределять уникальный секретный ключ между 3 и более абонентами. Однако зрелость данной технологии КРК пока недостаточна для построения как региональных, так и магистральных сегментов. С учетом данных замечаний для анализа в данной работе были выбраны системы, реализованные на основе дискретных переменных.

Структурными элементами модулей КРК (вне зависимости от типа оптической схемы квантового канала и типа кодирования классической информации в квантовом состоянии) являются: источники излучения, детекторы одиночных фотонов, генераторы случайных чисел. Во многом именно данные системы определяют уровень развития систем КРК.

В большинстве современных реализаций протоколов КРК генерация квантовых состояний осуществляется с помощью полупроводникового лазера, поскольку это проще и значительно дешевле, чем использование ИОФ. Лазер, однако, не позволяет получать идеальные однофотонные состояния, поэтому приходится работать с ослабленными когерентными состояниями – лазерными импульсами, подверженными значительной аттенюации (ослаблению). Количество фотонов в ослабленном лазерном импульсе распределено по Пуассону, т. е. в разных квантовых состояниях содержится различное число фотонов, что открывает злоумышленнику возможность провести атаку. Данную проблему решают, во-первых, использованием среднего числа фотонов на импульс существенно меньшим единицы, что дает очень малую вероятность появления импульсов с числом фотонов больше одного, во-вторых, использованием так называемого метода приманочных (обманных) состояний, который позволяет выявить данную атаку.

За обе меры приходится платить: малое число фотонов на импульс приводит к тому, что большая часть импульсов оказывается пустой, что существенно уменьшает скорость генерации ключа, а использование приманочных состояний хотя и позволяет существенно увеличить максимальное расстояние между Алисой и Бобом, приводит к значительным сложностям в постобработке и в целом усложняет протокол. Аналогичное снижение эффективности при переходе от одиночных фотонов к ослабленным когерентным состояниям имеет место и в набирающем сегодня популярность протоколе детектор-независимого КРК (MDI-QKD), преимущества которого (в частности, увеличение расстояния) становятся не так значительны, если вместо ИОФ использовать лазер.

В этой связи использование в системах квантового шифрования истинно однофотонных источников представляет собой важную и перспективную задачу, поскольку именно такие источники позволяют ограничить модели угроз. Однако на сегодняшний день, как правило, в системах квантового шифрования используются квазиоднофотонные источники и анализ моделей нарушителя ведется исходя из этого факта. Среди всех видов детекторов в квантовых коммуникациях применяются: детекторы на основе сверхпроводящих нанопроволок; детекторы на основе лавинных фотодиодов [1].

В качестве КГСЧ в КРК зачастую используются системы, основанные на шумах в полупроводниковых лазерах. Скорости генерации в них составляют доли Гб/с, при этом их стоимость сравнительно меньше остальных систем [2].

[1]. Koziy A.A., et. al., *Quantum elect.*, 51 (8), 655-669, (2021).

[2]. Shakhovoy R., et. al., *IEEE J. Quantum. Elect.*, 57, 1-7, (2021).

**ФОТОННАЯ СТАТИСТИКА НЕКЛАССИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ СВЕТА В
ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ**

Каргина Д.А., Киселев А.Д.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В данной работе теоретически исследуется влияние температуры и флуктуаций коэффициента пропускания на характер статистики фотонов, распространяющихся в атмосфере. Получено общее выражение для порогового значения среднего коэффициента пропускания, определяющего границу области сохранения субпуассоновской статистики. Приведены численные результаты для одномодовых сжатых состояний и состояний типа кот Шредингера.

Ключевые слова: атмосферные квантовые каналы, турбулентность.

Распространение света в атмосферном канале сопровождается изменением квантового состояния за счет взаимодействия с окружением. При этом в отличие от волоконных каналов связи, в которых флуктуации потерь излучения, как правило, невелики, в атмосфере учет этих флуктуаций является принципиально важным. В частности, известно, что неклассическое поведение фотонной статистики квантовых состояний способно разрушаться в атмосферных турбулентных каналах [1-3], приводя к проблемам с защищенностью соответствующих квантовых каналов [3]. В данной работе мы теоретически исследуем критерий разрушения неклассичности фотонной статистики света под действием флуктуаций пропускания среды с учетом температурных эффектов.

Для моделирования квантового канала мы используем представление Страйнспринга, где эволюция квантового состояния определяется взаимодействием фотонной моды и тепловой моды окружения. При этом параметрами квантового канала являются коэффициент пропускания и температура. Флуктуации коэффициента пропускания моделируют турбулентность. Показано, что для сохранения субпуассоновской статистики начального состояния среднее значение коэффициента пропускания среды должно превышать критическое (пороговое) значение коэффициента пропускания. При этом получена аналитическая зависимость порога пропускания как от характеристик входного квантового состояния, так и от параметров, описывающих флуктуации пропускания и температуру среды. На рисунке представлены результаты моделирования порога коэффициента пропускания для сжатых состояний и кот Шредингера.

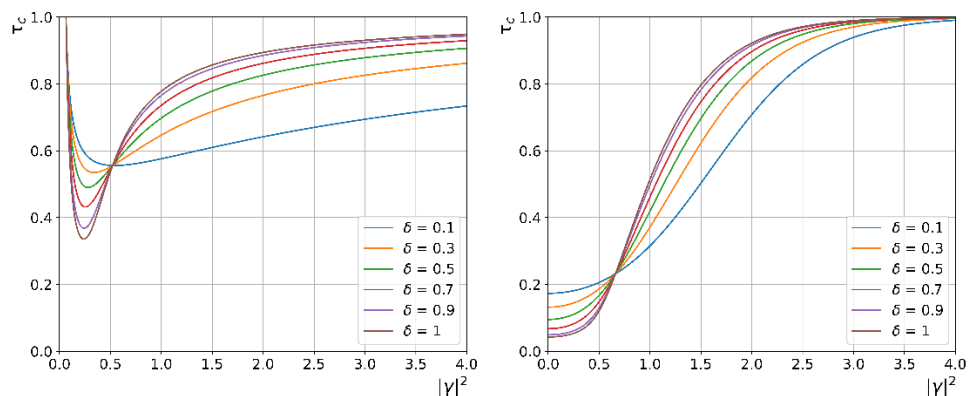


Рисунок. Зависимость критического коэффициента пропускания τ_c от квадрата модуля смещения $|\gamma|^2$ для а) сжатых состояний и б) кота Шредингера при различных значениях флуктуационного параметра

В заключение, в работе исследована математическая модель атмосферного канала, учитывающая как флуктуации коэффициента пропускания среды, так и температурные эффекты. Показано, что область субпуассоновской статистики фотонов определяется порогом среднего коэффициента пропускания. Общее аналитическое выражение для порога использовано для моделирования границы области неклассичности фотонной статистики сжатых состояний и кот Шредингера.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Университета ИТМО в рамках проекта НИРМА № 621317.

- [1] Semenov A.A., Vogel W., *Phys. Rev. A.*, **80**, №2, 021802, (2009).
- [2] Vasylyev D., Semenov A.A., Vogel W., *Phys. Rev. Lett.*, **117**, №9, 090501, (2016).
- [3] Waks E., Santori C., Yamamoto Y., *Phys. Rev. A.*, **66**, №4, 042315, (2002).

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ РЕАЛИЗАЦИИ КВАНТОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ

Лытаев А.А., Попов И.Ю.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Проводится исследование системы из двух связанных волноводов с учётом окаймляющих изгибов с целью реализации квантового CNOT вентиля на её основе. С помощью теории связанных мод подбираются её геометрические параметры.

Ключевые слова: оптические волноводы, теория связанных мод, направленный ответвитель.

В статье [1] была предложена модель квантовых вычислений на основе оптических волноводов, поддерживающих распространение двух оптических мод, в которой TE_0 мода кодирует состояние $|0\rangle$, а TE_1 мода кодирует $|1\rangle$. Для данной модели предлагается схема квантовых вычислений, представленная на рисунке 1.

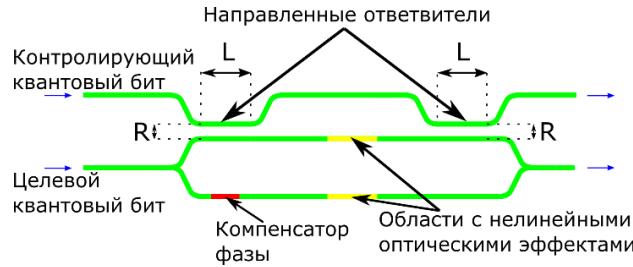


Рис. 1. Исследуемая схема для реализации CNOT вентиля

В данной схеме важное значение играет подбор геометрических параметров: длины сближения волноводов L и расстояния между волноводами R – схема будет корректно выполнять роль CNOT вентиля только в том случае, если данный направленный ответвитель полностью переводит TE_1 моду в противоположный волновод, а TE_0 оставляет в своём.

Для решения этой задачи были найдены выражения для мод одиночного волновода путём решения соответствующего волнового уравнения. С использованием полученных выражений согласно формуле (1) поле E в системе раскладывается, как сумма полей мод отдельных волноводов E_{vm} с неизвестными амплитудными коэффициентами $A_{vm}(z)$, где v – порядковый номер волновода, а m – порядковый номер поперечной моды.

$$E = \sum_{v,m=0,1} A_{vm}(z) E_{vm}. \tag{1}$$

Подстановка данного разложения в волновое уравнение позволяет получить систему дифференциальных уравнений на амплитудные коэффициенты [2]. Приближенное решение данной системы позволяет получить оценку для искомым геометрических параметров системы. Полученная оценка уточняется с помощью рассмотрения системы с учётом изгибов, окаймляющих данное сближение. Потери из-за изгибов и дополнительный обмен энергиями мод волноводов на этих участках моделировался с помощью представления мод волновода изогнутого волновода в виде линейной комбинации мод прямого волновода [3]. Результаты моделирования перехода TE_1 моды в контролируемый волновод для такой системы изображены на рисунке 2.

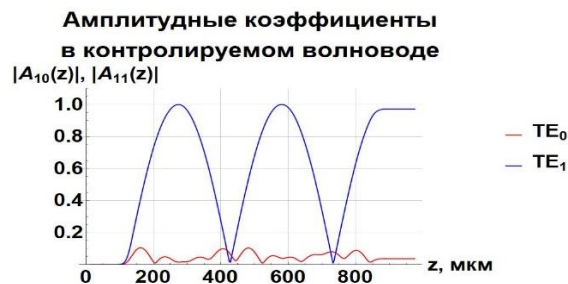


Рис. 2. Распространение TE_1 моды в контролируемом волноводе

Полученные результаты верифицируются моделированием с использованием метода распространения лучей. Таким образом, показывается, что рассматриваемая схема способна выполнять роль переключателя для CNOT вентиля с ошибкой, не превышающей 5%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (Номер гранта №22-11-00046).

[1] Fu J., Shao-Fang T., *Chinese Phys. Lett.*, **20**, 9, 1426-1429, (2003).

[2] Yariv A., *Journal of Quantum Electronics*, **9**, 9, 919-933, (1973).

[3] Melloni A., Carniel F., Costa R., and Martinelli M., *Journal of Lightwave Technology*, **19**, 4, 571-577, (2001).

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ КВАНТОВЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

Малышев Д.М., Аверченко В.А., Тихонов К.С.

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

Проведено исследование генерации квантового излучения с помощью SPOPO с учетом влияния дисперсии в нелинейном кристалле. Оценена степень сжатия каждой моды излучения.

Ключевые слова: сжатый свет, оптический параметрический генератор, дисперсия.

В существующих моделях генерации когерентного света с помощью оптического параметрического генератора с синхронной накачкой (SPOPO), рисунок, обычно считают, что влияние дисперсии в нелинейном кристалле внутри резонатора на получаемое излучение мало, и ей можно пренебречь. Однако в реальных экспериментах дисперсия создает дополнительное фазовое несоответствие между взаимодействующими волнами, которое хоть и мало, но приводит к существенному изменению степени сжатия излучения на выходе резонатора. Кроме того, контроль величины дисперсии позволяет создать эффективную систему манипулирования квантовыми свойствами генерируемого излучения [1]. Таким образом, учитывая дисперсию, исследователи могут лучше понять поведение SPOPO и разработать новые подходы генерации сжатого света с улучшенными квантовыми свойствами и, при необходимости, обеспечить управление этими свойствами.

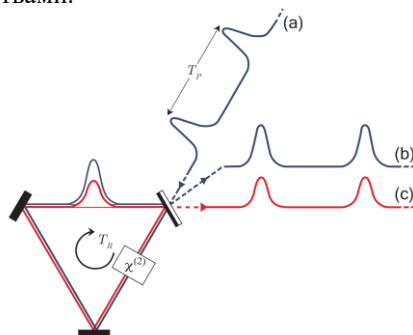


Рисунок. Схема SPOPO, состоящего из кольцевого резонатора, внутри которого помещен нелинейный $\chi^{(2)}$ -кристалл. Поле накачки изображено синей линией (a, b), поле сигнальной моды – красной (c). Время обхода резонатора T_R фотонами накачки и холостой моды равно периоду испускания импульсов накачки T_p

В нашей работе была построена теоретическая модель на основе системы связанных квантовых гармонических осцилляторов, при этом для описания электромагнитного поля использовалось модифицированное уравнение Гейзенберга-Ланжевена, а также формализм, предполагающий разложение поля внутри резонатора по системе выделенных внутррезонаторных мод – "супермод" [2].

С помощью построенной модели были рассчитаны коэффициенты, характеризующие связь выделенных мод, и получено уравнение, описывающее эволюцию комплексных амплитуд супермод излучения в кристалле SPOPO. Это уравнение было решено при помощи теории возмущений по коэффициентам связи мод, что позволило в явном виде установить зависимость между полем на выходе резонатора и величиной дисперсии света в нелинейном кристалле. Кроме того, это позволило нам оптимальным образом подобрать локальный осциллятор при измерении спектральной плотности фототока.

[1] Samuel Lemieux et al., *Phys. Rev. Lett.*, **117**,183601, (2016).

[2] Roslund J., De Araujo R.M., Jiang S., Fabre C., Treps N., *Nature Photonics*, **8** (2), 109-112, (2014).

КУМУЛЯНТНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ ЛЕСТНИЦЫ ДИКЕ

Потапов Д.А., Тихонов К.С.

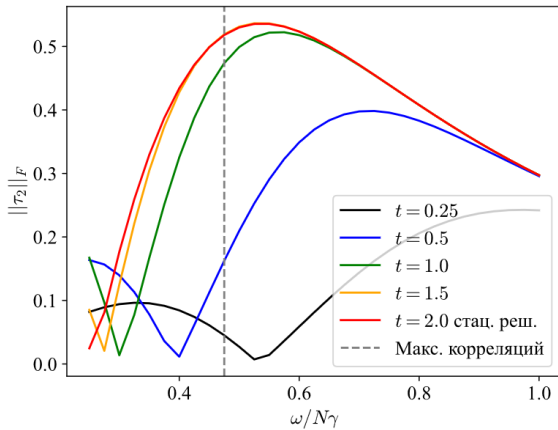
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Проведен кумулянтный анализ состояний лестницы Дике системы из нескольких кубитов. На основе данного анализа рассмотрена временная эволюция ансамбля из нескольких кубитов при наличии различных индивидуальных и кооперативных физических процессов.

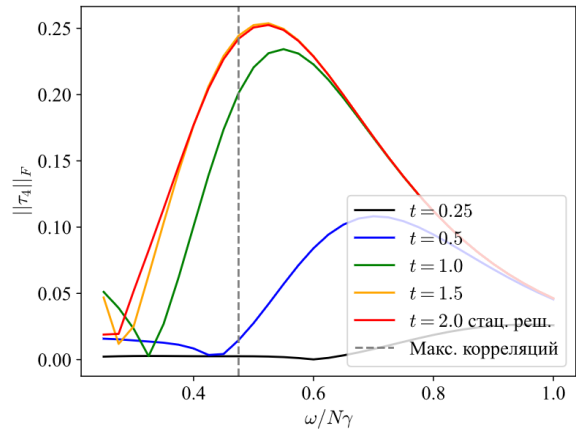
Ключевые слова: состояния Дике, кумулянтный анализ, сверхизлучение.

Явление сверхизлучения было впервые предсказано Р.Дике [1] в 1954 году. Дике рассматривал систему N двухуровневых атомов, приготовленных в возбужденном состоянии. Согласно модели Дике, при достаточно плотном расположении атомов в среде возникает коллективный излучающий дипольный момент, в результате чего возникает импульс сверхизлучения. Такие сверхизлучательные кооперативные переходы удобно описывать с помощью состояний, симметричных относительно перестановок частиц. Состояния, связанные коллективными повышающими или понижающими операторами, образуют «лесенку». Однако в реальных физических системах могут происходить некогерентные изменения состояний атомов, в результате чего появляются дополнительные лесенки с неполной симметрией. Все состояния, входящие в полный набор таких лесенок, называют базисом (лестницей) Дике.

Состояния лестницы Дике по своему построению обладают определенной симметрией, и потому интересны для задач квантовой оптики и информатики, так как симметричная суперпозиция многих квантовых состояний часто оказывается связана с многочастичной запутанностью. В настоящей работе рассмотрены состояния лестницы Дике системы нескольких кубитов. Изучены корреляции высшего порядка при помощи кумулянтного анализа [2, 3]. Кроме того, на основе проведенного анализа в работе была рассмотрена временная эволюция ансамбля из нескольких кубитов, в котором действуют различные индивидуальные и кооперативные атомные процессы. В частности, была рассмотрена эволюция атомной среды в простейшей модели сверхизлучательного лазера, для которой были определены оптимальные параметры генерации (рисунок).



(a) 2-х атомные корреляции.



(b) 4-х атомные корреляции.

Рисунок. Динамика нарастания корреляций, где $\|\tau_2\|_F$ – величина 2-частичных корреляций, $\|\tau_4\|_F$ – величина 4-частичных корреляций, ω – эффективная скорость индивидуальной накачки, γ – эффективная скорость коллективного распада, N – количество атомов в ансамбле.

Время взято в единицах t/γ

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-72-00049.

[1] Dicke R.H, *Physical Review*, 93-99, (1954).

[2] Малахов А.Н., *Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований*, М.: Советское радио, 1978 г., 376 с.

[3] Тихонов К.С., Рот А., *Опт. и спектр.*, **130**, №8, 1205-1215, (2022).

ГЕТЕРОДИННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ДЛЯ СИСТЕМЫ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА НА БОКОВЫХ ЧАСТОТАХ С ДВУМЯ НЕЗАВИСИМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Фадеев М.А.^{1,2}, Гончаров Р.К.^{1,3}, Михайлов В.Ю.⁴, Кынев С.М.¹, Чистяков В.В.^{1,3}

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Российский Квантовый Центр, Москва, Россия

³СМАРТС-Кванттелеком, Санкт-Петербург, Россия

⁴АО «ЛЛС», Санкт-Петербург, Россия

В этой статье рассматривается экспериментальная реализация гетеродинного детектирования для системы квантового распределения ключа на боковых частотах (КРКБЧ). Этот метод позволяет передавать готовые квантовые состояния от оптического диапазона до электрической частоты. Результирующий сигнал имеет фазовый сдвиг от квантового состояния, что позволяет передавать информацию от Алисы к Бобу. В этой статье демонстрируются экспериментальные результаты гетеродинного детектирования для КРКБЧ с двумя независимыми источниками лазерного излучения (исходный и локальный осциллятор).

Ключевые слова: квантовое распределение ключа, когерентное детектирование.

Система КРКБЧ [1] работает следующим образом. Рядом с Алисой лазер излучает излучение, которое модулируется фазовым модулятором. Этот модулятор управляется электронным IQ генератором. Выход этого генератора представляет собой синусоидальную волну со сдвигом фазы. В результате на выходе фазового модулятора возникает многомодовое состояние, где наиболее интенсивными являются центральная (несущая) и две боковые частоты. Этот спектр ослабляется оптическим аттенуатором до уровня мощности на боковых частотах до среднего числа фотонов меньше единицы. Подготовленное квантовое состояние передается по оптоволокну на приемник. Со стороны Боба это же квантовое состояние модулируется повторно на той же частоте, но Алиса и Боб выбирают свои собственные фазовые сдвиги случайным образом. В результате этого на боковых частотах наблюдается интерференция. После модулятора ставится спектральный фильтр, который используется для отделения несущей моды от боковых полос. Результат интерференции регистрируется лавинным детектором одиночных фотонов.

Гетеродинное детектирование — метод когерентного детектирования, при котором частоты информационного излучения и второго источника лазерного излучения (локальный осциллятор или ЛО) не равны друг другу. В результате смешения этих сигналов на нелинейном элементе наблюдается интерференция. Ток фотодиода будет содержать несколько гармоник: удвоенные частоты, суммарную и разностную частоты лазеров [2]. Но так как все частоты, кроме разностной, не попадают в полосу пропускания детектора, они равны постоянному току, который можно отфильтровать. В системе КРКБЧ для получения биений между квантовыми состояниями и гетеродином используется балансный детектор на основе двух классических фотодиодов. В результате спектр со всеми гармониками от Алисы без изменений переводится в полосу электрических сигналов.

Результаты эксперимента. В качестве лазерных источников использовались Teraxion Purespectrum и NordLase NL-ESF-1550-40. Для гетеродинного детектирования требуется высокостабильный лазерный источник, роль которого выполнял лазер от NordLase с шириной линии около 100 Гц. Мощность лазеров составляла 20 мВт для гетеродина и 10 мВт для сигнала. Для детектирования используется сбалансированный детектор BPD-003 производства General Photonics. Спектр на выходе балансного детектора представлен на рисунке.

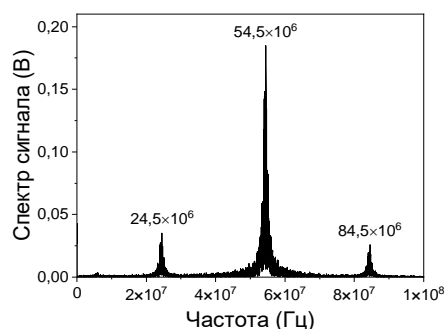


Рисунок. Спектр выходного сигнала балансного детектора

[1] Miroshnichenko G.P., Kozubov A.V., Gaidash A.A., Gleim A.V., Horoshko D.B., *Opt Express*, **26**, №9, 11292-1130, (2018).

[2] Hajomer A.A., Mani H., Jain N., Chin H.-M., Andersen U.L., and Gehring T., *European Conference and Exhibition on Optical Communication (Optica Publishing Group)*, Th1G-5, (2022).

**ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
ЭВОЛЮЦИОННЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОГИБАЮЩИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ
В ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ РЕШЁТКАХ**

Федотовских Е.А.¹, Смолина Е.О.^{2,3}, Смирнов Л.А.^{2,3}

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

³Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

Изучена возможность применения алгоритма разреженной регрессии для получения эволюционного уравнения для комплексной огибающей волнового поля, локализованного в поперечном направлении и распространяющегося вдоль топологической доменной стенки в нелинейной оптической решётке.

Ключевые слова: машинное обучение, нелинейные оптические решётки, топологическая защищённость.

В последние годы большое внимание уделяется исследованиям в области нелинейной топологической фотоники [1]. Это направление оптики комбинирует изучение нелинейных свойств материала и топологические особенности оптической решетки, что открывает возможности для новых приложений, основанных на использовании топологической защищённости электромагнитных мод данных систем от рассеяния на дефектах. Однако необходимо учитывать нелинейные особенности, в частности, при изучении эволюции волновых пакетов в топологических структурах [2]. Анализ такого рода задач требует разработки новых подходов к их решению, в частности, с использованием методов машинного обучения.

В этой работе изучена возможность применения такого метода машинного обучения, как алгоритм разреженной регрессии (реализованного на основе библиотеки PySINDy), для получения эволюционного уравнения для комплексной огибающей волнового поля, локализованного в поперечном направлении и распространяющегося вдоль топологической доменной стенки в нелинейной решётке. В работе [2] с помощью асимптотических методов для малой нелинейности и дисперсии было получено уравнение, описывающее динамику комплексной огибающей такого волнового пакета, отличающееся от традиционного нелинейного уравнения Шрёдингера введением слагаемого, соответствующего нелинейной групповой скорости. Алгоритм разреженной регрессии обеспечивает удобную и быструю численную альтернативу аналитическому выводу и верификации подобных эволюционных уравнений [3].

В качестве тестовых выборок использовалось распределение поля, полученное с помощью численного решения параксиального уравнения, зарекомендовавшего себя как точный метод описания распространения света в реалистичной фотонной решётке. В нашем случае оптическая решетка представляет собой массив одномодовых диэлектрических волноводов, размещённых вдоль оси z и образующих гексагональную решётку в плоскости (x, y) . Элементарная ячейка (ЭЯ) гексагональной решётки состоит из двух элементов, при этом имеется различие в собственных постоянных распространения каждого из двух волноводов в ЭЯ. Доменная стенка вводится как инверсия собственных постоянных распространения внутри ЭЯ вдоль линии с фиксированным значением $y = y_c$. Был развит подход к исследованию подобных систем, действующий как анализ линейной ситуации, так и случай малой нелинейности с учётом пространственных эффектов второго порядка, приводящих к дисперсии. Кроме того, были проанализированы два типа топологических доменных стенок (zig-zag и bearded, отличающиеся выбором y_c), тем самым удалось предложить метод сравнения эволюционных особенностей для данных вариантов организации интерфейсов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (0729-2021-013). Работа Смолиной Е.О. была поддержана грантом 22-1-5-80-1 Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

[1] Ozawa T., et al, *Reviews of Modern Physics*, **91**, 015006, (2019).

[2] Smirnova D.A., Smirnov L.A., Smolina E., Angelakis D.G., and Leykam D, *Physical Review Research*, **3**, 043027, (2021).

[3] Kaptanoglu A.A., et al., *Journal of Open Source Software*, **7(69)**, 3994, (2022).

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА ДЛЯ ШИФРОВАНИЯ В ВОЛНЕ ХАОСА

Чуйко В.А., Янукович Т.П., Агейко С.А.

БГУ, г. Минск, Республика Беларусь

Самым распространённым способом приёма и передачи информации являются цифровые сигналы. Разработан алгоритм формирования сигнала для шифрования в волне хаоса с использованием акустооптического модулятора.

Ключевые слова: шифрование сигнала, акустооптический эффект, режим Брэгга.

На сегодняшний день самым распространённым способом приёма и передачи информации безусловно являются цифровые сигналы. Радиовещание, телекоммуникация, радиолокация, радионавигация и многое другое, что значительно облегчает жизнь и с чем ежедневно взаимодействует абсолютно каждый человек.

Актуальность генерации цифровых сигналов и создания каналов для их передачи в современном мире растёт с каждым днём. На данный момент основой для любого радиоканала служат спутниковые технологии. Однако, по мере развития технических средств, на свет появилось оборудование, вполне способное их заменить. Например, при помощи компактного многофункционального измерительного комплекса «ALMA METER 2», в функционал которого входят: непосредственная генерация цифровых сигналов и их обработка.

Схема шифрования в хаотической системе следует регулярной амплитудной модуляции для аналоговых сигналов [1]. Она включает выбор несущей частоты, близкой к частоте хаоса f_c , а затем шифрование сообщения на этой несущей. Декодирование на приемнике включает в себя генерацию локальной несущей волны хаоса, затем умножение локальной волны хаоса на принятый хаос + сообщение и фильтрацию произведения с помощью фильтра нижних частот для удаления высокочастотной несущей и сохранения низкочастотного сообщения.

Возбуждение ультразвука в акустооптической ячейке осуществляется тонкой пьезоэлектрической пластинкой с резонансной частотой f . Поэтому модулирующий сигнал в форме прямоугольного импульса длительностью T должен быть предварительно наложен на высокочастотную несущую f . Получившийся радиоимпульс подается на электроды пьезопреобразователя, который возбуждает акустический импульс с той же несущей f . С противоположной стороны ячейки располагается поглотитель, исключающий дифракцию света на отраженном импульсе. Падающий световой пучок шириной d проходит через ячейку под углом Брэгга. Из рисунка ясно, что дифракция появляется лишь после того, как акустический импульс начинает пересекать световой пучок. Однако эффективность дифракции ϵ достигает максимального значения не сразу, а только когда весь пучок окажется заполненным ультразвуком.

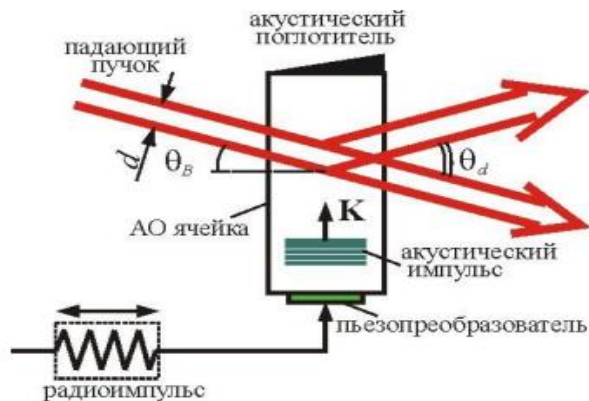


Рисунок. Акустооптический модулятор

Аналогичная ситуация возникает и на срезе оптического импульса. Для повышения быстродействия необходимо, во-первых, фокусировать световой пучок (то есть уменьшать d), а во-вторых, выбирать срез кристалла с минимальным значением угла Брэгга. Наилучший результат дает анизотропная дифракция с углом Брэгга $\theta_B = 0$.

[1] Lorenz N., *Journal of the Atmospheric Sciences*, №20, 130 – 141, (1963).

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА ПО ПРОТОКОЛУ ВВ84 МЕЖДУ ДРОНАМИ

Каширский Д.Е., Якименко Ф.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

В работе представлены результаты расчетов спектров средней скорости распределения ключей по протоколу ВВ84 между беспилотными летательными аппаратами. При моделировании учитывались потери, вызванные расходимостью пучка, атмосферным поглощением и турбулентностью, а также погодными условиями.

Ключевые слова: средняя скорость, ключ, протокол ВВ84, дрон, атмосферные явления, спектр.

Использование дронов для организации оптического канала связи накладывает ограничения на массогабаритные параметры приемо-передающих устройств. Этот фактор значительно влияет на битрейт в случае оптических систем, использующих сильно ослабленные лазерные импульсы. В данной работе была поставлена задача оценить скорость распределения ключа по протоколу ВВ84 в диапазоне длин волн от 400 до 1600 нм в условиях наложенных массогабаритных ограничений с учетом различных атмосферных явлений.

Расчет средней скорости распределения ключа по протоколу ВВ84 проводился по формуле из [1]. Потери, вызванные расходимостью пучка, определялись из предположения, что пучок является гауссовским. Влияние на расходимость пучка турбулентной атмосферы оценивалось согласно [2]. Селективное молекулярное поглощение атмосферы рассчитывалось методом line-by-line. Потери, обусловленные снегом, дождем и туманом, определялись согласно эмпирическим моделям [3] и [4].

На рисунке приведен пример рассчитанных спектров средней скорости распределения ключа по протоколу ВВ84 для трех погодных условий. При моделировании предполагалось, что дроны находились на высоте 100 м от поверхности земли и на расстоянии 500 м друг от друга. Частота следования лазерных импульсов, ослабленных до уровня 0,1 фотон/импульс, равнялась 10 МГц, а эффективность регистрации фотонов детектором – 20 %. Диаметры выходной и приемной апертур приемо-передающих устройств составляли 5 см.

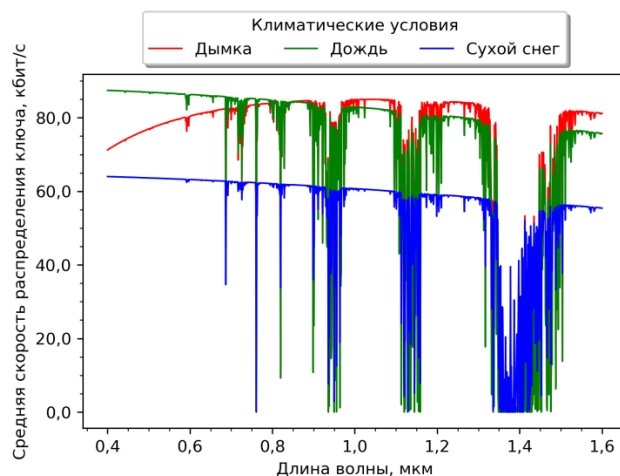


Рисунок. Спектры средней скорости распределения ключа для трех погодных условий

Несмотря на равную скорость выпадения осадков, равную 1 мм/час, снег сильнее снижает среднюю скорость распределения ключей чем дождь. Слабая дымка оказывает схожее с дождем влияние на битрейт при длинах волн в диапазоне от 0,7 до 1,0 мкм. При длинах волн меньших 0,7 мкм дымка сильнее снижает скорость распределения ключа чем дождь и битрейт уменьшается с уменьшением длины волны, стремясь к значению, как в случае снега. При длинах волн больших 1,0 мкм, наоборот, наблюдаются большие значения скорости распределения ключа в случае тумана нежели дождя.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030), проект № 2.0.6.2022 ЛМУ.

[1] Третьяков Д.Б., Коляко А.В., Плешков А.С. и др., *Автометрия*, **52**, №5, 44-54, (2016).
 [2] Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В., *Оптика турбулентной атмосферы*, **5**, 1-271, (1988).
 [3] Ghassemlooy Z., Popoola W.O., *Mobile and Wireless Communications Network Layer and Circuit Level Design*, 355-391, (2010).
 [4] Naboulsi M.A., Sizun H., de Fornel F., *J. SPIE Opt. Eng.*, **43**, №2, 319-329, (2004).

КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Зотова А.М., Казанцев С.Ю., Пчелкина Н.В., Грифонов А.А.

МТУСИ, Москва, Россия

Рассмотрены основные направления развития квантовых технологий и проведен их квалиметрический анализ в период 2015-2023 годы. Предложена методика оценивания уровня развития технологии на основании данных о публикационной активности в научной периодике, индексируемой в международных наукометрических базах данных.

Ключевые слова: квантовые технологии, квалиметрия, наукометрический анализ.

Обычно существует определенная проблема оценить уровень развития современной технологии и сделать прогноз о темпах ее дальнейшего развития. В таких случаях приходится просматривать особенности развития нескольких близких технологий, применяя ретроспективный анализ, а также использовать методологию нечеткой логики и нечетких множеств для анализа мнения различных экспертов, естественно, при этом приходится оперировать качественными характеристиками уровня развития технологии и темпа ее развития в будущем. Для такого рода задач, в настоящее время широко используются методы квалиметрии [1]. Сегодня, наиболее передовыми технологиями, с развитием которых связывают, как значительные прорывы в ряде областей науки и техники, так и большие вызовы современному укладу, являются квантовые технологии. Традиционно большинство экспертов разделяют квантовые технологии на три отдельных больших направления, это - квантовые компьютеры, квантовые коммуникации и квантовая метрология и сенсорика [2]. Ряд экспертов выделяют 4 направления: квантовая информатики; квантовая метрология и датчики; квантовая криптография и коммуникация; квантовые вычисления [3]. Мы придерживались концепции [2], а для того, чтобы выявить уровень зрелости технологии и оценить относительные темпы роста технологий, использовались методики анализа наукометрических показателей предложенные в [4], где зрелость технологии оценивалась по изменению скорости роста не научных публикация, а патентов. Для каждой технологии выбирались характерные ключевые слова, по которым проводился поиск в наукометрических базах данных, для заданного временного отрезка. При анализе использовались наукометрические базы SCOPUS, Google Академия и сайт elibrary.ru. Примеры получаемых данных показаны на рисунке, на котором показаны распределение научных публикаций по годам (рис. (а)) для разных квантовых технологий, а на рис. (б) показана диаграмма, по которой анализировались основные платформы для одного из ключевых элементов квантовых коммуникаций – источников одиночных фотонов [4]. Основной поиск проводился по англоязычной части наукометрических баз. Исследования показали, что поисковые запросы в базе SCOPUS и Google Академия дают похожие картины развития технологий, которые часто кардинально отличаются от зависимостей, получаемой по тем же поисковым запросам на сайте elibrary.ru, при этом результаты поиска по сайту elibrary.ru дают на порядок меньше результатов, чем в Google Академия. В настоящее время поиск в Google Академия выдает тенденции развития квантовых технологий аналогичные тем, что были выявлены с применением инструментов анализа базы SCOPUS и WoS.

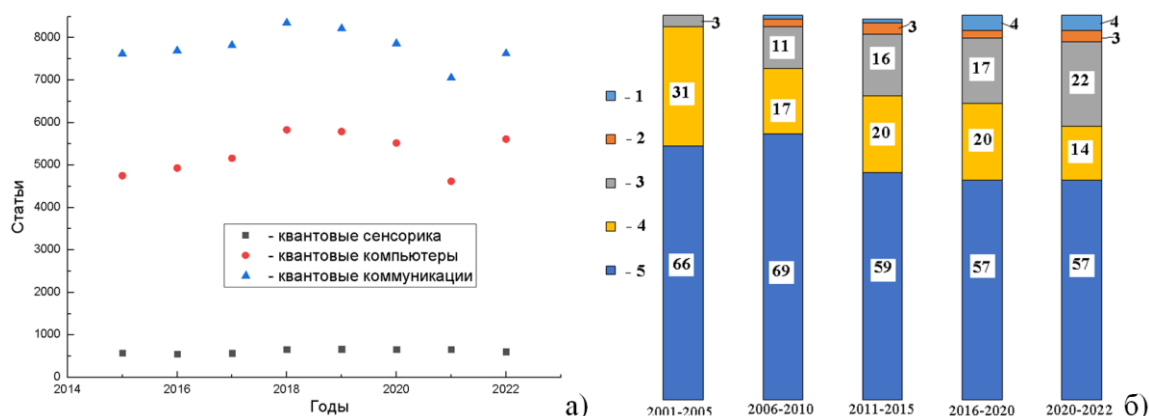


Рисунок. Распределение числа статей по году публикации: а) статьи по разным квантовым направлениям в базе google Академия; б) распределение публикаций посвященных источникам одиночных фотонов по годам для разных платформ (1 – углеродные нанотрубки; 2 – одиночные атомы; 3 – центры окраски; 4 – параметрический распад и ЧВС; 5 – квантовые точки)

[1] Канаев А.Т., Курмангалиева Д.Б., Ибраева Ж.Т., *Прикладная квалиметрия*, (2019).

[2] Федоров А.К., *Фотоника*, **13**, №6, 574-583, (2019).

[3] Scheidsteger T., Haunschild R., Bornmann L., Ett C., *Quantum Reports*, **3**(3), 549-575, (2021).

[4] Машковцева Л.С., и др., *Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы*, №1, 22-31, (2022). EDN GEJRY.

РЕЗОНАНСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ В СЕГМЕНТИРОВАННЫХ СПИРАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДАХ

Лихов В.В.^{1,2}, Васильев С.А.¹, Алагашев Г.К.¹, Охримчук А.Г.¹

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,

Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва, Россия

²Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия

Оптический вихрь получен в режиме брэгговского отражения в сегментированном по азимуту винтовом волноводе, записанном фемтосекундным лазером в кварцевом стекле. Подтверждён вклад азимутальной модуляции показателя преломления в условие орбитального фазового синхронизма.

Ключевые слова: прямая лазерная запись, оптические вихри, брэгговские решётки.

Пучки с орбитальным угловым моментом (ОУМ), также называемые оптическими вихрями, обычно получают посредством пространственных модуляторов света, специальных пластинок или голограмм [1]. Эти методы, однако, плохо подходят для телекоммуникаций, поскольку предполагают вывод пучка из волоконного световода в открытое пространство. Ранее нами был предложен способ получения оптических вихрей прямой лазерной записью трёхмерных винтовых волноводов, уже продемонстрированный экспериментально в кристалле ИАГ [2] и допускающий, в перспективе, получение оптических вихрей непосредственно в волоконных световодах.

При записи подобных структур в кварцевом стекле азимутальная неоднородность проявляется сильнее, чем в случае ИАГ. Для устранения азимутальной неоднородности была предложена запись спиральных волноводов с периодической азимутальной модуляцией показателя преломления (ПП) (рис. а). Вместе с тем, было показано, что для таких волноводов условия орбитального фазового синхронизма предполагают зависимость топологического заряда отражённого вихря от формы этой модуляции [3]. Это обстоятельство открывает дополнительную возможность управления свойствами отраженной вихревой волны.

Для экспериментального подтверждения этой гипотезы три сегментированных спиральных волновода были записаны в кварцевом стекле (марка КВ). Волноводы длиной 11 мм были сформированы тремя сегментами с увеличением ПП приблизительно $3 \cdot 10^{-4}$. Диаметр и шаг спирали были соответственно: WG1 - 25 и 1.6 мкм, WG2 - 25 и 1.06 мкм, WG3 - 40 и 1.06 мкм.

Было установлено, что WG1 является одномодовым на 1.55 мкм и имеет резонансное отражение в третьем порядке брэгговской дифракции ($p = 3$), WG2 – также одномодовый, но не имеет отражения, а WG3, будучи маломодовым, имеет брэгговский резонанс в области 1.55 мкм, соответствующий $p = 2$ (рис. в). Эти наблюдения подтверждают условия синхронизма, сформулированные в работе [3]. Основная гармоника разложения модуляции ПП по азимуту во всех волноводах равна трём ($m = 3$). Для WG1 $p = 3$, поэтому отраженное излучение распространялось в основной моде с ОУМ, равным нулю ($p - m = 0$). Для WG2 и WG3, для которых $p = 2$, в соответствии с условием орбитального фазового синхронизма [3] отраженная волна с ОУМ $= p - m = 1$ должна распространяться в высшей моде, которая не поддерживается в WG2, но распространяется в WG3.

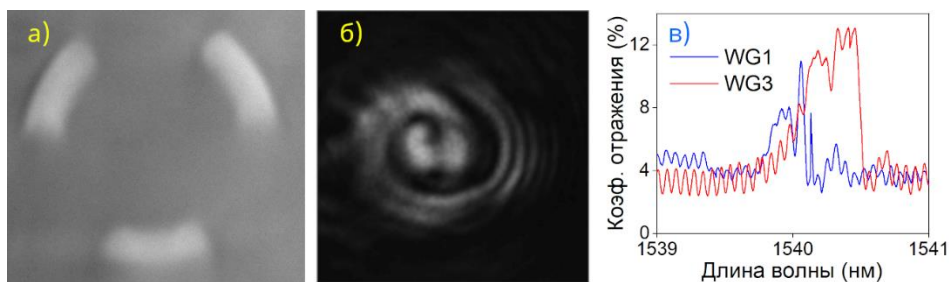


Рисунок. а) Фотография торца сегментированного спирального волновода, б) интерференция отраженного света с опорной волной в дальнем поле для WG3 на $\lambda=1540.3$ нм, в) спектры отражения волноводов

Картина дальнего поля, зарегистрированная при интерференции опорной и отражённой волноводом WG3 волнами, приведена на рис. (б). Наблюдающийся одиночный виток спирали свидетельствует об ОУМ = 1 отраженной волны.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 22-29-01187.

[1] Shen Y., Wang X., Xie Z. et al., *Light Sci. Appl.*, **8**, 1, 90, (2019).

[2] Okhrimchuk A.G., Likhov V.V., Vasiliev S.A., Pryamikov A.D., *J. Light. Technol.*, **40**, 8, 2481-2488, (2022).

[3] Лихов В.В., Васильев С.А., Алагашев Г.К., Семенов С.Л., Охримчук А.Г., *Квантовая электроника*, **52**, 11, 1001-1006, (2022).

ЛАЗЕРНАЯ И СИЛОВАЯ ОПТИКА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОКАТАЛИЗА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ
ОКСИДНЫХ ПЛЁНОК С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ
АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ**

**Афанасьев Н.А., Шелеманов А.А., Евстропьев С.К.,
Карлагина Ю.Ю., Одинцова Г.В.**

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Исследованы структура и свойства оксидных покрытий, сформированных на поверхности сплава титана лазерным излучением. Проведена экспериментальная оценка эффективности генерации синглетного кислорода. Показан эффект антибактериального действия получаемых оксидных плёнок.

Ключевые слова: диоксид титана, лазерное окисление, активные формы кислорода.

Актуальность. Использование эффекта генерации активных форм кислорода в результате фотокатализа плёнок диоксида титана позволит придать антибактериальные свойства поверхности титанового сплава для применения данной технологии в медицинской отрасли, например, для медицинских применений в качестве бактерицидных покрытий титановых имплантатов и медицинского инструмента без использования антибиотиков. Цель работы. Исследование и разработка лазерной технологии формирования антибактериальных покрытий на поверхности титана и его сплавов. Основные результаты. Были сформированы оксидные плёнки двумя способами: 1) до порога кипения, когда рост оксидного слоя происходит как во время нагрева поверхности лазерными импульсами, так и во время её остывания [1] (рис. 1); 2) выше порога кипения: формирование оксидного слоя происходит на стадии остывания (рис. 2).

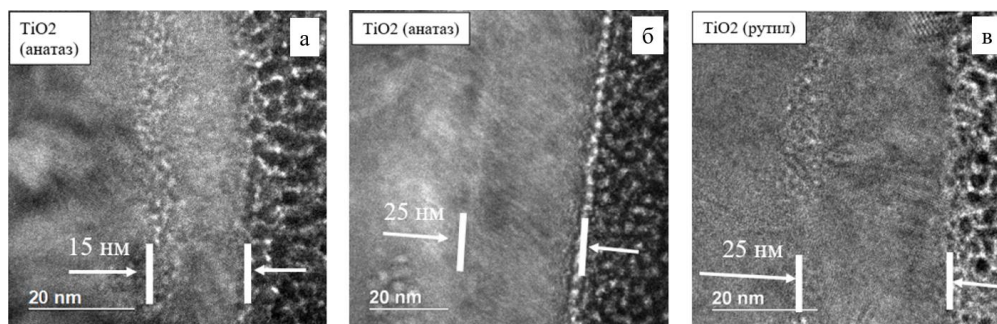


Рис. 1. ПЭМ картины оксидных плёнок, сформированных до порога кипения при времени экспозиции 25 мс (а), 50 мс (б) и 74 мс (в)

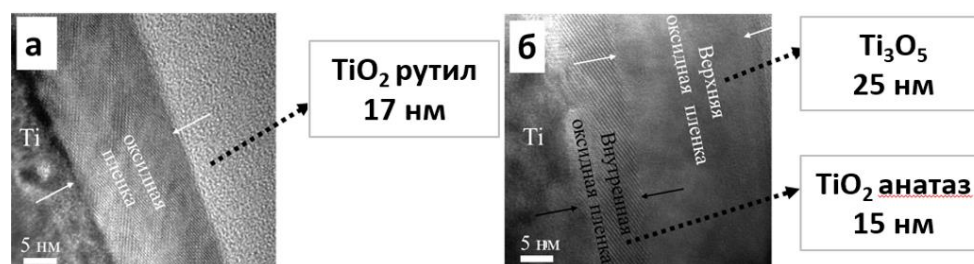


Рис. 2. ПЭМ картины оксидных плёнок, сформированных при температуре нагрева поверхности выше порога кипения, при времени экспозиции 17 мс (а) и 29 мс (б)

Было показано, что для плёнок, сформированных до порога кипения, сначала идёт рост оксидной плёнки в фазе рутил TiO_2 . После увеличения времени экспозиции t_{eff} рост толщины плёнки в фазе рутил TiO_2 продолжается, а после меняется фазовый состав плёнки с рутила на анатаз TiO_2 . Для плёнок, сформированных после порога кипения, сначала происходит рост фазы рутила TiO_2 , а при увеличении времени экспозиции t_{eff} наблюдается изменение плёнки на многосоставную, включающую в себя нижний слой в фазе анатаз TiO_2 и верхний слой Ti_3O_5 . Было проведено экспериментальное исследование по генерации синглетного кислорода на поверхности оксидных плёнок при фотовозбуждении источниками с разными длинами волн: 285 нм, 375 нм и 405 нм. Пик люминесценции синглетного кислорода приходится на длину волны 1270 нм. Показано, что все оксидные плёнки обладают высокой способностью генерировать синглетный кислород при воздействии возбуждающего излучения на длине волны 405 нм.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030».

[1] Veiko V., Ageev E., Gorbunova E., Karlagina Yu., Loginov A., Odintsova G., Skuratova A., *Optics Express*, **22**, 24342–24347, (2014).

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО МЕТОДА ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Егорова К.А., Розанов К.А., Сидорова А.Д., Горенский Ф.А., Синев Д.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В настоящей работе рассматриваются особенности лазерного метода термоупрочнения поверхностных слоев титановых деталей путем замены технологии лазерного науглероживания с применением графитного порошка на предварительную лазерную обработку стеклотекстолита с последующим образованием графена.

Ключевые слова: повышение твердости, увеличение твердости, лазерное микроструктурирование титана.

Титан может использоваться в промышленности благодаря его малому весу при заданном уровне прочности и устойчивости к высоким температурам, коррозионной стойкости и биосовместимости. Но его использование ограничено из-за реакционной способности титана при высоких температурах во время механической обработки или быстрого износа инструмента. Для улучшения последнего параметра необходимо повышать твердость, так как твердость влияет на значения износостойкости [1]. Однако для элементов режущих инструментов (таких как шестеренки, поршни, сверла, фрезы, ножи, ножниц и пр.) необходимо сочетание высокой поверхностной твердости и прочности, но мягкость структуры сердцевины материала, из которого они изготовлены. Достичь баланса перечисленных свойств возможно посредством лазерной обработки с целью формирования поверхностных микроструктур повышенной твердости, прочности и износостойкости. Изменяя и наращивая дополнительные поверхностные структуры, мы не затрагиваем весь материал. Существуют различные методы лазерной обработки для повышения твердости [2-5]. Ранее нами был предложен метод ассистированной лазерной обработки с графитом [6] с предварительным окислением поверхности (рисунок). Данный метод позволил получить значения твердости до 3200 HV.

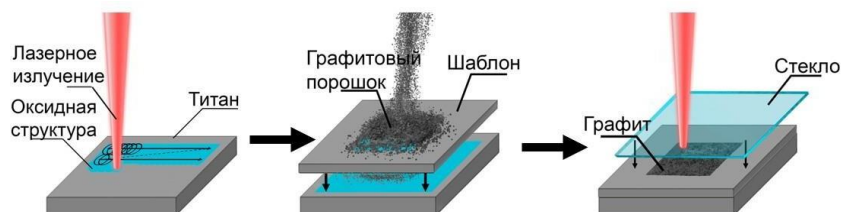


Рисунок. Схема лазерной обработки под слоем графитового порошка

Сложностью данного метода является использование порошкообразного графита, так как даже применение специального шаблона для контроля толщины слоя порошка не исключает возможности появления воздушных карманов, что влияет на итоговую толщину слоя. Поиск решения проблемы привел к идее заменить графитовый порошок на предварительную лазерную обработку стеклотекстолита источником с длиной волны 10,6 мкм с последующим образованием на поверхности графена, что подтверждается литературным обзором [7, 8]. Толщину получаемого слоя можно контролировать параметрами лазерного излучения. Далее полученную структуру поместить на титан и обработать излучением с длиной волны 1,06 мкм, которое является прозрачным для стеклотекстолита. Выдвинуто предположение, что данный метод сможет заменить использование шаблона, графитового порошка и стекла с сохранением процесса повышения твердости на поверхности.

Работы выполнены при финансовой поддержке научной подготовки бакалавров, магистрантов и аспирантов в рамках выполнения научно-исследовательских работ на базе Физико-Технического Мегафакультета Университета ИТМО и при поддержке программы «Приоритет 2030».

[1] Kramar V.M., Kindrachuk M.V., Loburak V.J., *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **4**, 8-11, (2013).

[2] Simonov Y.V., & Ushakov I.V., *Bulletin of the Moscow State Regional University (Physics and Mathematics)*, **2**, 19-35, (2020).

[3] Badkar D.S., *J. of Advanced Manufacturing Systems*, **17**, 291-316, (2018).

[4] Badkar D.S., *J. of Surface Science and Technology*, **35**, 82-96, (2020).

[5] Zain E.M., et al., Effect of Laser Cladding Processing Parameters on Nitinol's Clad Dimensions, Microstructure, and Hardness. *Materials Sciences and Applications*, (2021).

[6] Егорова К.А., Розанов К.А., Киян А.И., Синев Д.А., *Фотоника [Photonics Russia]*, **17**, 16-24, (2023).

[7] Lin J., Peng Z., Liu Y. et al., *Nat Commun*, **5**, 5714, (2014).

[8] Abdulhafez M., Tomaraei G.N., Bedewy M., *ACS Appl. Nano Materials*, **4**, 2973-2986, (2021).

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ
МИКРОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ

Бондаренко А.Г.¹, Палехова А.В.¹, Алексан Г.В.¹, Дададжанов Д.Р.¹,
Заколдаев Р.А.², Одинцова Г.В.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²University of Tromsø, Tromsø, Norway

В данной работе рассматривается разработка технологии CO₂-лазерной записи микрофлюидных систем на кварцевом стекле для биохимических приложений. Технология позволяет производить прецизионную запись структур с контролируемыми значениями глубины и ширины.

Ключевые слова: микрофлюидика, CO₂-лазер, структурирование поверхности.

Микрофлюидика активно развивается и внедряется в различные области нашей повседневной жизни [1-3]. Вместе с этим совершенствуются методы изготовления аналитических микрофлюидных устройств. Например, в настоящее время технология стереолитографии с 3D-печатью, как новый тип технологии быстрого прототипирования, применяется для изготовления микрофлюидных устройств из композита графита и смолы [4] и разработки аналитического микрофлюидного устройства из комбинации четырех типов фильтровальной бумаги с фотоотверждаемой смолой [5]. Особый интерес и значимость в приложениях медицины и при детектировании оптических сигналов протекающих реакций представляют микрофлюидные системы, где в качестве подложки используется кварцевое стекло в силу химической устойчивости и высокой оптической прозрачности используемого материала [6]. Довольно распространенным и хорошо известным методом изготовления микрофлюидных структур является технология мокрого травления [7], однако данный процесс не экологичен, сложно контролируем и многоступенчат. Механические методы создания микрофлюидных элементов считаются экономичными, быстрыми и простыми [8], но процесс ограничивается относительно низкой точностью и производительностью. Технологии с использованием сфокусированного ионного пучка и ультракоротких лазерных импульсов являются высокоточными и быстрыми [9, 10], но в то же время дорогостоящими методами изготовления микрофлюидных элементов, что ограничивает применение этих технологий в промышленных масштабах. CO₂-лазерная обработка кварцевых стекол считается хорошо известной, экономичной, легко контролируемой и высокоточной [11], однако до сих пор не представлено работ по изготовлению микрофлюидных систем на поверхности кварцевых стекол путем прямого CO₂-лазерного структурирования и их дальнейшего применения на практике, что является хорошим заделом для развития данной технологии.

В данной работе представлена разработанная технология CO₂-лазерной записи многоцветных микрофлюидных систем различной геометрии и последующего применения этих систем в сферах диагностики и химии. Основной принцип формирования систем заключается в комбинации составных микрофлюидных элементов (каналов, резервуаров). Лазерное структурирование позволяет получить каналы глубиной и шириной в диапазонах 0,5±0,1–50±5 мкм и 46±3–210±15 мкм соответственно. Дополнительная возможность записи криволинейных структур расширяет число приложений данных систем. Использование CO₂-лазерного излучения является перспективным и многообещающим решением вопроса получения микрофлюидных систем, ведь оно обеспечивает быструю, нетоксичную, одноэтапную и прецизионную обработку поверхности стекла.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030».

[1] Moore T.A., Brodersen P., Young E.W.K., *Anal. chem.*, **89**, №21, 11391-11398, (2017).

[2] Rai P.K., Islam M., Gupta A., *Sens. and Actuators A: Phys.*, 113926, (2022).

[3] Fang S., Tian H., Li X., Jin D., Li X., Kong J., Liu T.I., *PloS one*, **12**, №4, e0175050, (2017).

[4] Costa B.M.C., Griveau S., Bedioui F., d'Orlye F., da Silva J.A.F., Varenne A., *Electrochim. Acta*, **407**, 139888, (2022).

[5] Zaki M.F., Chen P.C., Yeh Y.C., Lin P.H., Xu M.Y., *Sens. and Actuators A: Phys.*, **347**, 113991, (2022).

[6] Kotz F., Arnold K., Bauer W., Schild D., Keller N., Sachsenheimer K., Rapp B.E., *Nature*, **544**, №7650, 337-339, (2017).

[7] Grosse A., Grewe M., & Fouckhardt H., *J. of micromech. and microeng.*, **11**, №3, 257, (2001).

[8] An Q., Ming W., Chen M., *Materials*, **8**, №4, 1428-1441, (2015).

[9] Li W., Dimov S., Lalev G., *Microelectron. eng.*, **84**, №5-8, 829-832, (2007).

[10] Kongsuwan P., Wang H., Lawrence Yao Y., *J. of Appl. Phys.*, **112**, №2, 023114, (2012).

[11] Temmler A., Weingarten C.B., Schober B., Uluz E., *Appl. Surf. Sci.*, **555**, 149609, (2021).

СОЗДАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ СТРУКТУР НА МАССИВНОМ ТИТАНЕ

Рудь Д.А., Синева Д.А., Понкратова Е.Ю., Зуев Д.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

В настоящей работе исследованы режимы формирования термохимических лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ТЛИППС) на массивных образцах титана. Показана возможность управления топологическими характеристиками структур за счет изменения исходной шероховатости поверхности образца.

Ключевые слова: ТЛИППС, лазерная термохимическая запись, поверхностное окисление титана.

Регулярные поверхностные структуры с субмикронными значениями периода применимы для решения проблем фотоники, оптики и химии, к примеру в качестве дифракционных оптических элементов и сенсорных площадок [1]. Существуют сведения о формировании таких рельефов под лазерным воздействием, так называемые лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (ЛИППС), которые могут быть получены на широком круге тонкопленочных и массивных материалов. Широкое применение находят упорядоченные ЛИППС, образующиеся по термохимическому (окислительному) механизму на тонких пленках, и механизмы их формирования в настоящий момент достаточно хорошо известны [2, 3], при этом образование термохимических ЛИППС на массивных материалах изучено недостаточно. Настоящая работа направлена на изучение особенностей механизмов возникновения ТЛИППС на образцах массивного титана ВТ-1-0 толщиной около 1,5 мм. Запись ТЛИППС производится с помощью Yb-волоконного коммерчески доступного лазерного источника «Минимаркер-2» с паспортной мощностью 20 Вт. В оптическую систему перед сканирующей системой устанавливается призма Тейлора-Глана для выделения линейно поляризованной компоненты из лазерного излучения, а также полуволновая пластина ($\lambda/2$) для возможности управления углом наклона индуцируемых структур за счет изменения угла поляризации выходного излучения. Показана возможность управления режимами формирования и упорядоченностью ТЛИППС за счет задания начальной шероховатости посредством предварительной лазерной шлифовки поверхности образца (рисунок).

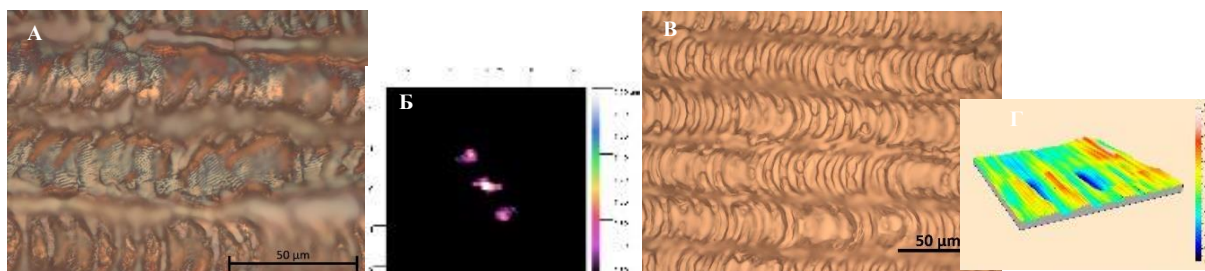


Рисунок. а) ТЛИППС, мощность 2.19 Вт, частота следования импульсов 28 кГц б) 2D-БПФ, в) изначальная шероховатость, мощность 7.6 Вт, частота следования импульсов 99 кГц, г) профилометрия лазерно-шлифованной поверхности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-79-10241.

Авторы благодарят лабораторию факультета «Систем управления и робототехники» и Авилову Е.А. за помощь в получении данных профилометрии, а также ресурсный центр СПбГУ «Нанотехнологии» за помощь в получении данных электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеномископии.

[1] Bonse J., Höhm S., Kirner S.V., Rosenfeld A., Krüger J., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **23**, 3, (2017).

[2] Sinev D.A., Yuzhakova D.S., Moskvina M.K. and Veiko V.P., *Nanomaterials*, **10**, 2161, (2020).

[3] Dostovalov A.V., Korolkov V.P., Terentyev V.S., Okotrub K.A., Dultsev F.N., Babin S.A., *IEEE 2016, Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, (2017).

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ С
ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ
КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТОВ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЫ**

Топоровский В.В., Кудряшов А.В., Самаркин В.В., Галактионов И.В.

Институт динамик геосфер РАН им. М.А. Садовского, Москва, Россия

В работе оптимизированы параметры пьезоэлектрических деформируемых зеркал биморфного и актюаторного типа для коррекции аберраций волнового фронта мощного лазерного излучения, вызванных турбулентной атмосферой Колмогоровского спектра со структурной постоянной показателя преломления $C_n^2 = 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$, радиусом когерентности 34 мм и скоростью ветра 10 м/с при прохождении пучка с длиной волны 1064 нм и диаметром 300 мм вдоль трассы длиной 500 м.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, пьезоэлектрические корректоры волнового фронта, аберрации волнового фронта.

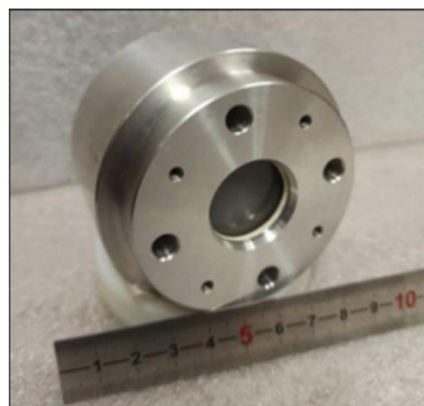
Использование средств и методов адаптивной оптики для компенсации искажений мощного лазерного излучения, прошедшего турбулентную среду [1], является одним из самых популярных подходов для улучшения качества передаваемого сигнала через атмосферу наряду с усреднением апертуры [2], кодинггом [3], когерентным сложением модовых пучков [4].

В работе был проведен сравнительный анализ современных корректоров волнового фронта для решения данной задачи. Было выявлено, что самыми подходящими с этой точки зрения являются пьезоэлектрические корректоры волнового фронта: биморфные [5, 6] и пьезоактюаторные деформируемые зеркала [7, 8]. Были определены улучшенные характеристики зеркал для коррекции фазовых флуктуаций атмосферы Колмогоровского спектра на трассе длиной 500 м, диаметром пучка 300 мм, структурной постоянной показателя преломления $C_n^2 = 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$, радиусе когерентности 34 мм для длины волны 1064 нм и скорости ветра 10 м/с. Показано, что эффективная коррекция фазовых флуктуаций может быть получена в случае обеспечения диапазона деформации поверхности зеркал не менее 5,3 мкм (при этом для датчика волнового фронта необходимо обеспечить динамический диапазон до $\pm 5,5$ мкм) и рабочей частоты не менее 800 Гц в замкнутом цикле.

На основании проведенных численных оценок были разработаны, изготовлены и исследованы пьезоэлектрические корректоры волнового фронта: биморфное деформируемое зеркало диаметром 30 мм с 37 электродами (рис. а) и пьезоактюаторное диаметром 120 мм с 121 управляющим элементом (рис. б).



(а)



(б)

Рисунок. Пьезоэлектрические корректоры волнового фронта: (а) биморфное деформируемое зеркало, (б) пьезоактюаторное деформируемое зеркало

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №19-19-00706П.

- [1] Rukosuev A., Nikitin A., Toporovsky V., et al., *Photonics*, **9**, №5, 351, (2022).
- [2] Churnside J., *Appl. Opt.*, **30**, №15, 1982–1994, (1991).
- [3] Qu Z., Djordjevic, I.B., *Optics Letters*, **41**, №14, 3285–3288, (2016).
- [4] Belmonte A., Kahn J.M., *J. Lightwave Technol.*, **31**, №9, 1383–1387, (2013).
- [5] Sheldakova J., Toporovsky V., Galaktionov I., et al., *Proc. SPIE*, 11486, 114860E, (2020).
- [6] Samarokin V., Alexandrov A., Galaktionov I., et al., *Appl. Sci.*, **12**, 1144, (2022).
- [7] Toporovsky V., Samarokin V., Kudryashov A., et al., *Proc. SPIE*, 11987, 119870M, (2022).
- [8] Toporovsky V., Samarokin V., Sheldakova J., et al., *Optics & Laser Technology*, **144**, 107427, (2021).

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ СУММАРНОЙ ЧАСТОТЫ ШИРОКОПОЛОСНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ С ОППОЗИТНЫМИ ЧАСТОТНЫМИ ЧИРПАМИ

Кузьмин И.В., Миронов С.Ю., Мартьянов М.А.

ФИЦ ИПФ РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород, Россия

В работе аналитически и численно рассмотрены особенности высокоэффективной генерации второй (оо-е и ое-о тип синхронизма) и третьей (оо-е тип синхронизма) гармоник лазерными импульсами с оппозитными частотными чирпами.

Ключевые слова: широкополосный синхронизм, генерация гармоник.

Для решения ряда задач ускорительной физики необходимы электронные пучки с предварительно заданным распределением электронной плотности. Профилированные пучки необходимы, в частности, для минимизации поперечного нормализованного эмиттанта, генерации мощного ТГц излучения в лазерах на свободных электронах, ускорения заряженных частиц в поле кильватерной волны (PWFA) [1, 2]. Для генерации пучков заряженных частиц в современных фотоинжекторах электронов используются фотокатоды, квантовый выход которых максимален при облучении лазерным излучением видимого или ультрафиолетового диапазонов. Таким образом, для формирования электронных пучков с наперед заданным распределением плотности пространственного заряда необходимо облучать поверхность фотокатода профилированными во времени и пространстве лазерными импульсами видимого или УФ-диапазона.

В настоящей работе с использованием аналитических и численных методов определены оптимальные условия генерации третьей гармоники широкополосными чирпированными лазерными импульсами (оо-е синхронизм) на примере широко используемых нелинейных кристаллов ВВО, LBO, KDP и BiBO. Определены оптимальные условия для высокоэффективной генерации второй гармоники ое-е и ое-о типов. В работе рассмотрено влияние несогласованности спектральных фаз у взаимодействующих импульсов первой и второй гармоник на эффективность преобразования.

Трехмерное численное моделирование выполнялось с помощью уравнений, представленных в [3]. В них учитываются дисперсия, дифракция и снос необыкновенной волны. Параметры моделирования: центральная длины волны первой гармоники 1034 (800) нм, ширина спектра FWHM 8 нм, центральная длина волны второй гармоники 517 (400) нм, спектральная ширина FWHM 4 нм. Форма амплитуды спектра и поперечное распределение интенсивности пучка выбраны супер-гауссовыми при $2N=8$. Пиковая интенсивность исходных неоптимизированных чирпированных импульсов выбиралась таким образом, чтобы нелинейная длина составляла около 0.5 см. Исходная длительность импульсов составляла около 30 пс. На рисунке показана зависимость относительной эффективности преобразования в третью гармонику от длины кристалла. Здесь W_{03} – энергия импульса третьей гармоники, полученная при взаимодействии импульсов с оптимальным соотношением частотных чирпов, W_{DC} – энергия импульса третьей гармоники при обычном взаимодействии чирпированных импульсов, W_{FL} – энергия импульса третьей гармоники при взаимодействии Фурье-ограниченных импульсов соответствующей длительности.

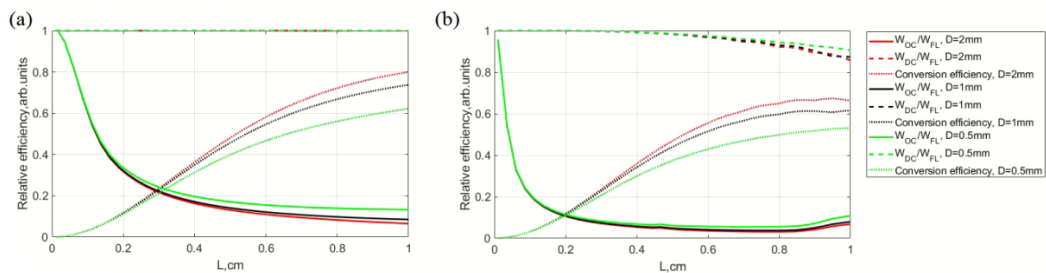


Рисунок. Относительные эффективности преобразования в зависимости от длины кристалла при генерации третьей гармоники в кристалле ВВО, (а) центральные длины волн 1034 и 517 нм, (б) центральные длины волн 800 и 400 нм

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление №6 “Ядерная и радиационная физика”. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (проект № 0030-2021-0015).

[1] Kuzmin I.V. et al., *Las. Phys. Lett.*, **16**, №1, p. 015 001, (2018).

[2] Loisch G. et al., *Phys. Rev. Lett.* **121**, №6, (2018).

[3] Kuzmin I.V., Mironov S.Yu., Martyanov M.A., Potemkin A.K., Khazanov E.A., *Appl. Opt.*, **60**, №32, 10062-10069, (2021).

ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ФОТОНИКИ

ПЛАЗМОННЫЕ САМОКОМПЛЕМЕНТАРНЫЕ НАНОАНТЕННЫ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО СОГЛАСОВАНИЯ ИМПЕДАНСА В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

Асадулина С.М.¹, Инти Л. Руис², Хуан Д. Баэна²

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Национальный университет Колумбии, Колумбия

В этой работе мы обсуждаем конструкцию плазмонных самокомплементарных наноантенн, которые поддерживают постоянный входной импеданс в широком диапазоне частот среднего инфракрасного диапазона за счет восстановления справедливости принципа Бабинне.

Ключевые слова: самокомплементарные антенны, оптические наноантенны, широкополосное согласование импеданса.

Оптические антенны и резонансные структуры становятся все более популярными благодаря их способности усиливать электрическое поле, что может быть использовано в различных нанофотонных приложениях [1]. Эти устройства предлагают такие преимущества, как поляризационная чувствительность, возможность настройки, направленность и небольшие размеры. Наноантенны в терагерцовом диапазоне являются перспективным направлением для создания компактных и высокопроизводительных квазиоптических устройств, однако для их использования необходимо решить ряд проблем, таких как повышение точности изготовления, энергоэффективность, интеграция с другими наноразмерными устройствами и широкополосная работа. В этой работе мы обсуждаем проблему, связанную с обеспечением широкополосной работы в конструкции антенны. В открытии Мушиаке о самокомплементарных плоских антенн упоминалось о постоянном входном импедансе [2, 3]. Кроме того, конструкция антенны дополнительно удовлетворяла принципу двойственности Бабинне, обеспечивающему возможность переключения между двумя ортогональными поляризациями [4, 5]. Этот эффект возможен из-за существования как минимум двух последовательных резонансов метаповерхности.

Мы предлагаем самодополняющую антенну типа «лепесток» с почти постоянным входным сопротивлением в широком диапазоне средних инфракрасных частот от 50 до 220 ТГц. Рассматриваемая антенна была изготовлена из идеального электрического проводника (рис. а) и диэлектриков (рис. б) с высокой диэлектрической проницаемостью, таких как серебро и кремний. Толщина антенны, изготовленная из диэлектриков, t была подобрана таким образом, чтобы было достигнуто широкополосное согласование импеданса на уровне 188 Ом.

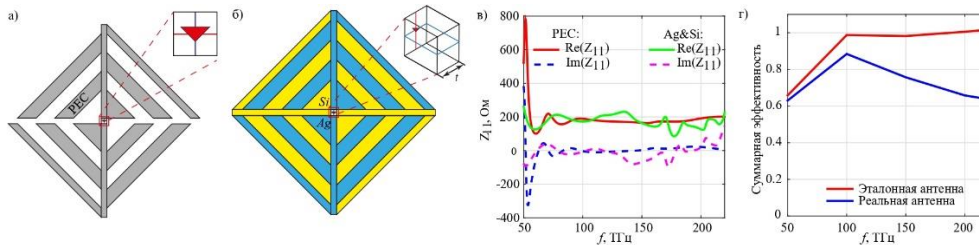


Рисунок. Структура самокомплементарных антенн типа «лепесток»: (а) Эталонная антенна и (б) реальная антенна; (в) Входные сопротивления (действительная и мнимая части) для исследуемых структур в зависимости от частоты. Для антенны из PEC красная линия соответствует действительной части, а синяя - мнимой. Для антенны из Ag&Si зеленая линия - действительная часть, а пурпурная - мнимая. (г) Суммарная эффективность идеальной антенны, изготовленной из PEC (красная линия), и реальной антенны, изготовленной из серебра и кремния (синяя линия), зависящая от частоты

Исследуемые структуры были смоделированы с использованием программного обеспечения CST Microwave Studio в модуле Frequency Solver. Моделирование было сосредоточено на входном импедансе антенны, изготовленной из идеального электрического проводника (PEC) без толщины. Полученные результаты для реальной антенны, хорошо согласуются с результатами, полученными для эталонной антенны из идеального электрического проводника. В частности, моделирование показывает, что действительная часть входного импеданса близка к 188 Ом, а мнимая часть близка к нулю. Также было отмечено, что общая эффективность реальной антенны не опускается ниже 0.6, что свидетельствует о хороших характеристиках. Этот результат важен для проектирования плазмонных наноантенн, где постоянное входное сопротивление в широком диапазоне частот является серьезной проблемой.

[1] Mora-Ventura, Brhayllan, et al. *Journal of Photonics for Energy*, 6.2, (2016).
 [2] Mushiake Y., *J. Inst. Elec. Engrs. Japan*, **69**, №3, 87-88, (1949).
 [3] Mushiake Y. Springer Science & Business Media, (2012).
 [4] Nakata Y., et al, *Phys. Rev. B*, **88**, 205138, (2013).
 [5]. Booker H.G, *J. Inst. Electr. Eng. IIIA*, **93**, 620, (1946).

**ЭЛЕКТРОННЫЕ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА
МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСНЫХ СТРУКТУР MOF-76
НА ОСНОВЕ ЛАНТАНОИДОВ**

**Бардакова А.В., Борисик А.К., Барахоева К.А.,
Рудакова А.В., Буланин К.М., Емелин А.В.**

Санкт-Петербургский государственный университет,

Лаборатория «Фотоактивные нанокompозитные материалы», Санкт-Петербург, Россия

В работе исследовано влияние "биографических" гостевых молекул на оптические свойства металл-органических каркасных структур с топологией MOF-76 на основе лантаноидов.

Ключевые слова: металл-органические каркасные структуры, лантаноиды, перенос энергии, люминесценция, гостевые молекулы, MOF-76.

Металл-органические каркасные структуры (МОКС) представляют собой класс твёрдых материалов, образованных координационной связью между металлическими центрами (ионами или кластерами металлов) и органическими линкерами с формированием одно-, двух- или трехмерных координационных сеток, содержащих пустоты — поры [1]. МОКСы на основе лантаноидов обладают яркими люминесцентными свойствами за счет реализации эффекта антенны. Поэтому в качестве объекта исследования была выбрана структура MOF-76, которая впервые была описана в 2005 году группой О. Яги, и в которой ионы лантаноида связываются с помощью 1,3,5- трикарбоксибензойной кислоты (BTC) с формированием тетрагональной решетки [2].

Целью данной работы являлось исследование влияния «биографических» гостевых молекул на оптические свойства металл-органических каркасных структур (МОКС) с топологией MOF-76 на основе лантаноидов.

В работе исследуется серия МОКС топологии MOF-76, образованная 7-координированными ионами лантаноидов Ln^{3+} и аниона тримезиновой кислоты BTC^{3-} (рисунок).

Все образцы были охарактеризованы методами порошковой рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии.

Были описаны оптические свойства МОКС с топологией MOF-76 на основе лантаноидов методами спектроскопии диффузного отражения, люминесцентной спектроскопии и инфракрасной спектроскопии, а также разработана методология удаления/замещения гостевых молекул, остающихся в пористой структуре после проведения синтеза.

Главная задача данной работы заключалась в исследовании влияния удаления/замещения гостевых молекул из пор МОКС с топологией MOF-76 на основе лантаноидов на их оптические и колебательные свойства.

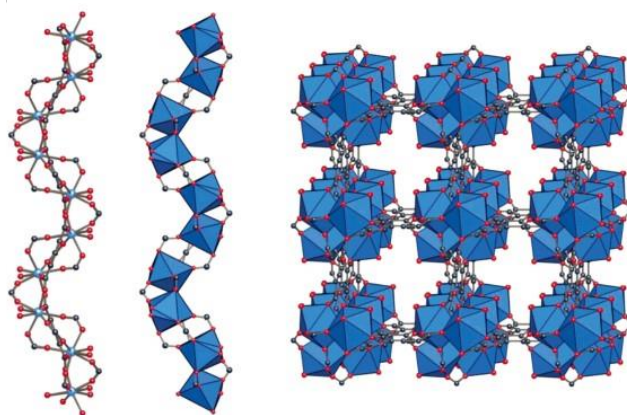


Рисунок. Структура MOF-76

Исследование выполнено при финансовой поддержке СПбГУ (id 94030186). Благодарим ресурсные Центры СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования» и «Геомодель» за помощь в характеристике образцов.

[1] Batten S.R. et al, *Pure and Applied Chemistry*, **85**, №8, 1715-1724, (2005).

[2] Rosi N.L. et al, *Journal of the American Chemical Society*, **127**, №5, 1504-1518, (2005).

**ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ИОНОВ РЗЭ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ,
КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА
ГЕТЕРОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕРЕФТАЛАТОВ**

Богачев Н.А., Тойка Ю.Н., Буторлин О.С., Петрова А.С., Мерещенко А.С.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Проведено исследование металл-органических каркасных соединений (МОКС) на основе терефталат-иона и ионов редкоземельных элементов (РЗЭ) с общей формулой $(Ln_xLn'_{1-x})_2(1,4-bdc)_3 \cdot nH_2O$ (где $Ln = Eu, Tb$; $Ln' = Y, La, Gd, Yb, Lu$).

Ключевые слова: металл-органические каркасные структуры, люминесценция, терефталаты.

Синтез соединений осуществлен напрямую при смешении растворов солей РЗЭ и $Na_2(1,4-bdc)$. Полученные соединения формируют игольчатые, дендритоподобные кристаллы, со средним размером до 120 мкм. Синтезированные соединения МОКС можно разделить на три группы по эффекту влияния природы РЗЭ на фазовый состав: группа соединений, содержащие иттрий, лантан и гадолиний; группа соединений, содержащая иттербий; группа соединений, содержащих ионы лютеция. Для серий МОКС $(Ln_xLn'_{1-x})_2(1,4-bdc)_3 \cdot nH_2O$ ($Ln = Eu, Tb$; $Ln' = Y, La, Gd$) обнаружено образование тетрагидратов терефталатов $(Ln_xLn'_{1-x})_2(1,4-bdc)_3 \cdot 4H_2O$, соответствующих кристаллической фазе $Ln_2(1,4-bdc)_3 \cdot 4H_2O$ ($Ln = Ce-Yb$). Для серий терефталатов, одновременно содержащих трехвалентные ионы лютеция и европия или тербия, на фазовый состав влияет концентрация РЗЭ: в зависимости от соотношения редкоземельных элементов и концентрации реагирующих веществ, смешанные терефталаты могут кристаллизоваться в виде тетрагидратов терефталатов $(Ln_xLn'_{1-x})_2(1,4-bdc)_3 \cdot 4H_2O$, декагидратов терефталатов $(Ln_xLn'_{1-x})_2(1,4-bdc)_3 \cdot 10H_2O$, безводных терефталатов $(Ln_xLn'_{1-x})_2(1,4-bdc)_3$ или смеси различных кристаллических фаз. Фазовый состав соединений для соединений серии, содержащей иттербий, зависит от температурного режима синтеза. При синтезе в условиях комнатной температуры около 20°C соединения терефталатов европия-иттербия и тербия-иттербия кристаллизуются в безводной фазе, в то время как при небольшом увеличении температурного режима синтеза (около 25°C), происходит кристаллизация тетрагидрата. Различие полученных результатов для разных групп соединений объясняется различием в размерах и характерных координационных числах ионов редкоземельных элементов. Выявлено, что тонкая структура полос люминесценции определяется кристаллической фазой соединения и центральным ионом (европий или тербий) и не зависит от концентрации люминесцирующего иона в пределах одной фазы [1, 2]. Времена жизни возбужденного состояния зависят от концентрации иона-заместителя в терефталате, а также от типа фазы. Эта зависимость объясняется наличием двух механизмов тушения люминесценции, имеющих место в исследуемых соединениях. Первый механизм связан с увеличением вероятности переноса энергии между люминесцирующими ионами при увеличении их концентрации и в большей степени проявляется для соединений тербия. Второй механизм тушения связан с переносом энергии на высокоэнергетические валентные колебательные уровни О-Н молекул воды, координированной к ионам европия или тербия в соединениях. Полученные результаты позволяют синтезировать люминофоры на основе европия и тербия, характеризующиеся высокими квантовыми выходами люминесценции: был синтезирован образец состава $(Tb_{0,1}Lu_{0,9})_2(1,4-bdc)_3 \cdot 1,4H_2O$, имеющий высокий квантовый выход, составляющий 95%.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-73-10040, <https://rscf.ru/project/22-73-10040/>. Исследования проведены с использованием оборудования ресурсных центров Научного парка СПбГУ «Нанотехнологии», «Оптические и лазерные методы исследования вещества» и «Термогравиметрические и калориметрические методы исследования», «Криогенный отдел», «Методы анализа состава вещества», «Рентгенодифракционные методы исследования», «Инновационные технологии композитных наноматериалов», «Магнитно-резонансные методы исследования».

[1] Nosov V.G., Kupryakov A.S., Kolesnikov I.E., Vidyakina A.A., Tumkin I.I., Kolesnik S.S., Ryazantsev M.N., Bogachev N.A., Skripkin M.Y., Mereshchenko A.S., *Molecules*, **27**, 5763, (2022).

[2] Nosov V.G., Toikka Y.N., Petrova A.S., Butorlin O.S., Kolesnikov I.E., Orlov S.N., Ryazantsev M.N., Kolesnik S.S., Bogachev N.A., Skripkin M.Y., Mereshchenko A.S., *Molecules*, **28**, 2378, (2023).

НАНОЛЮМИНОФОРЫ YAG:Ce,Gd ДЛЯ СОЗДАНИЯ БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ ПОЛИМЕРНО-СОЛЕВЫМ МЕТОДОМ

Булыга Д.В.¹, Евстропьев С.К.^{1,2,3}, Гаврилова Д.А.^{1,3}, Мягких М.К.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

Проведено исследование фазового состава люминесцентных свойств порошков YAG:Ce,Gd с различным содержанием гадолиния. По диаграмме цветности была определена оптимальная концентрация гадолиния для создания белого светодиода с длиной волны эмиссии 470 нм.

Ключевые слова: белые светодиоды, нанокристаллы, люминесценция.

Порошки алюмоиттриевого граната, легированного церием (YAG:Ce) широко используются в качестве сцинтилляционных материалов, а также люминофоров для коррекции излучения светодиодов [1]. Создание дефектов в структуре такого материала позволяет изменять спектр люминесценции в зависимости от поставленной задачи, например, для создания источника белого света на основе светодиодов с длиной волны эмиссии 350–450 нм. Введение ионов гадолиния в матрицу YAG:Ce приводит к заметному длинноволновому сдвигу спектра люминесценции [2].

Целью работы является синтез серии образцов нанолюминофоров YAG:Ce,Gd полимерно-солевым методом и исследование их фазового состава и люминесцентных свойств. Полимерно-солевой метод позволяет синтезировать оксидные нанокристаллические материалы со средним размером частиц 20–60 нм и позволяет снизить температуру синтеза и расход электроэнергии за счёт использования органического топлива – поливинилпирролидона (ПВП) [3].

В ходе работы была получена серия образцов YAG:Ce,Gd с 0,5 масс. % церия и различным содержанием гадолиния, температура синтеза – 1000 °С. Для образцов было принято обозначение YAG-X, где X – процент атомов иттрия, замещённых на гадолиний. Согласно данным рентгенофазового анализа (рис. а) образцы с замещением иттрия на гадолиний до 30% полностью состоят из фазы YAG, при больших замещениях наблюдается образование фазы GdAlO₃. При проценте замещения близком к 100 образец состоит из нестабильной фазы алюмогадолиниевого граната (GAG). Полученный результат может объясняться наличием ионов церия и иттрия в кристаллической решетке, стабилизирующих структуру GAG, а также низкой температурой синтеза, что является особенностью полимерно-солевого метода. На рис. б показана диаграмма цветности излучения синтезированных порошков. Спектры излучения образцов YAG-30 и YAG-40 оптимальны для создания источника белого света на основе светодиода с длиной волны излучения 470 нм.

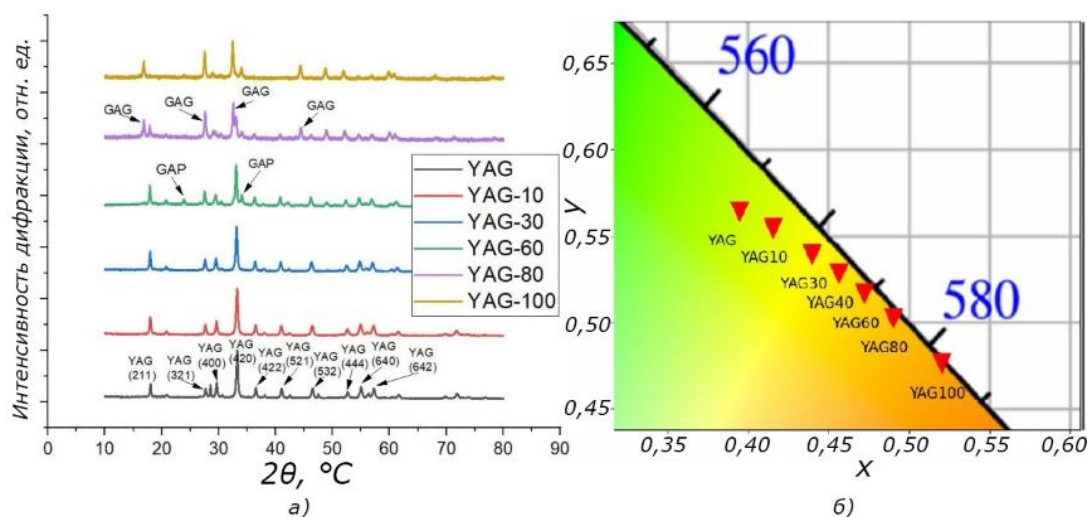


Рисунок. а) Рентгеновские дифрактограммы (θ – угол Брэгга); б) Диаграмма цветности излучения порошков YAG:Ce,Gd

Таким образом, в ходе работы была показана возможность синтеза люминофоров YAG:Ce,Gd и GAG:Ce полимерно-солевым методом, также была определена оптимальный процент замещения иттрия на гадолиния для создания источника белого света (30–40 %).

[1] Kim V.K., Zakharov A.I., Chashchin V.A., *Glass Ceram.*, **71**, 64–67, (2014).

[2] Kottaisamy M. et al., *Mater. Res. Bull.*, **43**, 1657–1663, (2008).

[3] Bulyga D.V. et al., *Mater Sci Eng B.*, **285**, 115980, (2022).

ВЛИЯНИЕ EDTA НА РОСТ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА KDP

Вильченко С.А.¹, Грибко В.В.²

¹ННГУ им. Н. И. Лобачевского, физический факультет, кафедра кристаллографии и экспериментальной физики, Нижний Новгород, Россия;

²Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

В работе приводится исследование кинетики роста кристалла KDP и ряд его физических характеристик свойств после добавления этилендиаминтетрауксусной кислоты в ростовой раствор.

Ключевые слова: KDP, EDTA, мощные лазерные системы.

Кристаллы дигидрофосфата калия (KDP) активно используются в мощных лазерных системах (УФЛ-2М, NIF, GEKKO XII и др.) как преобразователи частоты и модуляторы излучения. Данные установки требуют оптические элементы, линейный размер которых составляет около 0.5 м. Для выращивания таких кристаллов используют скоростные методики роста [1, 2]. Исследования показали, что технологии скоростного роста более чувствительны традиционных моделей к наличию в ростовых растворах примесей трехвалентных металлов (например, Al^{3+} , Fe^{3+}). Известно, что для уменьшения влияния на процесс роста таких примесей влияет добавление комплексонов в ростовой раствор, в частности – этилендиаминтетрауксусной кислоты (EDTA), из-за этого возникает интерес детального изучения влияния EDTA на морфологию и свойства кристаллов.

Для исследования были выбраны следующие концентрации примеси в растворе: 0, 0.001, 0.005, 0.015, 0.02 мол. %, малость концентрации EDTA является следствием низкой степени растворимости в воде.

В ходе работы проведен анализ изменения кинетики роста кристалла, при добавлении в него EDTA. Были установлены зависимости скорости роста граней кристалла от величины переохлаждения раствора. Из полученных данных следует, что добавление EDTA ведет к уменьшению мертвой зоны и увеличению скорости роста грани призмы в зависимости от переохлаждения.

В ходе работы был выращен кристалл KDP с добавлением EDTA концентрацией 0.005 мол %. Рост происходил в кристаллизаторе объемом 10 л скоростным методом профилированного заданным образом ориентированного роста. Полученный кристалл имел размеры $80 \times 80 \times 56$ мм³ и после обработки был подвергнут ряду исследований. Были получены спектры пропускания выращенного кристалла (рисунок), где T – коэффициент пропускания, λ – длина волны. Исследование проводилось на спектрофотометре UV-3600i Plus.

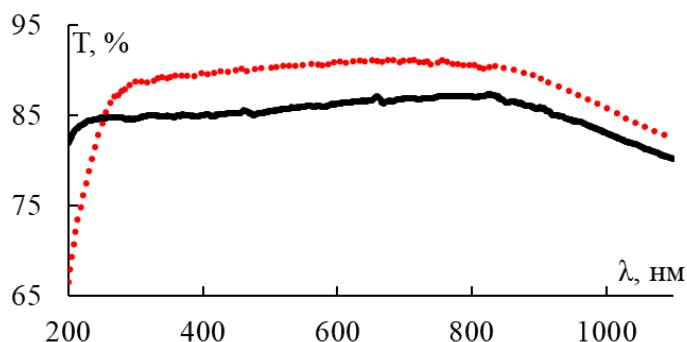


Рисунок. Спектры пропускания кристалла, выращенного из раствора с добавлением EDTA (красный) и без EDTA (черный)

Видно, что при добавлении EDTA у кристалла KDP увеличился порог пропускания в пределах 5 %, но при длинах волн 200-250 нм образовалась «яма».

Методом рентгеноструктурного анализа на рентгеновском монокристалльном дифрактометре Oxford Diffraction Gemini S была исследована структура полученного кристалла. Дифракционные картины, снятые как с грани призмы, так и с грани бипирамиды, показали, что после добавления EDTA параметры решетки выращенного кристалла KDP меняется в пределах погрешности относительно табличных значений, что может говорить о том, что примесь не изменяет и не входит в структуру кристалла.

Приведенные результаты показывают потенциальную возможность использования EDTA в методиках скоростного роста кристаллов группы KDP.

[1] Zaitseva N., Carman L., *Rapid Growth of KDP-type Crystals*, (2001).

[2] Беспалов В.И., Бредихин В.И., Ершов В.П., Кацман В.И., Киселева Н.В., Кузнецов С.П., *Квантовая электроника*, **9**, №11, 2343-2345, (1982).

**ВЛИЯНИЕ ФОТОСТИМУЛИРОВАННОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ НА
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ ИОНОВ ЭРБИЯ В ОКСИДНЫХ И
ФТОРИДНЫХ МАТРИЦАХ**

Жаров Д.А., Шурухина А.В., Рудакова А.В., Емелин А.В., Рябчук В.К.

Санкт-Петербургский государственный университет,

лаборатория «Фотоактивные нанокompозитные материалы», Санкт-Петербург, Россия

Данная работа посвящена исследованию оптических и люминесцентных свойств и процессов в оксидных и фторидных матрицах, допированных ионами лантаноидов, и влиянию облучения на такие системы.

Ключевые слова: фотоактивные материалы, люминесценция лантаноидов, фотостимулированное дефектообразование.

Трёхвалентный ион эрбия (Er^{3+}), как и другие трёхвалентные ионы лантаноидов (Ln^{3+}), может выступать в качестве активатора для фото- и апконверсионных люминофоров. Уникальные свойства таких люминофоров обусловлены нарушением правил Лапорта – запрещённые f-f переходы в ионах Ln^{3+} могут быть частично разрешены в твердотельных матрицах. Интенсивность таких оптических переходов зависит как от кристаллической структуры, так и от наличия собственных и несобственных дефектов матрицы, что открывает возможность для управления люминесценцией путём внедрения в матрицу различных примесей.

Матрицы для таких люминофоров могут быть как оптически активны (например, оксиды), так и оптически неактивны (например, фториды) относительно взаимного расположения границы фундаментального поглощения самой матрицы и коротковолновой границы спектра источника УФ-облучения.

В ряде работ было показано, что УФ-облучение оптически активной матрицы диоксида циркония ZrO_2 , допированного ионами Er^{3+} и Yb^{3+} , изменяет интенсивность соответствующих f-f полос поглощения, а также установлено, что данное изменение поглощения коррелирует с изменением поглощения фотоиндуцированных дефектов в матрице [1].

В данной работе проведено комплексное исследование влияния УФ-облучения на f-f люминесценцию ионов Er^{3+} в оксидных (ZrO_2 и La_2O_3) и фторидных (LaF_3 и YF_3) матрицах. Экспериментально установлено как увеличение (для фторидных матриц), так и уменьшение (для оксидных матриц) интенсивности люминесценции, вызванное УФ-облучением дисперсных образцов. Предложен механизм установленного эффекта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (Pure ID 94030186). Авторы выражают благодарность ресурсным центрам «Рентгенодифракционные методы исследования», «Геомодель» и «Нанофотоника» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета.

[1] Khabibrakhmanov R., Shurukhina A., Rudakova A. et al., *Chem. Phys. Letters*, **742**, 137136, (2020).

УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ И ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ДИФРАКЦИОННЫМИ ЖК ЭЛЕМЕНТАМИ

Комяк К.Г., Кабанова О.С., Мельникова Е.А., Рушнова И.И., Толстик А.Л.

Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

Рассмотрены два вида дифракционных структур в нематическом жидком кристалле: с чередующейся твист и планарной ориентациями директора и ортогональной твист-твист ориентацией. Продемонстрировано управление дифракционной эффективностью и поляризациями дифрагированных пучков посредством внешнего электрического поля.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, дифракционная эффективность, поляризация.

Жидкие кристаллы (ЖК) ввиду своих уникальных свойств таких, как тонкий оптический слой и высокая анизотропия, считаются перспективными электрооптическими материалами. Они широко используются в электрооптических устройствах, осуществляющих отображение информации, на их основе создаются волноводные структуры, дифракционные решётки и q-пластины, формирующие сингулярные пучки [1-3]. Создание ЖК элементов, характеризующихся технологичностью производства, компактностью, низкими управляющими напряжениями и малой стоимостью, остается актуальной задачей фотоники на протяжении последних двух десятилетий.

В настоящей работе продемонстрированы ЖК-ячейки с двумя различными типами ориентации директора ЖК, созданные методом текстурированной фотоориентации с использованием азокрасителя. В первом случае имеем чередование твист и планарной ориентаций директора, во втором случае была создана структура типа «ёлочка» с ортогональной твист-твист ориентацией директора ЖК. Решётка с твист-планарной ориентацией директора представляет собой чередование доменов с планарной и твист-ориентациями с углом закрутки директора ЖК $\beta=90^{\circ}$. ЖК-решётка с ортогональной твист-твист ориентацией состоит из чередующихся доменов с противоположно закрученными ориентациями директора ЖК с углами закрутки $\beta_1=+45^{\circ}$, $\beta_2=-45^{\circ}$. Толщина ЖК-слоя в изготовленных структурах была 20 мкм, период решётки 20 или 40 мкм.

Зарегистрированные картины дифракции и поляризационные микрофотографии подтвердили формирование на подложках ячеек бинарной ориентации директора ЖК, позволившей создать дифракционные структуры. При включении управляющего напряжения происходила переориентация директора ЖК и раскрутка спирали в случае твист ориентации. При этом происходило изменение контраста дифракционной структуры, которая стиралась при напряжениях более 10 В.

Исследована зависимость дифракционной эффективности от напряжения и построены полярные поляризационные диаграммы для прошедшего и дифрагированного света. Установлено, что при толщине нематического ЖК слоя 20 мкм существуют три характерных значения напряжения: 1 В, 2 В, 3 В. Напряжение 1 В является пороговым, при напряжении ~ 2 В начинается раскрутка спирали ЖК, а напряжение ~ 3 В является оптимальным, при котором достигается максимальная дифракционная эффективность. Показано, что в отсутствие напряжения каждую из изготовленных ЖК-решёток можно рассматривать как две независимые амплитудные решётки, которые представляют собой чередование доменов с одинаковой ориентацией директора, при этом значение дифракционной эффективности $\sim 20\%$ отвечает суммарной дифракционной эффективности двух амплитудных решеток с прямоугольным профилем штриха. С увеличением напряжения нарушается твист структура жидкого кристалла и ЖК-решётка начинает проявлять свойства тонкой фазовой решётки с более высокой дифракционной эффективностью порядка 35%.

Анализ поляризационных диаграмм позволил установить зависимость поляризации прошедшего и дифрагированного излучения от напряжения. В отсутствие напряжения при падении на ЖК-решётку с твист-планарной ориентацией директора излучения с вертикальной или горизонтальной линейной поляризацией реализуется поворот плоскости поляризации прямо прошедшего и дифрагированного излучения на величину, близкую к 45° , причем их поляризации становятся взаимно ортогональными. Для ЖК-решётки с твист-твист ориентацией директора прямо прошедшее излучение имеет поляризацию, совпадающую с поляризацией падающего излучения, а в первом порядке дифракции поляризация ортогональна. При оптимальном напряжении твист-домен перестает изменять состояние поляризации падающего излучения, но поляризации соседних порядков дифракции по-прежнему остаётся ортогональными.

Таким образом, в работе проведена оптимизация технологии создания дифракционных ЖК элементов и определены условия достижения максимальной дифракционной эффективности, близкой к предельной. Продемонстрировано управление внешним электрическим полем интенсивностью и поляризацией прошедшего и дифрагированного излучения, при этом поляризация с увеличением напряжения может изменяться от линейной до круговой.

[1] Melnikova E.A., Gorbach D.V., Slussarenko S.S., Muravsky A.A., Tolstik A.L., Slussarenko S.S. Jr., *Opt. Communications*, **522**, 128661-128676, (2022).

[2] Melnikova E.A., Kabanova O.S., *Vestnik BGU Ser. 1 Fiz. Mat. Inform.*, **2**, 48–51, (2016).

[3] Kamiak K.G., Kabanova O.S., Rushnova I.I. et al., *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **85**, 1496–1500, (2021).

**НАНОСТЕРЖНИ III-N МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ
МИКРОСВЕТОДИОДОВ: СИНТЕЗ И СВОЙСТВА**

Котляр К.П.^{1,2}, Гридчин В.О.^{1,2}, Сошников И.П.^{1,2}, Цырлин Г.Э.¹

¹СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

В работе демонстрируется возможность увеличения интенсивности люминесценции от мез с наностержнями III-N материалов по сравнению с планарной светодиодной структурой и проводится сравнение оптических свойств различных III-N 1-D наноструктур для создания микросветодиодов.

Ключевые слова: микросветодиоды, наностержни, нитридные материалы.

Одним из перспективных направлений развития светодиодной технологии является уменьшение размеров светоизлучающих кристаллов для создания дисплеев с более высокой яркостью и плотность пикселей (технология MicroLED). Вероятным способом реализации этой идеи является использование одномерных (1-D) наноструктур, таких как наностержни, нитевидные нанокристаллы и гетероструктуры на их основе [1]. Настоящая работа посвящена исследованию оптоэлектронных свойств GaN наностержней с квантовыми точками InGaN, мез различного размера, получаемых методом «сверху-вниз» и определению перспектив их применения для создания микросветодиодов. Формирование массива наностержней проводилось в результате плазмохимического травления планарной светодиодной гетероструктуры через масочное покрытие на её поверхности – наночастицы Ni.

Исследование оптоэлектронных свойств образцов показало снижение интенсивности фотолюминесценции структур с наностержнями по сравнению с исходной планарной гетероструктурой вследствие образования радиационных дефектов на боковой поверхности наностержней. Решить эту проблему позволяет прецизионное травление боковой поверхности наностержней в водном растворе KOH. Такая обработка позволяет увеличить интенсивность фотолюминесценции в 3 раза по сравнению с исходной планарной гетероструктурой и управлять диаграммой направленности излучения из структуры. Прототип светодиода на основе массива наностержней демонстрирует увеличение интенсивности электролюминесценции по сравнению с планарной светодиодной мезой аналогичной площади (исследовались мезы разных площадей вплоть до 100 мкм²), что демонстрирует перспективность такого подхода для разработки микросветоизлучающих устройств.

Для сравнения люминесцентных свойств наностержней среди 1-D наноструктур - проведено исследование спектров фотолюминесценции массивов наностержней и нитевидных нанокристаллов InGaN и p-i-n InGaN/GaN выращенных методом "снизу-вверх" молекулярно-пучковой эпитаксией. При уменьшении засвечиваемой области до 1-2 мкм тенденция увеличения интенсивности фотолюминесценции от 1-D наноструктур в сравнении с планарной светодиодной гетероструктурой сохраняется. Это свидетельствует о возможности дальнейшей миниатюризации и переходу с помощью таких структур к технологии NanoLED.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (FSRM-2023-0004) и в части исследований связанных с нитевидными нанокристаллами - гранта РФФИ 23-22-00-349.

[1] Pan X., Song J., Hong H., Luo M., Nötzel R., *Optics Express*, **31**, №10, 15772-15778, (2023).

[2] Tsai Y.L., Lai K.Y., Lee M.J., Liao Y.K., Ooi B.S., Kuo H.C., He J.H., *Progress in Quantum Electronics*, **49**, 1-25, (2016).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЁНОК В МИКРОРЕЗОНАТОРАХ ИЗ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА ЛЕГИРОВАННЫХ ПЛАЗМОННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ CuS

Лунёв А.Ю.¹, Михарев Е.А.¹, Сидоров А.И.^{1,2}

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

На основе численного моделирования исследованы оптические свойства оптические свойства композитов силикатное стекло – плазмонные наночастицы CuS. Исследована динамика генерации керровских частотных гребенок в сферических микрорезонаторах из исследуемого композита.

Ключевые слова: микрорезонаторы, плазмонные наночастицы, частотные гребенки.

Резонаторы с модами шепчущей галереи представляют собой оптические устройства, которые удерживают свет в круглых или сферических структурах за счет непрерывного полного внутреннего отражения. В последнее время полупроводниковые нанокристаллы, обладающие локализованным поверхностным плазмонным резонансом, вызвали значительный интерес как ценные инструменты в различных областях.

Оптические свойства плазмонных наночастиц CuS могут быть описаны с помощью теории Друде-Зоммерфельда и были рассчитаны на основе данных, представленных в [1]. Оптические свойства многокомпонентной среды описывается приближением эффективной среды [2]. Эффективные комплексная диэлектрическая функция и нелинейная восприимчивость третьего порядка исследуемого композита были рассчитаны в приближении Максвелла-Гарнетта. Исследованные композиты проявляют локализованный поверхностный плазмонный резонанс в ближней инфракрасной области. Так, для наночастиц с радиусом 15 нм максимум резонанса наблюдается на длине волны 1120 нм. Также для исследованного композита наблюдается небольшое увеличение эффективной нелинейной восприимчивости вблизи плазмонного резонанса.

Моды и дисперсионные характеристики микросферических резонаторов были рассчитаны методом конечных элементов. Было проведено моделирование сферических микрорезонаторов различных размеров. Для дальнейших расчетов был выбран резонатор радиусом 160 мкм, для которого рассчитанный FSR составляет 205 ГГц, что представляет особый интерес для применения в ВОЛС. Генерация частотной гребенки в микрокативах была проанализирована путем решения уравнения Лужиато-Лефевра с параметрами резонатора, извлеченными из моделирования МКЭ и расчета эффективной среды [3].

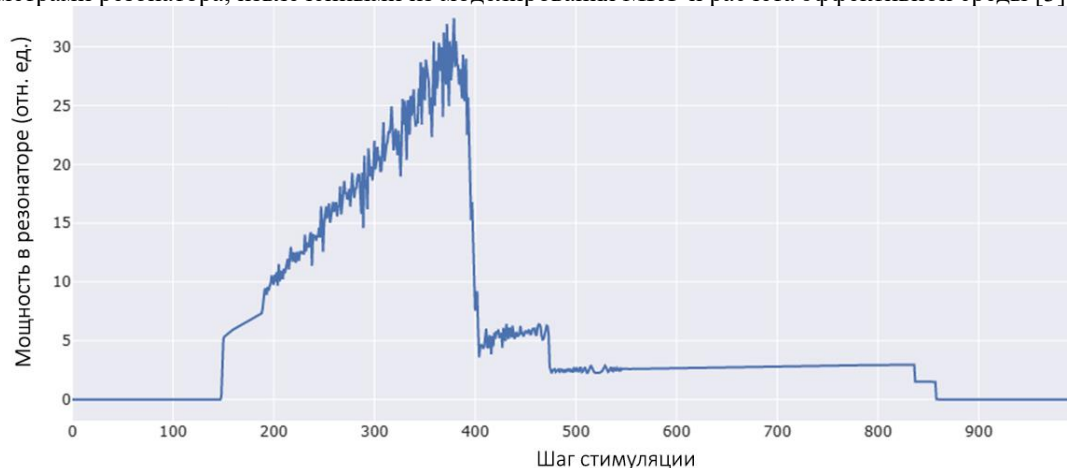


Рисунок. Внутррезонаторная мощность для микрорезонатора из силикатного стекла легированного наночастицами CuS

Резонатор, легированный плазмонными нанокристаллами CuS, демонстрирует более высокий нелинейно-оптический отклик вблизи плазмонного резонанса наночастиц. Кроме того, стабильный многосолитонный режим был достигнут в более широком диапазоне расстройки частоты излучения накачки по сравнению с микрорезонаторами из чистого стекла (рисунок). Внутррезонаторная мощность легированного резонатора ниже из-за меньшей добротности и влияния наночастиц на дисперсию резонатора.

[1] Xie Y., Carbone L., Nobile C., Grillo V., D’Agostino S., Della Sala F., *ACS nano*, **7**, 8, 7352-7369, (2013).

[2] Sipe J.E., & Boyd R.W., *Physical Review A*, **46**, 3, 1614, (1992).

[3] Lugiato L.A., Prati F., Gorodetsky M.L., & Kippenberg T.J., *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **376**, 2135, 20180113, (2018).

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ БЕНЗТИАЗОЛИЛБРОМФЕНОЛА
В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ

Парфёнова Е.В.¹, Слюсаренко Н.В.¹, Шабанова О.В.², Слюсарева Е.А.¹

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²Институт космических технологий КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

Исследованы люминесцентные свойства бензтиазолилбромфенола с большим Stokes-сдвигом, внедренного в функциональную полимерную матрицу на основе полиметилметакрилата. Данное соединение является перспективным для применения в качестве активной лазерной среды и создания солнечных концентраторов.

Ключевые слова: люминофоры, большой Stokes-сдвиг, люминесценция.

Ряд органических соединений обладают большим Stokes-сдвигом, возникающим за счёт переноса протона в возбужденном состоянии. Они поглощают в УФ-области и флуоресцируют в видимом спектральном диапазоне, что приводит к уменьшению потерь излучаемого света в результате реабсорбции и позволяет использовать более высокие концентрации веществ. Такие люминофоры, внедренные в функциональные полимерные матрицы, находят свое применение в оптоэлектронных устройствах [1], солнечных концентраторах [2], а также в качестве активной среды для лазеров [3].

В работе исследовалось соединение, рис. (а), предоставленное ООО Фирма «ОЛБО». В качестве функциональной полимерной матрицы был использован искусственный полимер полиметилметакрилат (ПММА), внедрение люминофора в который проведено методом полимеризации. Фотолюминесцентные свойства соединения исследованы методами стационарной и время-разрешенной флуоресцентной спектроскопии.

Спектры возбуждения и испускания люминесценции представлены на рис. (б). Спектр возбуждения лежит в УФ-области и имеет пик на 383 нм. Спектр люминесценции имеет максимум на 532 нм, который не зависит от длины волны возбуждения. Значение Stokes-сдвига составляет около 7500 см^{-1} , что является результатом внутримолекулярного переноса протона. Квантовый выход и время жизни люминесценции равны 32% и 3 нс соответственно. Анизотропия детектировалась в максимуме спектра люминесценции при возбуждении бензтиазолилбромфенола длиной волны 383 нм и составила 0,3.

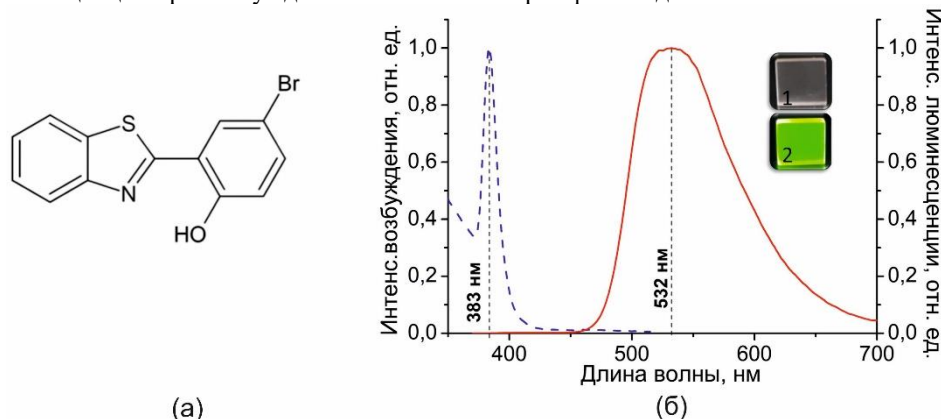


Рисунок. Структурная формула бензтиазолилбромфенола (а). Спектры возбуждения и люминесценции (б). Вставка: бензтиазолилбромфенол в составе полимерной матрицы при дневном свете (1) и при возбуждении УФ-излучением (2)

Таким образом, исследуемый образец обладает низким рассеянием, большим Stokes-сдвигом и существенным квантовым выходом люминесценции, имеет максимум возбуждения вблизи третьей гармоники Nd:YAG лазера и может быть рассмотрен в качестве перспективной лазерной среды, а так же для создания солнечных концентраторов.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030» для Сибирского федерального университета, проект «Создание новых люминесцентных материалов полифункционального назначения».

[1] Sala P.D., Buccheri N., Sanzone A. et al., *Chem. Commun.*, **55**, 3160-3163, (2019).

[2] Hora E., Robić M., Šimanović A. et al., *Dyes and Pigments*, **162**, 688-696, (2019).

[3] Massue J., Pariat Th., Vérité P.M. et al., *Nanomaterials*, **9**, 1093, (2019).

СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ КРИСТАЛЛА $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$ В ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДОВ $^5I_8 \rightarrow ^5F_3$ И 5F_2

Соколов В.В., Малаховский А.В., Сухачёв А.Л., Гудим И.А.

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

Измерены и исследованы поляризованные спектры поглощения кристалла $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$ в области $f-f$ переходов $^5I_8 \rightarrow ^5F_3$ и 5F_2 в функции от температуры в интервале 5-90 К.

Ключевые слова: $f-f$ электронные переходы, локальные свойства, мультиферроики.

Ион гольмия в кристалле $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$ находится в позиции с локальной симметрией D_3 вплоть до 5 К [1]. В работе [2] из магнитных измерений и расчета кристаллического поля, а в работе [3] из ЭПР спектра было показано, что основное состояние гольмия в $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$ это дублет E . Опираясь на эти данные, переходы из основного состояния идентифицированы на основании поляризации переходов, при использовании правил отбора в симметрии D_3 .

На рис. А и В представлены спектры поглощения переходов $^5I_8 \rightarrow ^5F_3$ и 5F_2 . Возбуждённые 5F_3 и 5F_2 состояния расщепляются в кубическом и тригональном полях следующим образом:

$$J = 2 \rightarrow E + T_2 \rightarrow E + (A_1 + E), \quad (1)$$

$$J = 3 \rightarrow A_2 + T_1 + T_2 \rightarrow A_2 + (A_2 + E) + (A_1 + E). \quad (2)$$

В ряде электронных переходов обнаружены расщепления, указывающие на локальные структурные искажения во время переходов. Переходы F_3, F_5 типа $E \rightarrow A$ не расщепляются, а переходы F_1 и G_1 , того же типа расщепляются (рис. А и В). Поляризации компонент расщепления перехода F_1 (рис. А) не соответствуют правилам отбора в симметрии D_3 , что может быть объяснено понижением симметрии до C_2 . Тогда происходит преобразование состояний:

$$E = A_1 + A_2, \quad A_1 = A_1, \quad A_2 = A_2. \quad (3)$$

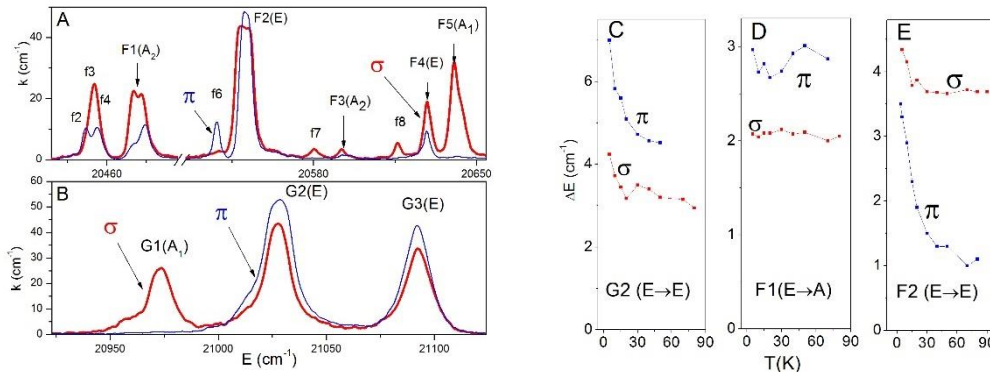


Рисунок. А и В - Поляризованные спектры поглощения (k) переходов $^5I_8 \rightarrow ^5F_3$ и 5F_2 при температуре 5 К в $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$. С, D и E - Зависимость расщепления линий поглощения G2, F1 и F2, в функции от температуры в $\text{HoAl}_3(\text{VO}_3)_4$

Из правил отбора для C_2 следует, что переходы из расщепленного дублета ($A_1 + A_2$) в синглетные состояния (A_1 или A_2) будут соответствовать $\sigma + \pi\sigma$ поляризованным линиям. При дальнейшем понижении симметрии все переходы разрешены в обеих поляризациях, т. е., будут две $\pi\sigma$ линии. Переход F_1 расщепляется на $\pi\sigma + \sigma + \pi$ линии. Расщепление одной из линий на π и σ линии объясняется зависимостью расщепления от поляризации падающего света.

Переход F_4 и G_3 (Рис. А и В) типа $E \rightarrow E$ не расщепляется, а переход F_2 и G_2 того же типа расщепляется на $\sigma + \pi + \pi + \sigma$ и $\pi + \sigma + \sigma + \pi$ линии соответственно. Наблюдаемые при этом чисто π поляризованные линии поглощения также связаны с зависимостью расщепления от поляризации света.

Наблюдающееся расщепление линий $f-f$ поглощения не является следствием статического искажения кристалла в основном состоянии, а вызвано искажением, возникающим в процессе поглощения света, о чём свидетельствует тот факт, что расщепления различны при различных переходах и варьируются от 1 до 7 cm^{-1} . Действительно, электронный переход происходит вследствие перемешивания основного и возбуждённого состояний оптическим возбуждением. Это может приводить к изменению взаимодействия атома с окружением, и к искажению локальной симметрии не только в возбуждённом, но и в основном состоянии. Зависимости величины расщепления от температуры представлены на рис. С-Е. Видно, что при некоторых переходах расщепление уменьшается с ростом температуры. Это может быть следствием изменения окружения редкоземельного иона в результате уменьшения влияния света на электронный переход, и кристалл при этих электронных переходах стремится вернуться к симметрии D_3 .

[1] Zhang H., et al., *J. Phys.: Condens. Matter*, **31**, №50, 505704-505714, (2019).

[2] Begunov A.I., Demidov A.A., Gudim I.A., and Eremin E.V., *JETP letters*, **97**, 528-534, (2013).

[3] Malakhovskii A.V., Sokolov V.V., et al., *Phys. Lett. A*, **383**, №16, 1960-1966, (2019).

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗЕРКАЛАХ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316L(N)-IG
СИСТЕМЫ СБОРА ИЗЛУЧЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ТР/ЛИФ В
ДИВЕРТОРЕ ИТЭР**

**Терещенко И.Б.^{1,2}, Самсонов Д.С.^{1,2}, Мухин Е.Е.^{1,2}, Коваль А.Н.¹,
Николаенко К.О.², Толстяков С.Ю.², Богачев Д.Л.², Солк С.В.³, Патрикеев В.Е.⁴,
Худолей А.Л.⁵, Кумейша П.Н.⁵, Марчий Г.В.¹, Григорьева О.А.⁶**

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²АО «Спектрал-Тех», Санкт-Петербург, Россия

³АО НИИ ОЭП, г. Сосновый Бор, Россия

⁴АО ЛЗОС, г. Лыткарино, Россия

⁵Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

⁶Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Использование крупногабаритных зеркал из нержавеющей стали 316L(N)-IG внутри вакуумного объема ИТЭР, является достаточно новым подходом и методы получения высококачественных оптических поверхностей на крупногабаритных зеркалах из этого материала мало изучены.

Ключевые слова: 316L(N)-IG, оптическая поверхность, диагностика томсоновского рассеяния.

Собирающие системы оптических диагностик ИТЭР должны обеспечить долговременную оптическую стабильность в условиях значительных эксплуатационных, радиационных, тепловых и прочих нагрузок. Такие системы содержат значительное количество зеркал, что предъявляет высокие требования к коэффициенту отражения каждого зеркала [1]. Оптическая диагностика томсоновского рассеяния (ТР) в комбинации с лазерно-индуцированной флуоресценцией (ЛИФ) в диверторе ИТЭР является одной из таких диагностик. Ввиду малого сечения взаимодействия для обеспечения достаточного уровня полезного сигнала необходимо зондировать плазму лазерным излучением высокой мощности, собрать рассеянное излучение в максимальном телесном угле и передать излучение с минимальными потерями до оптоволоконного жгута.

На качество передачи рассеянного излучения влияют две характеристики зеркал:

1. Стабильность формы поверхности и пространственного положения зеркальных поверхностей.
2. Состояние отражающей поверхности, которая характеризуется зеркальным и диффузным отражениями.

Отражательная способность зеркал определяется качеством поверхности зеркала и выбором отражающего покрытия. Использование крупногабаритных зеркал из нержавеющей стали 316L(N)-IG внутри вакуумного объема ИТЭР, является достаточно новым подходом и методы получения высококачественных оптических поверхностей на крупногабаритных зеркалах из этого материала мало изучены.

Оптическое качество поверхности зависит от способа ее образования. Сравнивались образцы из нержавеющей стали 316L(N)-IG малого размера, поверхность которых образована абразивным полированием, магнитореологическим полированием, а также алмазным точением слоя меди, присоединенного к нержавеющей стали методом горячего изостатического прессования. Оценивалась эффективность отражающей поверхности каждого типа с применением функции отражательной способности (ДФОС, англ. Bidirectional reflectance distribution function – BRDF), которая связана с функцией распределения рассеянного света (ФРПС, англ. Angle Resolved Scattering – ARS): $BRDF(\theta_s) = ARS(\theta_s)/\cos(\theta_s)$, где θ_s – а угол рассеяния [2].

[1] Samsonov D., Tereschenko I., Mukhin E., Gubal A., Kapustin Yu., et al., *Nuclear Fusion*, **62**, (2022).

[2] Schröder S., Duparré A., Coriand L., Tünnermann A., Penalver D., et al., *Optics Express*, **19**, (2011).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДА БОРА НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СТЕКЛОКЕРАМИК, АКТИВИРОВАННЫХ ХРОМОМ

Шерemet В.Г., Бабкина А.Н.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена изучению влияния концентрации оксида бора на спектральные свойства хромосодержащей стеклокерамики, полученной при высокотемпературной термообработке стекла, содержащего оксид бора. Получены спектры люминесценции для образцов с различными концентрациями оксида бора.

Ключевые слова: люминесценция, ионы хрома, боратная стеклокерамика.

Одной из перспективных областей оптического материаловедения является разработка стеклокерамик. Этот материал одновременно обладает достоинствами как кристаллов (высокий квантовый выход люминесценции, отсутствие неоднородного уширения спектральных линий), так и стекол (простота и скорость производства, меньшие затраты на оборудование и материалы). В настоящее время особенно активно изучаются кристаллические материалы, активированные ионами хрома. Использование именно ионов хрома обосновано высокими значениями квантового выхода и времени жизни люминесценции при условии нахождения хрома в высокосимметричном кристаллическом окружении [1]. Чтобы удовлетворить данному условию, необходимо правильно подобрать стеклообразователь и модификаторы при разработке материала. Целью данной работы было исследование влияния концентрации оксида бора B_2O_3 на спектральные свойства боратной стеклокерамики с хромом.

В ходе данной работы были исследованы стекла, имеющие состав матрицы $(25-0,25x) Li_2O - (25-0,25x) K_2O - (50-0,5x) Al_2O_3 - xB_2O_3$, где $x = 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90$ мол.%. Во всех стеклах сверх 100% были введены одинаковые добавки: 1 мол.% Sb_2O_3 , 0,1 мол.% Cr_2O_3 и 3,3 мол.% NH_4HF_2 . Образцы исходного стекла были термообработаны при температуре 450°C в течение 10 часов и 600°C в течение 1 часа для получения стеклокерамики.

Исследования спектральных свойств стеклокерамик проводились для каждого состава после синтеза и термообработки. Спектры люминесценции регистрировались с использованием спектрофлуориметра LS-50B (Perkin Elmer) в диапазоне длин волн 600-800 нм. Длина волны возбуждающего излучения составляла 532 нм. Полученные спектры люминесценции стеклокерамик с различным содержанием B_2O_3 представлены на рисунке ниже.

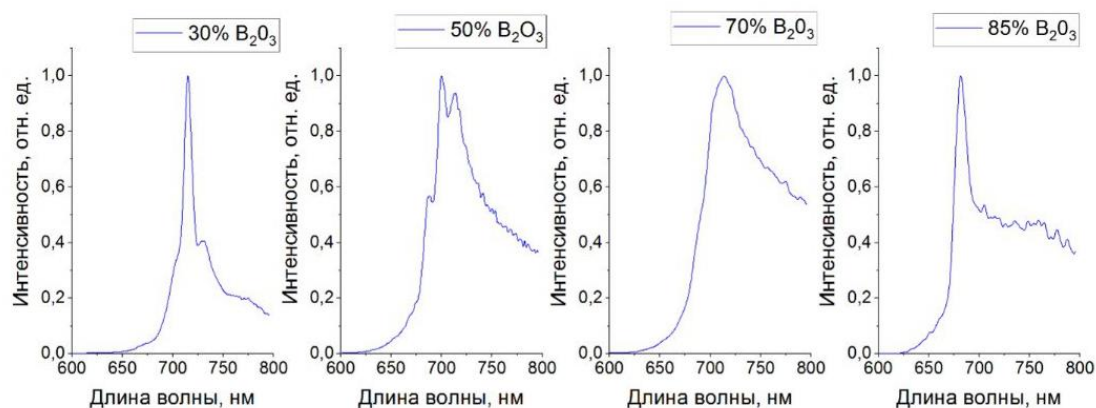


Рисунок. Спектры люминесценции для образцов с разным содержанием оксида бора

Спектры стеклокерамик с малыми концентрациями оксида бора (30-35 мол. %) содержат интенсивную полосу люминесценции в области 715 нм с плечами на 700 и 725 нм. В спектре люминесценции образцов стеклокерамик, содержащих 45-55 мол. % B_2O_3 наблюдается три полосы люминесценции в областях 675, 700 и 715 нм, соответственно. У образцов с более высоким содержанием оксида бора (60-75 мол. %) полоса люминесценции наблюдается в области 725 нм. При этом спектры образцов с наиболее высоким содержанием B_2O_3 (80-85 мол. %) содержат полосу люминесценции с максимумом в области 680 нм. Исходя из этого можно сделать вывод, что при увеличении концентрации оксида бора полоса люминесценции сдвигается в сторону меньших длин волн.

На основании проведенных исследований можно утверждать, что повышение процентного содержания оксида бора в составе стекла с хромом приводит к тому, что полосы люминесценции наблюдаются при более низких значениях длины волн.

[1] Reisfeld R., Kisilev A. et al., *J. of Non-Cryst. Solids*, **91**, 333, (1987).

АП-КОНВЕРСИЯ ВО ФТОРИДНЫХ МАТРИЦАХ
РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ С ЛАНТАНОИДАМИ Er/Yb

Шурухина А.В., Жаровов Д.А, Баринов Д.С,
Рудакова А.В., Рябчук В.К., Емелин А.В.

Санкт-Петербургский государственный университет,

Лаборатория "Фотоактивные нанокompозитные материалы", Санкт-Петербург, Россия

В данной работе исследована ап-конверсионная люминесценция фторидных матриц различной природы с парой Er/Yb с целью управления цветностью свечения.

Ключевые слова: ап-конверсия, фторидные матрицы, цветность.

Ап-конверсионные материалы, включающие в себя ионы лантаноидов и преобразующие ИК излучение в видимый и УФ свет, очень актуальны в последнее десятилетие. К матрицам для таких материалов предъявляется ряд требований: низкая энергия фононов, материалы должны быть оптически неактивны и химически инертны. По совокупности этих требований в нашей работе была выбрана иттрий-фторидная матрица NaYF_4 , допированная парой ионов лантаноидов $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$. Допирование образцов не превышало 10 ат.%. В ходе синтеза был получен следующий ряд образцов с постоянной концентрацией иона эрбия и варьируемым содержанием иттербия: $\text{NaY}_{0,9}\text{F}_4:\text{Er}_{0,1}$, $\text{NaY}_{0,7}\text{Yb}_{0,2}\text{F}_4:\text{Er}_{0,1}$, $\text{NaY}_{0,6}\text{Yb}_{0,3}\text{F}_4:\text{Er}_{0,1}$, $\text{NaY}_{0,5}\text{Yb}_{0,4}\text{F}_4:\text{Er}_{0,1}$, $\text{NaY}_{0,35}\text{Yb}_{0,55}\text{F}_4:\text{Er}_{0,1}$, $\text{NaY}_{0,2}\text{Yb}_{0,7}\text{F}_4:\text{Er}_{0,1}$, $\text{NaYb}_{0,9}\text{F}_4:\text{Er}_{0,1}$. Также для сравнения были синтезированы подобные матрицы LaF_3 и YF_3 : $\text{LaF}_3:\text{Yb}_{0,81},\text{Er}_{0,19}$, $\text{YF}_3:\text{Yb}_{0,71},\text{Er}_{0,15}$.

Для всех полученных образцов проведены измерения ап-конверсионной люминесценции при накачке диодным лазером 976 нм. В результате проведенных исследований получены спектры ап-конверсии. Для образцов с NaYF_4 матрицей построены диаграммы цветности (рисунок) и определен квантовый выход ап-конверсии.

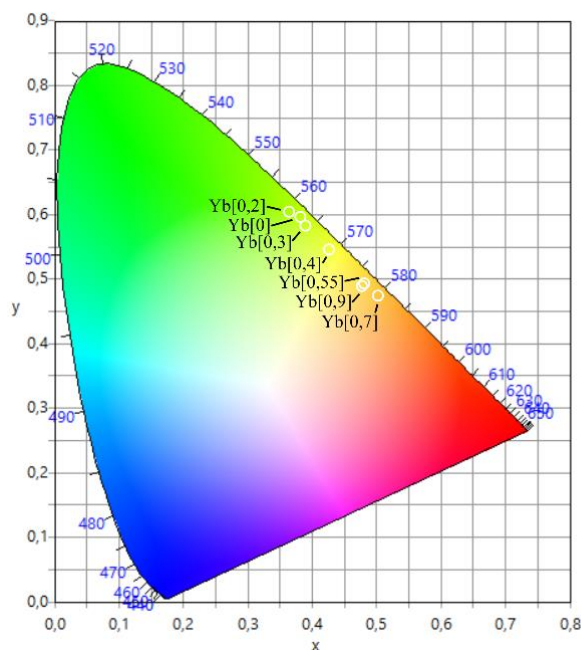


Рисунок. Диаграммы суммарной цветности ап-конверсионной люминесценции серии образцов $\text{NaYF}_4:\text{Yb,Er}$

Исследование выполнено при финансовой поддержке СПбГУ (id 94030186). Благодарим ресурсные Центры СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования» и «Геомодель» за помощь в характеристике образцов.

[1] Баринов Д.С., «Фотоактивные материалы, проявляющие эффект ап-конверсии», вып. квалиф. раб., Санкт-Петербург, (2020).

[2] Auzel F., *Chemical Reviews.*, **104**, №1, 139–173, (2004).

[3] Nadort A., Zhao J., Goldys E.M., *Nanoscale*, **8**, №27, 13099–13130, (2016).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТОПЛАЗМОННОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА
ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ФОТОННОГО МАТЕРИАЛА**

Валитова А.Ф.^{1,2}, Газизов А.Р.^{1,2}, Салахов М.Х.^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики, Казань, Россия

²Академия наук Республики Татарстан, Казань, Россия

В данной работе мы исследуем оптоплазмонные структуры из периодического фотонного материала. Результатом исследования является возможность управления дисперсионными свойствами поверхностных плазмонов.

Ключевые слова: фотонный кристалл, метаповерхность, поверхностный плазмон.

Метаповерхности с периодической фотонной структурой представляют собой обширное поле для интересных физических исследований, на которых можно наблюдать необычные эффекты, например, возникновение различных новых состояний света, таких как оптические таммовские состояния [1], связанные состояния в континууме [2, 3] и др. Новые оптические состояния света обладают большей добротностью, именно благодаря этому позволяют управлять излучением одиночных нанообъектов (квантовых точек, молекул). Гибридные оптоплазмонные структуры обладают преимуществами плазмонных материалов, таких как нанолокализация света и усиление оптического отклика от нанообъектов, находящихся вблизи них [4] и при этом имеют малые потери. Все изменения, которые могут быть внесены в характер излучения с помощью новых резонансов, можно рассматривать как частные случаи. Мы предлагаем модифицировать плотность состояний с помощью метаповерхности, нанесенной на край периодического фотонного материала (рисунок).

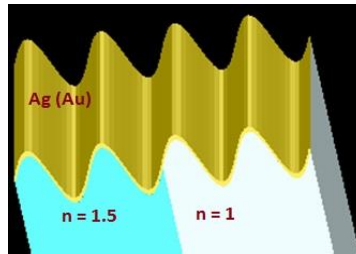


Рисунок. Схематичное изображение метаповерхности с гофрированным слоем Ag (Au)

С помощью численного моделирования метаповерхности методом FDTD в зависимости от периода, скважности (фактора заполнения) фотонного материала, от геометрических параметров метаповерхности (толщины метаповерхности) нам удалось проанализировать специфическое поведение дисперсионных кривых и указать, какое влияние оказывает фотонная структура на поверхностные плазмонные моды. Так же мы продемонстрировали, как можно использовать в различных приложениях полученные нами результаты. Так как нас интересует возбуждение поверхностных плазмонов, то мы рассматривали сплошную метаповерхность, которая представляет волнообразный слой Ag (Au). В случае разрывной метаповерхности, поверхностные плазмоны не смогут распространяться в данной структуре. По соображениям простоты рассматривается структура периодическая только в одном направлении [5].

Мы представляем периодическую структуру, которая позволяет изменять дисперсионные свойства поверхностного плазмона, тем самым изменяя плотность состояний. Благодаря подключению эффектов интерференции и дифракции на периодической структуре фотонного материала, меняется добротность плазмонных мод и длина распространения поверхностного плазмона. А большие значения добротности позволяют увеличить время взаимодействия между светом и веществом на порядки величин. Из-за наличия плазмон-фотонного взаимодействия возникают запрещенные зоны. Плазмонные возбуждения изменяют запрещенные зоны фотонного материала. Также структура поддерживает решеточный плазмонный резонанс, положение которого зависит от периода метаповерхности.

Таким образом, результаты нашего исследования показали гибридные моды, образованные взаимодействием фотонной и плазмонной составляющих. Благодаря гибридным модам поддерживается высокая локализация поля и происходит компенсация высоких диссипативных потерь металлических компонентов. Полученные результаты представляют собой оценку эффективности возбуждения новых оптических эффектов при нормальном падении света, и будут способствовать при разработке высокочувствительных био- и химических датчиков, а так же при сильном взаимодействии света с веществом, в аналоговых вычислениях, в квантовой плазмонике и в квантовых технологиях.

[1] Kaliteevski M., et al., *Phys. Rev. B.*, **76**, 16, P.165415, (2007).

[2] Bernhardt N., Koshelev K., White S.J. et al., *Nano Lett.*, **20**, 5309–5314, (2020).

[3] Lochner F.J., George A., Koshelev K. et al., *ACS Photonics*, **8**, 218–227, (2021).

[4] Hong Y. and Reinhard B.M., *J. Opt.*, **21**, 113001, (2019).

[5] Валитова А.Ф., Научно-квалификационная работа: Анализ оптических характеристик проходящего света в оптоплазмонных материалах с фотонной запрещенной зоной, 77-78, (120 с.), (2023).

УПРАВЛЕНИЕ ПОВЕДЕНИЕМ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ
СТРУКТУР В СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ХИРАЛЬНЫХ
НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Пивень А.О., Дармороз Д.Д., Орлова Т.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Изучение поведения динамических локализованных супрамолекулярных структур в фрустрированных тонких пленках светочувствительного хирального нематического жидкого кристалла и определение оптимальных характеристик записывающего Гауссова светового пучка для управления динамическим поведением этих структур.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, локализованные структуры, светоиндуцированная генерация.

Локализованные топологические структуры в хиральных нематических жидких кристаллах нашли широкое применение в оптике и фотонике в качестве составляющих оптических элементов. Например, такие структуры использовались как перестраиваемые линзы для фокусировки и дефокусировки лазерных пучков и изменения направления их распространения [1]. Кроме того, пространственно-вариативные двулучепреломляющие структуры были продемонстрированы в качестве микроскопических оптических вихревых генераторов с возможностями записи и хранения информации на молекулярном уровне [2]. Упорядоченный массив локализованных структур в нематических жидких кристаллах может быть использован как двумерная дифракционная решетка, позволяющая сформировать управляемые фазовые сингулярности в дифрагированных лазерных пучках [3].

В предыдущих исследованиях была изучена генерация разнообразных статичных топологических структур путем оптически индуцированной локальной переориентации жидкокристаллических молекул в фотопассивных хиральных нематиках с помощью туго сфокусированных Гауссовых световых пучков [4]. Новый метод, основанный на светоиндуцированном управлении шагом холестерической спирали, позволяет создавать различные как статичные, так и уникальные вращающиеся структуры при помощи сфокусированного ультрафиолетового Гауссова пучка мощностью всего в десятки нановатт [5].

Работа, производимая вращающимися структурами, может быть преобразована во вращение нано- или коллоидных частиц. Однако в предыдущих исследованиях [5] были исследованы вращающиеся структуры размером всего до 50 микрон и периодом вращения около 360 секунд. Область орбитальной транспортировки частиц с помощью более крупных локализованных структур оставалась неизученной. Таким образом, целью данного исследования является создание динамических локализованных супрамолекулярных структур в фрустрированных тонких пленках светочувствительного хирального нематического жидкого кристалла путем светоиндуцированных фотохимических превращений молекул хиральной легирующей добавки и определение оптимальных характеристик записывающего Гауссовского светового пучка для управления динамическим поведением этих структур в случае их размера больше 50 микрон.

Научная новизна проекта заключается в изучении вращающихся локализованных структур больших размеров (диаметром более 50 микрон) и изучении взаимосвязи их топологических свойств с динамическим поведением. Это позволит изучить фундаментальные принципы структурирования мягкой материи, которые способствуют формированию и стабилизации локализованных супрамолекулярных структур со сложной топологией.

Авторы благодарят профессора Etienne Brasselet (University of Bordeaux, France) за предоставленные жидкокристаллические образцы. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации в рамках программы ITMO Fellowship and Professorship Program.

[1] Hess A.J., Poy G., Tai J.B., Žumer S., Smalyukh I.I., *Phys. Rev. X*, **10**, 031042, (2020).

[2] Yang B., Brasselet E., *J. Opt.* **15**, 044021, (2013).

[3] Ackerman P.J., Qi Z., Smalyukh I.I., *Phys. Rev. E*, **86**, 021703, (2012).

[4] Smalyukh I.I., Lansac Y., Clark N.A., Trivedi R.P., *Nat. Mater.* **9**, (2010).

[5] Orlova T., Lancia F., Lossert C., Lamsaard S., Katsonis N., Brasselet E., *Nat. Nanotechnol.*, **13**, (2018).

ИССЛЕДОВАНИЕ АДсорбЦИОННЫХ И ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦИНКОВОЙ ШПИНЕЛИ ZnO:ZrO₂:Mn

Портнова К.А., Шелеманов А.А., Евстропьев С.К.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В данной работе оценивался вклад адсорбции в эффективность фоторазложения органического красителя Chicago Sky Blue композитом ZnO₄:1ZrO₂:(0.5)Mn, синтезированного полимерно-солевым методом.

Ключевые слова: фотокатализ, адсорбция.

Композиты на основе цинка демонстрируют высокие показатели адсорбции и фотокатализа. Как известно, увеличение удельной площади поверхности способствует улучшению фотокаталитических и адсорбционных свойств этого материала. При использовании полимерно-солевого метода синтеза можно получать композиты с большой удельной поверхностью [1]. Они обладают пористой структурой и размерами кристаллов около 10 нанометров. Для увеличения фотокаталитических свойств используются различные добавки, например Mn. Эти добавки увеличивают удельную площадь поверхности и уменьшают вероятность рекомбинации пары электрон-дырка.

В ходе работы были исследованы фотокаталитические и адсорбционные свойства композитов 4ZnO:1ZrO₂ с примесью 0.5 массовых % Mn. Для расчета скорости фотокаталитической реакции были измерены кинетики обесцвечивания водных растворов органического красителя Chicago Sky Blue с начальной концентрацией 44 мг/л в присутствии 0.01 г композита после воздействия УФ облучением от ртутной лампы высокого давления в течение 30 минут. Для оценки вклада адсорбции были построены зависимости скорости фотообесцвечивания водного раствора красителя от плотности мощности УФ облучения. Для этого кювета с водным раствором красителя и композитом располагалась на разных расстояниях от лампы. Скорость фотообесцвечивания рассчитывалась из формулы (1), вывод формулы для расчета скорости фотообесцвечивания детально описан в [2].

$$C/C_0 = e^{-kt}, \quad (1)$$

где C – оптическая плотность; C_0 – максимальная оптическая плотность; t – время; k – скорость фотообесцвечивания.

Таким образом, была получена зависимость скорости обесцвечивания от плотности мощности, график которой представлен на рисунке ниже.

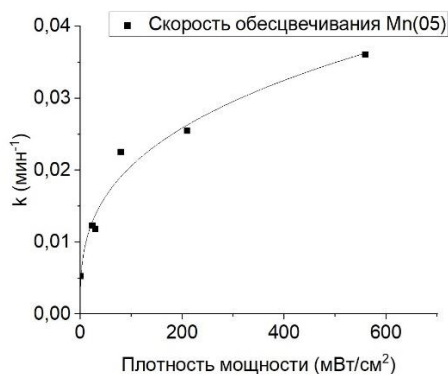


Рисунок. Измеренная зависимость скорости обесцвечивания от плотности мощности

Таким образом, в ходе работы был исследован вклад адсорбции в скорость фотокаталитической реакции для композита ZnO₄:1ZrO₂:(0.5)Mn. При высоких плотностях мощности ультрафиолетового излучения вклад адсорбции в обесцвечивание красителя оказался гораздо более значимым, чем при низких, так на графике значения скорости фотообесцвечивания при высоких плотностях мощности значительно больше, чем при низких. При этом при низких плотностях мощности зависимость линейная, а при больших плотностях мощности зависимость становится степенной из-за увеличения вероятности рекомбинации электронно-дырочной пары.

[1]. Shelemanov A.A., *Materials Chemistry and Physics*, **276**, 125204, (2022).

[2]. Deng Y., *Chemical Engineering Journal*, **337**, 220–227, (2018).

ДЕФОРМИРОВАННАЯ ЛЕЖАЧАЯ СПИРАЛЬ В СЛОЕ ХОЛЕСТЕРИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА И УСЛОВИЯ ЕЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ

Симдянкин И.В., Гейвандов А.Р., Барма Д.Д., Штыков Н.М., Палто С.П.

ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН, Москва, Россия

Исследованы условия существования индуцированной полем деформированной лежачей спирали в слое холестерического жидкого кристалла как с периодическими граничными условиями, так и в периодическом электрическом поле.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, электрооптика, хиральность.

Свойства слоев холестерических жидких кристаллов (ХЖК) с осью спирали, лежащей в плоскости слоя («лежачая спираль») (ЛС) многие годы остаются в фокусе внимания исследователей. Успешная реализация ЛС перспективна по многим причинам. Это не только электрооптические эффекты, но и управляемые дифракционные решетки, а также элементы распределенной обратной связи в жидкокристаллических микролазерах [1]. При этом, получение бездефектной структуры лежачей спирали по-прежнему остается сложной научно-технической задачей, решению которой посвящены наши исследования.

Новой разновидностью ЛС в ХЖК является деформированная лежачая спираль (ДЛС), которая является термодинамически стабильной, но возникает, например, в электрическом поле для ХЖК слоев с периодическими граничными условиями (ПГУ) [1, 2]. Один из найденных нами способов формирования ПГУ основан на использовании технологии сфокусированного ионного пучка [1], позволяющей задавать локальные области для вертикальной ориентации ЖК на поверхности с изначально планарными однородными условиями ориентации. Таким образом, локально облучая ионным пучком поверхность исходной подложки можно, например, создать планарно-гомеотропные условия ориентации (ПГО), рис. (а). В этом случае, под действием электрического поля, исходная ХЖК текстура с осью спирали вдоль нормали к подложкам (рис. (а)) трансформируется в новое состояние ДЛС, с осью спирали в плоскости слоя (рис. (б), (в)). Для такого перехода естественный шаг холестерической спирали не должен превышать период модулированной ориентирующей поверхности. Помимо использования ионного пучка, мы разработали способ формирования ПГО, основанный на фотоориентации молекул в пленках при их облучении УФ светом и наведении выделенной оптической оси, задающей ориентацию ЖК [2].

Кроме того, в данной работе, нами впервые получена ДЛС в условиях пространственно-периодического неоднородного электрического поля, формируемого с использованием встречно-штыревых электродов. Ключевым условием ДЛС в этом случае является не только соотношение периода электродной решетки и естественного шага спирали, но и отрицательная диэлектрическая анизотропия ХЖК.

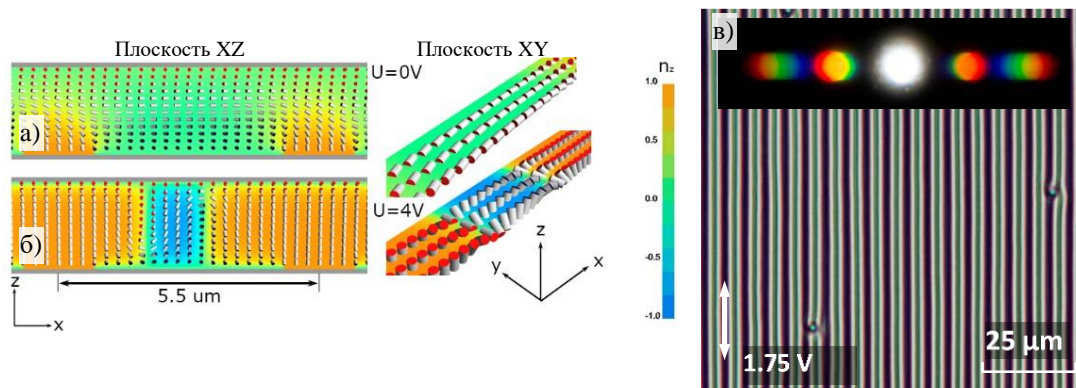


Рисунок. Моделированное распределение директора в ХЖК при электрических напряжениях $U = 0$ В (а) и $U = 4$ В (б); фотография текстуры лежачей спирали в поляризационном микроскопе при напряжении 1.75 В (в). Цветовая шкала на а), б) указывает значение n_z -компоненты директора ЖК (гомеотропное состояние при $n_z = \pm 1$, а планарное при $n_z = 0$). Вставка на рисунке в) показывает картину дифракции, наблюдаемую при использовании в микроскопе линзы Бертрама

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

[1] Palto S.P., Shtykov N.M., Kasyanova I.V., Umanskii B.A., Geivandov A.R., Rybakov D.O., Simdyankin I.V., Artemov V.V., Gorkunov M.V., *Liquid Crystals*, **47**(3), 384-398, (2020).

[2] Geivandov A.R., Simdyankin I.V., Barma D.D., Shtykov N.M., Palto S.P., *Liquid Crystals*, **49**, 2027-2036, (2022).

**ВЛИЯНИЕ ЙОДИДА КАЛИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА
КВАНТОВЫХ ТОЧЕК PbS, ПОКРЫТЫХ МОЛЕКУЛАМИ
ТИОГЛИКОЛЕВОЙ КИСЛОТЫ**

Гревцева И.Г., Чирков К.С., Овчинников О.В., Смирнов М.С.
ФГБОУ ВО "ВГУ", г. Воронеж, Россия

В данной работе представлены результаты исследования влияния йодида калия на спектральные свойства квантовых точек сульфида свинца. Продемонстрирована возможность управления механизмом люминесценции, а также возможность увеличения квантового выхода люминесценции квантовых точек.

Ключевые слова: квантовые точки, сульфид свинца, йодирование.

Активные исследования ведутся в направлении создания фотодетекторов на основе КТ. Здесь наиболее перспективным является фотодетектирование в ближней ИК области. Одним из активно исследуемых материалов для инфракрасных приложений КТ является сульфид свинца (PbS). Для улучшения эффективности фотодетектирования КТ может быть использован метод постсинтетической обработки нанокристаллов галогенсодержащими реагентами. Однако экспериментальные данные, касающиеся влияния на люминесценцию КТ PbS за счёт обработки ионами галогенов фрагментарны и не позволяют ответить на вопрос о том, как влияет галогенирование КТ PbS на процессы излучательной и безызлучательной рекомбинации в них.

Образцы КТ были приготовлены методом коллоидного водного синтеза. В качестве пассиватора использовалась тиогликолевая кислота (TGA). Образец, обработанный KI (PbS/TGA(KI)), получали добавлением в раствор КТ водного раствора KI. Методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), а также по результатам исследования рентгеновской дифракции было установлено, что средний размер КТ PbS/TGA составил порядка 3 нм. Средний размер КТ PbS/TGA(KI) незначительно уменьшился на 0.2-0.3 нм. Также по ПЭМ изображениям видно, что добавление KI позволило сформировать сверхрешётку из КТ.

В спектрах поглощения КТ отсутствует экситонная структура, что свойственно КТ, синтезированным при комнатной температуре в воде [1]. По спектрам поглощения видно (рисунок), что обработка KI привела к уменьшению оптической плотности, что связано с выпадением в осадок примерно 15% КТ. В спектрах люминесценции исходных образцов КТ PbS (рисунок) обнаружена одна несимметричная полоса с максимумом при 1120 нм и крылом на длинноволновом краю. Добавление KI приводит к смещению пика люминесценции в коротковолновую область (1060 нм), сопровождающимся увеличением интенсивности люминесценции, а также гашению длинноволновой особенности. Оценка квантового выхода люминесценции относительным методом показала, что обработка КТ позволила увеличить квантовый выход с 1% до 10%. По спектрам возбуждения люминесценции образцов была проведена оценка Стоксова сдвига. Было установлено, что пики люминесценции на длинах волн 1120 нм (PbS/TGA) и 1060 нм (PbS/TGA(KI)) обусловлены излучательной аннигиляцией экситона, в то время как длинноволновое крыло в спектре люминесценции КТ PbS/TGA связано с излучательной рекомбинацией на уровнях дефектов.

Методом ТСЛ было показано существование двух типов мелких локализованных состояний с глубинами 0.17 и 0.25 эВ, концентрация которых слабо чувствительна к обработке KI. Предполагается, что часть регистрируемых ловушек не связана с оборванными связями поверхностных атомов свинца и серы, а обусловлена собственными дефектами нанокристалла - межузельными ионами свинца или серы.

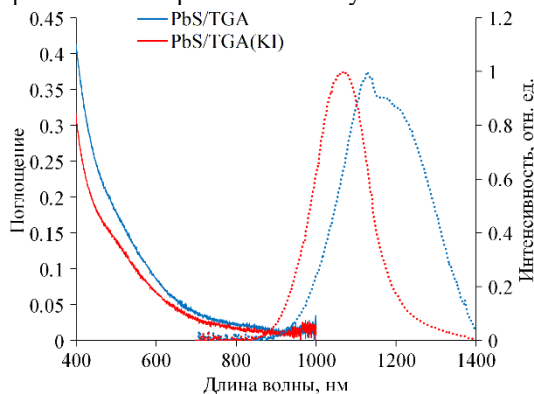


Рисунок. Спектры оптического поглощения и люминесценции образцов PbS/TGA и PbS/TGA(KI)

[1] Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., *J. of Luminescence.*, **227**, 117526, (2020).

[2] Perepelitsa A.S., Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., Latyshev A.N., Kotko A.S., *J. of Luminescence.*, **198**, 357-363, (2018).

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ БИНАРНЫХ АССОЦИАТОВ
КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag_2S И PbS

Овчинников О.В., Смирнов М.С., Гревцева И.Г.,
Возгорькова Е.А., Чирков К.С., Татьяна Е.П., Смейлова А.И.
ВГУ, г. Воронеж, Россия

Рассматриваются особенности люминесцентных свойств коллоидных квантовых точек Ag_2S и PbS , пассивированных тиогликолевой и 2-меркаптопропионовой кислотами, при их бинарной ассоциации. Установлено возникновение новой, не свойственной компонентам, полосы люминесценции при 1160 нм.

Ключевые слова: квантовая точка, бинарный ассоциат.

Создание бинарных ассоциатов на основе коллоидных квантовых точек (КТ) вызывает большой интерес с точки зрения разработки элементной базы для различных оптоэлектронных устройств, таких как системы фотодетектирования, фотовольтаики, фотокатализаторы, а также оптические компьютеры, устройства квантовой криптографии на базе систем с фотопереносом заряда или безызлучательным переносом энергии электронного возбуждения. Возможность настройки энергетической структуры КТ за счет квантово-размерного эффекта открывает новые возможности для реализации фотодетекторов, использующих в основе своей работы фотоперенос заряда от одних КТ к другим. Достижение спектральной чувствительности за счет этого эффекта в ближнем ИК диапазоне обладает особой актуальностью. В современных источниках обсуждаются исследования оптических свойств однородных бинарных ассоциатов, состоящих из КТ одинакового состава с отличающимися размерами [1]. Для разработки систем с фоторазделением заряда наиболее интересны разнородные бинарные ассоциаты из КТ с разным значением энергий разрешенных и запрещенных состояний [2].

В данном сообщении представлены результаты исследований спектральных свойств бинарных ассоциатов КТ Ag_2S и КТ PbS , пассивированных, соответственно, тиогликолевой и 2-меркаптопропионовой кислотой, полученных смешиванием коллоидных растворов исходных компонентов в концентрациях, обеспечивающих количественное соотношение 10:1.

Установлено, что при образовании бинарных ассоциатов КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}/\text{PbS}_{2\text{-MPA}}$ наблюдается кардинальная перестройка спектров фотолюминесценции. Наблюдали сильное тушение люминесценции для полос, относимых КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$ и $\text{PbS}_{2\text{-MPA}}$ – с максимумами при 1010 нм и при 935 нм соответственно, и появление новой, отсутствующей в спектрах исходных компонент полосы люминесценции с максимумом при 1160 нм. Отсутствие пика в спектре возбуждения ФЛ бинарной системы при регистрации в максимуме новой полосы свидетельствует в пользу ее рекомбинационного характера. Ранее нами показано, что данная полоса может присутствовать в спектре ФЛ КТ PbS и имеет дефектную природу. Найденные закономерности свидетельствуют о взаимодействии КТ, входящих в ассоциат. Механизм данного взаимодействия требует более подробного изучения.

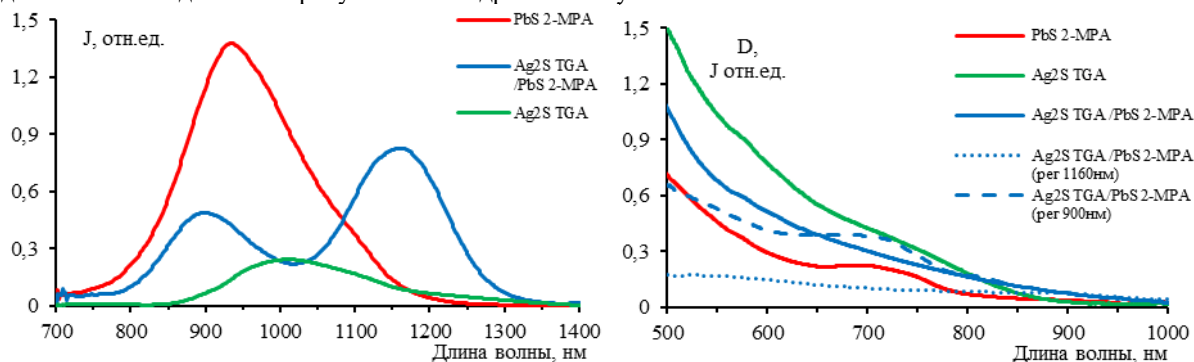


Рисунок. Спектры поглощения, люминесценции и возбуждения люминесценции (пунктирные линии), КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}$ – зеленые линии, КТ $\text{PbS}_{2\text{-MPA}}$ – красные линии, КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}/\text{PbS}_{2\text{-MPA}}$ – синие линии

Установлено, что при образовании димера КТ $\text{Ag}_2\text{S}_{\text{TGA}}/\text{PbS}_{2\text{-MPA}}$ в спектрах ФЛ наблюдается значительное тушение в полосах исходных компонент, а также разгорание в полосе, изначально отсутствующей в спектрах исходных КТ. Таким образом, показана возможность управления спектральным составом излучения КТ при их ассоциации.

Работа выполнена за счет средств гранта РФФ № 22-12-00232.

[1] Dunlap M.K. et al., *Nanotechnology*, **34**, 275202, (2023).

[2] McGranahan C.R. et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 30980–30991, (2021).

БИОФОТОНИКА

**ВЛИЯНИЕ Е-ЖИДКОСТИ (ВЕЙПОВ) НА
ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЯИЧНИКОВ**

Селифонов А.А.,¹ Селифонова Е.И.,¹ Тучин В.В.²

¹Образовательно-научный институт наносистем и биосистем, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

²Научный медицинский центр, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

В работе методом отражательной спектроскопии определены коэффициенты диффузного отражения и пропускания яичников кошек под воздействием смеси глицерина и пропиленгликоля в диапазоне от 200 до 800 нм. Выявлено образование окон прозрачности в УФ области спектра.

Ключевые слова: вейпы, глицерин, пропиленгликоль, отражательная спектроскопия, яичник.

В последнее время наблюдается значительная популярность электронных сигарет среди молодого населения, это связано с тем, что они имеют приятный вкус и аромат, разрешены к употреблению в людных местах и легко доступны через интернет-магазины без возрастных ограничений. Электронные сигареты используются уже почти десять лет и аудитория вейперов значительно увеличивается за счет подростков и молодого населения. Эта тенденция все время усиливается. Электронные устройства состоят из картриджа, наполненного курительной жидкостью, нагревательного элемента (атомайзера), необходимого для нагрева жидкости для электронных сигарет и превращения ее в пар, который можно вдыхать через мундштук, и аккумуляторной батареи. Жидкость для электронных сигарет состоит из пропиленгликоля, глицерина, дистиллированной воды, ароматизаторов, никотина (или без никотина) и различных добавок (например, витамина Е). Доказанный вред курения табачных сигарет объясняется большим количеством канцерогенных и токсичных соединений продуктов горения табака. Считается, что вейпинг менее вреден, чем курение табачных сигарет, однако, некурящие менее подвержены вирусным инфекциям, бронхолегочным и сердечно-сосудистым заболеваниям, чем курильщики и вейперы. Потенциальные долгосрочные последствия использования электронных сигарет в значительной степени не изучены. Поскольку известно, что глицерин и пропиленгликоль являются эффективными гиперосмотическими агентами и усилителями проницаемости биологических мембран, можно предположить, что использование жидкостей для электронных сигарет с этими высококонцентрированными основными веществами может оказывать существенное влияние на ткани как полости рта, горла и легких, так и внутренних органов репродуктивной системы человека, в частности яичников, а также на проницаемость для различных инородных молекул, в том числе токсичных веществ в окружающем воздухе, изменять метаболизм поступающих фармпрепаратов и др. Помимо влияния на молекулярную проницаемость тканей, глицерин и пропиленгликоль являются хорошими оптически просветляющими агентами и, таким образом, позволяют применять хорошо зарекомендовавшие себя оптические спектроскопические технологии, такие как спектроскопия диффузного отражения, для контроля их диффузии в тканях [1]. Количественно определена молекулярная диффузия этих смесей в ткани и выявлено, что в процессе взаимодействия образцов с жидкостями для электронных сигарет наблюдается снижение коэффициента диффузного отражения по отношению к необработанным образцам в широком спектральном диапазоне от глубоких УФ до БИК. Соответственно увеличивается общий коэффициент пропускания, что свидетельствует о снижении светорассеяния тканей. Спектры внутри полос поглощения эндогенных хромофоров (ДНК, белков и оксигемоглобина) также модифицируются, что связано с меньшей вероятностью эффективного поглощения фотонов при их прохождении через оптически просветленную (менее рассеивающую) ткань. В результате отчетливо видны новые особенности оптических свойств тканей, обусловленные временным взаимодействием тканей с жидкостями для электронных сигарет - создание новых временных УФ-оптических окон. Дисперсия тканей и тканевых компонентов, в том числе воды, демонстрирует убывающий характер с ростом длины волны. Имеет место несоответствие показателей преломления между плотными включениями, такими как волокна коллагена и клеточные органеллы, и тканевыми жидкостями – интерстициальной и цитоплазматической. Это несоответствие вызывает значительное рассеяние света тканями, которое особенно сильное в УФ области. Следовательно, механизм согласования показателя преломления оказывается более эффективным в УФ. Однако из-за сильного поглощения в этом диапазоне нельзя достичь высоких уровней абсолютного пропускания, как это имеет место в БИК диапазоне, однако многие оптические методы, использующие малоинтенсивные потоки фотонов, получают существенные преимущества в условиях оптического просветления в УФ-диапазоне.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (проект № FSRR-2023-0007).

[1] Tuchin V.V., Zhu D., Genina E.A. (Eds.) Handbook of Tissue Optical Clearing: New Prospects in Optical Imaging, Boca Raton: CRC Press, p. 876, (2022).

ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ GFP В МИКРОРЕЗОНАТОРЕ ФАБРИ-ПЕРО ПРИ НАКАЧКЕ СВЕРХКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ
Вьюнышева С.А.¹, Мысливец С.А.^{1,2}, Давлетшин Н.Н.^{1,2}, Еремеева Е.В.³,
Высоцкий Е.С.³, Павлов И.Н.⁴, Вьюнышев А.М.^{1,2}

¹Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

²Институт инженерной физики и радиоэлектроники, СФУ, г. Красноярск, Россия

³Институт биофизики СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

⁴Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

Исследована возможность усиления флуоресценции *sgreGFP* в микрорезонаторе под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Показано, что сигнал флуоресценции увеличивается на спектральных частотах, соответствующих модам микрорезонатора. Полученные результаты представляют интерес для приложений биофотоники.

Ключевые слова: флуоресценция, микрорезонатор, фемтосекундные лазерные импульсы.

Флуоресценция нашла широкое применение в различных биофотонных приложениях. Лабораторные методы анализа, базирующиеся на явлении флуоресценции, отличаются высокой чувствительностью, совместимостью с живыми объектами и быстротой отклика [1]. Благодаря передовым методам флуоресцентной микроскопии получены контрастные изображения с высоким пространственным разрешением, а разработка флуоресцентных меток на основе зеленого флуоресцентного белка (GFP) привела к возможности детального изучения структуры и функции белков и нуклеиновых кислот [2]. Особый интерес представляет метод лазерно-индуцированной флуоресценции для изучения биологических объектов со слабовыраженными люминесцентными свойствами или образцов с маленькой концентрацией флуорофора.

SgreGFP, используемый в нашей работе, характеризуется максимумом поглощения на 488 нм и полосой флуоресценции в диапазоне 510-525 нм. Раствор белка помещался в микрорезонатор типа Фабри-Перо, состоящий из двух плоскопараллельных многослойных диэлектрических зеркал с фотоннозапрещенной зоной на 450-620 нм. Система микрорезонатор-белок накачивалась второй гармоникой титан-сапфирового лазера на длине волны 400 нм (80 МГц, 100 фс) в схеме, представленной на рисунке. Средняя мощность лазерного излучения изменялась в пределах 1-30 мВт.

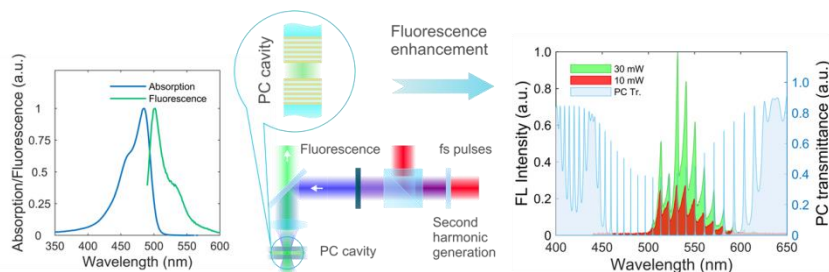


Рисунок. Блок-схема эксперимента по усилению лазерно-индуцированной флуоресценции *sgreGFP*

Спектр флуоресценции *sgreGFP*, представленный на рисунке выше, свидетельствует об усилении сигнала флуоресценции в микрорезонаторе на спектральных частотах, соответствующих микрорезонаторным модам. Величина усиления флуоресцентного сигнала может быть оценена по характеристикам добротности микрорезонатора [3], которая определяется формулой

$$Q = \lambda / \Delta\lambda, \quad (1)$$

где Q – добротность микрорезонатора; λ – длина волны; $\Delta\lambda$ – полуширина пика на полувысоте.

На длине волны 530 нм полуширина пика составляет 3 нм, соответственно, добротность микрорезонатора может быть оценена ≈ 177 . Таким образом, величина усиления флуоресцентного сигнала на длине волны 530 нм может достигать двух порядков.

В результате работы продемонстрировано усиление флуоресценции *sgreGFP* под действием фемтосекундных лазерных импульсов и приведена оценка величины усиления. Данные результаты представляют интерес для развития потенциальных биофотонных приложений.

[1] Pokhriyal A., Lu M., Ge C., Cunningham B.T., *Journal of Biophotonics*, **7**, 332–340, (2014).

[2] Shimomura O., Johnson F.H., Saiga Y., *Journal of Cellular and Comparative Physiology*, **59**, 223–239, (1962).

[3] Maitland A., Dunn M.H., *Laser Physics*, North-Holland Pub.Co, Amsterdam, (1969).

**ОЦЕНКА ЦИТОТОКСИЧНОСТИ И БИОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ В
ТКАНЕВЫХ СРЕЗАХ ПЕЧЕНИ МЕТОДОМ
МУЛЬТИФОТОННОЙ МИКРОСКОПИИ**

**Гаврина А.И.^{1,2}, Родимова С.А.¹, Крылов Д.П.^{1,2}, Козлов Д.С.^{1,2},
Елагин В.В.¹, Зюзин М.В.³, Кузнецова Д.С.^{1,2}**

¹Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский национальный исследовательский государственный университет им. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

³Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Исследование направлено на разработку новой эффективной стратегии стимуляции регенерации печени при обширных резекциях на основе комплексов наночастиц, модифицированных биоактивными молекулами.

Ключевые слова: регенерация печени, наночастицы, флуоресцентный биоимиджинг.

Несмотря на достигнутые многообещающие результаты в области стимуляции регенерации печени с помощью малых биоактивных молекул, существует проблема отсутствия эффективного метода их доставки с контролируемым периодом высвобождения, накопления и выведения [1]. Создание оптимальных комплексов наночастиц и биоактивных молекул для стимуляции регенерации особенно актуально в связи с высоким риском развития печеночной недостаточности после операций на печени. Перспективным методом оценки состояния живых клеток печени является мультифотонная микроскопия, в частности, FLIM-микроскопия с временным разрешением. Этот метод не инвазивный, не требует меток и дополнительных контрастов, а также позволяет проводить прижизненный мониторинг на клеточном уровне.

Работу проводили на *ex vivo* модели тканевых срезов печени, которая позволяет осуществлять скрининг нескольких типов наночастиц, что исключает индивидуальный вклад животного организма и упрощает анализ и интерпретацию результатов. Вибрационный микротом 7000 см³-2 использовали для получения срезов печени по протоколу Pearen et al. [2]. Срезы помещали в отдельные лунки 12-луночного планшета со стандартной CO₂-кондиционированной средой DMEM с добавлением 0,1 мкМ дексаметазона и 10% FBS. Далее, срезы культивировали в среде DMEM с добавлением наночастиц в концентрации 50 и 100 мг/мл и инкубировали в течение 3, 24 и 48 часов. Было протестировано три типа наночастиц: золотые, SiO₂, полилактидные. Наночастицы золота размером 100-120 нм в виде наностержней были синтезированы по стандартному протоколу, основанному на затравочном механизме. Синтез наночастиц SiO₂ размером 20-100 нм осуществляли золь-гель методом. Наночастицы полилактида (PLA) размером 100 нм получали методом экстракции растворителем в одиночной эмульсии. Все наночастицы были модифицированы флуоресцентной меткой Cy 5. Срезы печени окрашивали LysoTracker Yellow NCK-123 и Phalloidin FITC. С помощью мультифотонной микроскопии оценивали структуру ткани срезов печени. Используя FLIM, проанализировали метаболическое состояние гепатоцитов на основе оценки времен жизни флуоресценции свободной и связанной форм НАД(Ф)Н и их вкладов.

В результате было показано, что наночастицы SiO₂ практически не накапливаются в клетках печени и проявляют низкую цитотоксичность. Наночастицы золота показали эффективное накопление в клетках печени, однако, оказали сильное цитотоксическое действие на них. Наконец, наночастицы полилактида (PLA) наиболее эффективно накапливаются в клетках печени, преимущественно в цитоплазме гепатоцитов. Используя FLIM, мы выявили низкую цитотоксичность наночастиц PLA, так как относительные вклады времени жизни флуоресценции различных форм НАД(Ф)Н существенно не отличались от контрольных значений. Таким образом, наночастицы PLA представляются наиболее перспективными для дальнейшего развития стратегии стимуляции регенерации печени с использованием наночастиц, модифицированных биоактивными молекулами. Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта РФФИ №23-15-00421.

[1] Liu Z., Li Y., Li W., et al., *Advanced Materials*, **30(24)**, 1703393, (2018).

[2] Pearen M.A., Lim Y.K., Gratte F.D. et al., *JoVE*, **157**, e60992, (2020).

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНЫХ НАРУШЕНИЙ
БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ**

**Горюнов И.А.¹, Шуплецов В.В.¹, Адаменков Н.А.²,
Журило И.П.³, Потапова Е.В.¹, Дрёмин В.В.¹**

¹Научный-технологический центр биомедицинской фотоники, ФГБОУ «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Россия

²Больница скорой медицинской помощи им. Н.А. Семашко, г. Орёл, Россия

³Кафедра хирургии детского возраста и инновационных технологий в педиатрии, ФГБОУ «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Россия

В данной работе представлена система гиперспектральной визуализации для оценки микроциркуляторных нарушений на примере инфантильных гемангиом и ишемии тканей кишечной стенки лабораторных животных. Результаты демонстрируют высокую чувствительность системы и предложенных алгоритмов обработки гиперспектральных данных к изменениям кровенаполнения и оксигенации биологических тканей.

Ключевые слова: гиперспектральная визуализация, инфантильная гемангиома, ишемия.

В настоящее время использование гиперспектральной визуализации (ГВ) стало мировым трендом при решении различных прикладных медицинских задач, предлагая неинвазивное использование и высокий потенциал математической обработки. Благодаря высокому спектральному разрешению современных систем ГВ становится возможной реализация высокоточных классификационных моделей на основе классических методов сегментации и продвинутых нейросетевых подходов [1]. В данной работе предлагается метод ГВ, включающий разработанную лабораторную систему и математические алгоритмы обработки гиперспектральных массивов. В качестве объекта исследования выступили инфантильные гемангиомы, являющиеся доброкачественными сосудистыми образованиями, а также ткани кишечной стенки лабораторных животных при моделировании локальной ишемии кишечника. Таким образом, целью данной работы являлась разработка метода ГВ для определения его возможностей по выявлению микроциркуляторных нарушений.

Для реализации поставленной задачи была разработана система ГВ, включающая в себя широкополосный источник излучения OS2 (ThorLabs, США) с волоконно-кольцевым осветителем FRI61F50 (ThorLabs, США) и гиперспектральную камеру Specim (Spectral Imaging Ltd., Финляндия) со спектральным диапазоном 400-1000 нм. Были проведены пилотные исследования по изучению особенностей микроциркуляции инфантильных гемангиом различной локализации у 6 младенцев возрастом до 1 года. Также были исследованы ткани кишечной стенки 6 лабораторных животных (крысы линии Wistar) при наложении лигатур на аркадные сосуды, моделирующих длительность ишемии 0, 1, 6 и 12 часов соответственно, с последующим изъятием гистологических образцов из областей интереса. Измеренные гиперспектральные массивы инфантильных гемангиом были обработаны с использованием ранее разработанной нейронной сети, обученной по обобщенной объектно-ориентированной модели Монте-Карло [2, 3]. Для каждого из пациентов были получены двухмерные карты кровенаполнения, тканевой сатурации, а также индексы содержания окси/дезоксигемоглобина гемангиом. Результаты измерений ишемии кишечной стенки были рассчитаны с использованием двухволнового подхода и коэффициентов отражения на изобестических и неизобестических длинах волн в ближней инфракрасной области. Результатом явились рассчитанные двухмерные цветовые карты тканевой сатурации кишечника.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что разработанный метод ГВ представляет собой эффективный и перспективный инструмент для анализа сосудистых образований и для диагностики ишемии. Данный метод может быть использован в медицинских исследованиях для расширенного анализа и мониторинга патологий сосудистой системы. Полученные результаты подтверждают значимость использования метода ГВ в медицине и обеспечивают основу для дальнейших исследований в этой области.

Исследование было поддержано Российским научным фондом в рамках проекта № 21-15-00325.

[1] Винокуров В.О., Матвеева И.А., Христофорова Ю.А., Мякинин О.О., Братченко И.А., Братченко Л.А., Захаров В.П., *Компьютерная оптика*, **45**, №6, 879-886, (2021).

[2] Dremin V., Marcinkevics Z., Zherebtsov E., Popov A., Grabovskis A., Kronberga H., Bykov A., *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **40**, №4, 1207-1216, (2021).

[3] Zherebtsov E., Dremin V., Popov A., Doronin A., Kurakina D., Kirillin M., Bykov A., *Biomedical Optics Express*, **10**, №7, 3545-3559, (2019).

**ПАРАМЕТРЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АНТИМИКРОБНОЙ
ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ У ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ**

**Ефимова Е.С.¹, Полиданов М.А.², Корченова М.В.¹, Каневский М.В.¹,
Мусаелян А.Г.², Алипов В.В.², Тучина Е.С.¹**

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

²Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского, г. Саратов, Россия

В работе предложены коэффициенты на основе биохимического анализа крови для оценки эффективности фотодинамической терапии гнойных абсцессов у лабораторных животных.

Ключевые слова: фотодинамическая терапия, гнойный абсцесс, фотосенсибилизаторы.

Использование фотодинамической терапии (ФДТ) при лечении гнойно-воспалительных заболеваний, постоперационных осложнений, ран, гнойных абсцессов (ГА), требует контроля и своевременного прогнозирования результатов лечения [1, 2]. Апробация новых схем «излучение-растворитель-фотосенсибилизатор» в ходе научных исследований *in vivo* на лабораторных животных также нуждается в стандартизации и формировании списка критериев, позволяющих комплексно оценить производимый эффект. Несомненную практическую значимость имеет разработка критериев оценки эффективности антимикробной ФДТ, обеспечивающих сокращение сроков воздействия излучения на организм, что и стало целью данного исследования.

Исследования проводились на 16 крысах-самках породы «стандарт» массой 200±50 г с абсцессами, моделированными по описанному ранее методу [3]. Лабораторные животные содержались в регламентированных условиях вивария, проведение экспериментов осуществлялись согласно основным морально-этическим принципам проведения биомедицинских экспериментов на животных. Животных делили на 4 группы: 1) санация полости ГА фурациллином с применением антибиотиков (бициллин 0,3 млн ЕД 1 раз в течение 3 дней), 2) обработка полости ГА смесью растворов 0,24% интралипида (ИЛ) и 0,0001 % метиленового синего (МС), 3) обработка полости ГА только 0,24 % раствором ИЛ и воздействие светодиодным красным (КИ, 660 нм) излучением с плотностью мощности 30 мВт/см², 4) обработка полости ГА смесью растворов 0,24 % ИЛ и 0,0001 % МС в качестве фотосенсибилизатора и облучение КИ. Облучение области ГА животным 3-й и 4-й групп проводили по 15 мин в течение 10 дней, начиная с пятых суток после формирования ГА. Параллельно проводили высев 0,1 мл содержимого полости гнойного абсцесса на питательную среду (ГРМ-агар) для определения концентрации бактериальных клеток в экссудате. За день до формирования гнойного абсцесса, на 5, 10 и 15 сутки после формирования гнойного абсцесса определяют общее число лейкоцитов L_{ex} , общее число тромбоцитов T_{ex} , концентрацию креатинина C_{ex} и концентрацию гемоглобина H_{ex} , определяют среднее значение нормы общего числа лейкоцитов L_n , общего числа тромбоцитов T_n , содержания креатинина C_n и гемоглобина H_n , оценку эффективности рассчитывают по коэффициентам K_1 и K_2 по формуле (1)

$$K_1 = \frac{L_{ex}/L_n}{T_{ex}/T_n}, K_2 = \frac{C_{ex}/C_n}{H_{ex}/H_n}. \quad (1)$$

Показано, что на 5 день эксперимента изменяется процентное соотношение клеток крови по сравнению с физиологической нормой. Существенно увеличивается число лейкоцитов, число тромбоцитов, напротив, снижается. Показатель K_k находится в пределах 1 у здоровых и выздоравливающих животных. При сформированном гнойном абсцессе значения K_1 возрастали в 3-4 раза.

В ходе лечения происходило изменение концентраций основных биохимических показателей крови. Отмечено незначительно увеличение концентрации С-реактивного белка, как основного маркера воспаления. Показатель K_2 у здоровых и выздоравливающих животных не превышал 1, при сформированном гнойном абсцессе его значение возрастало в 1,5-2 раза.

В ходе антимикробного фотодинамического воздействия происходит достоверное снижение численности бактерий в экссудате из области гнойного абсцесса с 6 по 10 день эксперимента. В группах 1 и 2 концентрация микробных клеток на 15 день эксперимента составляла 1-3 lg₁₀КОЕ/мл. С 10 по 15 день происходит полное уничтожение бактерий в группах 3 и 4, что говорит об успешном проведении лечения).

Предложенные в способе коэффициенты показали свою информативность для оценки состояния животных с гнойным абсцессом, отражая изменение физиологического статуса организма в ходе прогрессирования воспалительного процесса, а также для оценки эффективности лечения с помощью метода фотодинамической терапии.

[1] Haidaris C.G., Foster T.H., Waldman D.L., Mathes E.J., McNamara J., Curran T., *Lasers Surg. Med.* **45**, P. 509-516, (2013).

[2] Li Z., Nguyen L., Bass D.A., Baran T.M., *J. of Biomedical Optics*, **27**, 083007, (2022).

[3] Алипов В.В., Урусова А.И., Андреев Д.А., *Ж. анатомии и гистопатологии*, **6**, С. 9-11, (2017).

НОВЫЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА ДЛЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ

Арутюнян Б.А.¹, Закоян А.А.^{1,2}

¹Научно-производственный центр "Армбиотехнология", Ереван, Армения

²Институт биохимии имени Г. Бунятыана, Ереван, Армения

Был получен новый комплекс на основе препарата Фотодитазин® и главного медьсодержащего белка крови церулоплазмينا для дальнейшего применения в фотодинамической терапии опухолей.

Ключевые слова: фотодинамическая терапия, фотосенсибилизаторы.

Фотодинамическая терапия опухолей (ФДТ) широко применяется в онкологии для лечения онкологических заболеваний, так как обладает минимально инвазивной процедурой и высокой селективностью. ФДТ требует совместного присутствия фотосенсибилизатора (ФС), кислорода и света [1]. Использование систем доставки лекарств ФС направлено на улучшение терапевтических результатов и целенаправленное высвобождение ФС (в активной лекарственной форме) в самой низкой дозе с минимальными побочными эффектами. Избирательное накопление лекарств в опухолевых клетках и их последующее улучшение терапевтических результатов считаются прямыми преимуществами таргетной ФДТ [2]. В связи с этим целью данной работы было получение нового комплекса на основе ФС для улучшения терапевтического эффекта ФДТ.

В качестве ФС был использован препарат Фотодитазин® (ФД), важными особенностями которого являются избирательное накопление в злокачественных новообразованиях, высокая фототоксичность, практическое отсутствие цитотоксичности и быстрое (в течение 24-28 часов) выведение из организма. Из-за важной роли медьсодержащего белка Церулоплазмينا (ЦП) в ангиогенезе мы использовали эту молекулу для нацеливания ФС на опухолевые клетки с помощью ФДТ. Для анализа полученного комплекса была использована УФ-ВИД спектроскопия (рисунок).

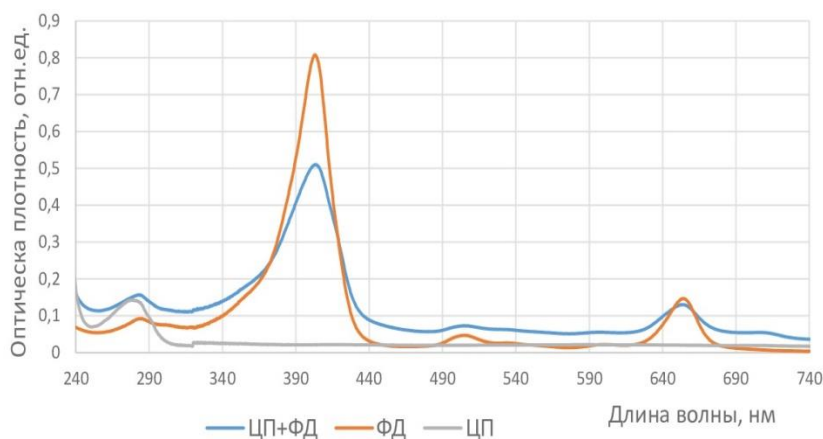


Рисунок. УФ-ВИД спектры комплекса ЦП+ФД и его компонент

Спектр комплекса имеет пик на ~280 нм, отвечающий за белковую молекулу ЦП и все характерные полосы поглощения для ФД-а с некоторыми сдвигами максимумов поглощения, что является косвенным свидетельством образования комплекса ЦП+ФД.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Yervant Terzian Armenian National Science and Education Fund (ANSEF) в Нью-Йорке (Паспорт NS-biochem-2817).

[1] Dereje D.M., Pontremoli C., Moran P.M.J., Visentin S., Barbero N., *Photochem & Photobiol. Sci.*, **21**, 397-419, (2022).

[2] Ganapathy V., Moghe P.V., Roth C.M., *J. Control. Release*, **219**, 215-223, (2015).

**ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИММУНОТЕРАПИИ ОПУХОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ
МЕТАБОЛИЧЕСКОГО ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО
ВРЕМЯРАЗРЕШЁННОГО ИМИДЖИНГА**

**Изосимова А.В.^{1,2}, Сачкова Д.А.^{1,2}, Ванцева О.А.², Кондратьева А.Р.¹,
Сажина М.М.¹, Яшин К.С.¹, Можеров А.М.¹, Щеславский В.И.¹,
Ширманова М.В.¹, Южакова Д.В.¹**

¹ФГБОУ ВО "ПИМУ" Минздрава России, Нижний Новгород, Россия

²ФГАОУ ВО ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Продемонстрированы возможности метаболического FLIM-имиджинга иммунных клеток как для мониторинга раннего ответа на чекпоинт терапию при лечении, так и для прогнозирования ответа на чекпоинт терапию для индивидуальных пациентов до начала лечения.

Ключевые слова: иммунотерапия, Флуоресцентный времяразрешенный имиджинг.

Ключевая проблема иммунотерапии опухолей связана с отсутствием надежных биомаркеров, позволяющих определять восприимчивость отдельных пациентов к лечению. Биомаркеры на основе автофлуоресценции метаболических коферментов иммунных клеток могут стать новым мощным предиктором ответа на лечение. А оптический метод флуоресцентной времяразрешенной микроскопии (FLIM) на основе время-коррелированного счёта фотонов является главным и наиболее востребованным подходом для регистрации времени жизни флуоресценции флуорофоров. Технология FLIM позволяет сохранять пространственную структуру образца и получать результаты в режиме реального времени. Применение FLIM-имиджинга для исследования функционального состояния иммунных клеток является совсем недавней тенденцией [1, 2]. Валидация же метода FLIM для решения задачи оценки эффективности иммунотерапии выполнена впервые.

Мы показали возможности метаболического FLIM-имиджинга иммунных клеток как для мониторинга раннего ответа на чекпоинт терапию в ходе лечения, так и для прогнозирования ответа на чекпоинт терапию для индивидуальных пациентов до начала лечения. Мы апробировали данный подход на различных моделях. На первом этапе осуществлялась оптимизация на модели мышины меланомы B16F0, одной из наиболее распространенных мишеней для иммунотерапии чекпоинт ингибиторами. На втором же этапе проводилась валидация на материале от пациентов с онкологией – уже проведены работы в отношении глиобластомы, новой потенциальной мишени для иммунотерапии, и планируются работы с материалом от пациентов с меланомой. Источником иммунных клеток служили лимфоузлы либо образцы крови (в случае пациентов). Разработана оригинальная пациент-специфическая модель на основе опухолевых клеток и лимфоцитов пациента.

Было установлено, что из всех параметров затухания автофлуоресценции метаболического кофермента НАД(Ф)Н наиболее надежным маркером иммунного ответа является изменение относительного вклада свободной фракции НАДН a1. Известно, что увеличение a1 НАДН ассоциировано со сдвигом в сторону гликолиза и глутаминолиза для обеспечения повышенных потребностей активированных Т-клеток. Оценка a1 НАДН в иммунных клетках позволяет: 1) в целом выявлять ответ иммунной системы на развитие опухоли в организме; 2) различать ранний и поздний этапы туморогенеза; 3) отражать изменения при анти-CTLA-4 иммунотерапии по сравнению с контролем без лечения; 4) различать степень ответа иммунной системы на лечение, давая возможность надежно выделять группы респондеров и нереспондеров. Помимо параметра НАДН a1, нарастающий иммунный ответ против опухоли отражает появляющийся вклад связанной формы НАДФН a3, коррелирующий с усилением пролиферативной активности лимфоцитов, а также удлинение времени жизни связанной компоненты t2, ассоциированное с изменением профиля НАДН-связывающих белков.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 23-74-10109).

[1] Walsh A.J., Mueller K.P., Tweed K., Jones I., Walsh C.M., Piscopo N.J., Niemi N.M., Pagliarini D.J., Saha K., Skala M.C., *Nat Biomed Eng*, **5**, 77–88, (2021).

[2] Heaster T.M., Heaton A.R., Sondel P.M., Skala M.C., *Front Bioeng Biotechnol*, **9**, 644648, (2021).

**ВРЕМЯ-РАЗРЕШЕННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ МИКРОСКОПИЯ В АНАЛИЗЕ
ЦИТОТОКСИЧНОСТИ И БИОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ В
EX VIVO ТКАНЕВЫХ СРЕЗАХ ПЕЧЕНИ**

**Козлов Д.С.^{1,2}, Родимова С.А.¹, Крылов Д.П.^{1,2}, Можеров А.М.¹,
Зюзин М.В.³, Кузнецова Д.С.^{1,2}**

¹Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский национальный исследовательский государственный университет им. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

³Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Исследование было направлено на подбор оптимального носителя для доставки биоактивных молекул, стимулирующих регенерацию печени, с использованием модели тканевых эксплантатов печени и мультифотонной микроскопии.

Ключевые слова: регенерация печени, время-разрешенная флуоресцентная микроскопия, наночастицы.

Стимуляция регенерации с помощью биоактивных молекул является многообещающим методом для регенеративной медицины. Несмотря на это, нерешенным остаётся вопрос оптимального метода доставки, обеспечивающего стабильность биоактивных молекул различной природы (сигнальные молекулы, ростовые факторы, микроРНК и др.), их адресную доставку и контролируемое высвобождение. Таким образом, поиск эффективного комплекса носителей с биоактивными молекулами для стимуляции регенерации печени является актуальной задачей, поскольку позволит снизить риск развития печеночной недостаточности после частичной гепатэктомии [1]. Одним из наиболее перспективных методов для оценки распределения, цитотоксичности и прорегенераторного потенциала наночастиц является сочетание мультифотонной микроскопии с временным разрешением (FLIM) и рентгеновской микротомографии. Кроме того, использование модели тканевых срезов печени позволяет проведение анализа нескольких типов наночастиц, что исключает индивидуальный вклад животного организма, упрощает эксперимент и интерпретацию результатов.

Образцы срезов печени были получены с помощью вибрационного микротома 7000 см³-2 по протоколу Reagen M.A. с соавт. [2]. Преинкубирование проводили в отдельных лунках 12-луночного планшета со стандартной CO₂-кондиционированной средой DMEM с добавлением 0,1 мкМ дексаметазона и 10% FBS. Затем образцы инкубировали в течение 1 ч в среде DMEM на орбитальном шейкере (90 об/мин). Для введения наночастиц тканевые эксплантаты инкубировали в течение 3, 24 и 48 часов в среде DMEM с добавлением наночастиц в концентрации 50 и 100 мг/мл. Использовали наночастицы на основе трёх материалов: золото, SiO₂, полилактид (PLA). Наночастицы золота были синтезированы на основе затравочного механизма. Синтез наночастиц SiO₂ осуществлялся золь-гель методом. Наночастицы PLA были синтезированы методом экстракции растворителем в одиночной эмульсии. Средний размер всех наночастиц составлял 100 нм, все наночастицы были модифицированы флуоресцентной меткой Cy5. Срезы печени окрашивали LysoTracker Yellow НСК-123 и Phalloidin FITC. С помощью мультифотонной микроскопии оценивали структуру ткани срезов печени, визуализировали клеточные ультраструктуры, окрашенные флуоресцентными красителями. Распределение наночастиц в ткани печени анализировали с помощью рентгеновской микротомографии. Для этого образцы после фиксации в формалине дегидратировали в восходящих концентрациях спирта, помещали в спиртовой раствор йода на 14-18 часов и отмывали в чистом спирте. Визуализацию проводили на Xradia Versa 520. Используя FLIM, анализировали метаболическое состояние гепатоцитов на основе вклада времени жизни флуоресценции свободных и связанных форм NADH и NADPH.

В результате исследования было выявлено, что наиболее активным накоплением в клетках печени обладают наночастицы полилактида. Накопления наночастиц SiO₂ и золота практически не наблюдалось. Для наночастиц SiO₂ и золота была характерна высокая цитотоксичность. Методом FLIM было показано, что наночастицы полилактида обладают низкой цитотоксичностью и их введение не провоцирует метаболических перестроек, о чём свидетельствует отсутствие значимых отличий относительных вкладов времени жизни флуоресценции связанной формы NADH и NADPH от контрольных значений. Таким образом, наночастицы PLA представляются наиболее перспективными носителями для доставки биоактивных молекул в клетки печени. Полученные результаты станут основой для дальнейшей разработки стратегии стимуляции регенерации печени. Работа выполнена при поддержке Гранта РФ №23-25-00100.

[1] Jin, Y., Wang, H., Yi, K. et al., *Nano-Micro Lett.*, **13**, №25, 1-36. (2021).

[2] Pearen M.A., Lim H.K., Gratte F.D. et al., *JoVE*, **157**, e60992, (2020).

МЕТОД FLIM В ОЦЕНКЕ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПЕЧЕНИ ПРИ ТОКСИЧЕСКОМ ПОВРЕЖДЕНИИ НА МОДЕЛИ ТКАНЕВЫХ ЭКСПЛАНТАТОВ

**Крылов Д.П.^{1,2}, Козлов Д.С.^{1,2}, Родимова С.А.¹, Можеров А.М.^{1,2},
Карабут М.М.¹, Кузнецова Д.С.^{1,2}**

¹Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Россия

²Университет Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Проводили оценку структурно-функционального состояния ткани печени при токсическом повреждении с использованием методов мультифотонной микроскопии на модели тканевых эксплантатов. В результате выявлены характерные оптические критерии токсического повреждения печени на клеточном уровне.

Ключевые слова: оптический биоимиджинг, печень, токсическое повреждение.

Наиболее частой причиной развития острой печеночной недостаточности является поступление в организм высоких доз гепатотоксических веществ. При этом актуальной задачей остается поиск новых критериев развития острой или хронической патологии печени. Современные методы мультифотонной микроскопии, включающей время-разрешенную флуоресцентную микроскопию FLIM, расширяют возможности для оценки структурно-функционального состояния ткани печени на клеточном уровне [1]. Данные методы не требуют дополнительного окрашивания и позволяют проводить оценку не только структуры ткани, но и метаболического статуса гепатоцитов. В тканевых эксплантатах печени сохраняются межклеточные взаимодействия нативной ткани, что позволяет моделировать патологические изменения, вызванные наиболее часто встречаемыми гепатотоксическими агентами - парацетамол, четыреххлористый углерод (CCl₄) и этанол. Цель работы - оценка структурно-функционального состояния печени при токсическом повреждении методами мультифотонной микроскопии, на модели тканевых эксплантатов. Для получения тканевых эксплантатов печени использовали вибрационный микротом 7000 см³-2.

Полученные эксплантаты помещали в отдельные лунки 12-луночного планшета со стандартной средой DMEM, кондиционированной CO₂, с добавлением 0,1 мкМ дексаметазона и 10% FBS, и инкубировали при 37 °С на орбитальном шейкере (90 об/мин) [2]. Для индукции токсического повреждения эксплантаты печени помещали на 3 ч в 10 мМ раствор парацетамола и 25 мМ раствор этанола, разведенного в DMEM. Для модели токсического повреждения CCl₄ эксплантаты печени инкубировали в течение 3 ч в стандартной среде DMEM в 12-луночном планшете, к крышке которого прикрепляли фрагмент фильтровальной бумаги, пропитанной 10 мкл CCl₄. В качестве контроля использовали эксплантаты печени, культивированные в среде DMEM без добавления токсинов. Мониторинг проводили через 3 ч, 24 ч и 48 ч инкубации. С применением FLIM проводили анализ метаболического статуса гепатоцитов на основе данных о вкладах времен жизни флуоресценции свободной и связанной форм НАДН и НАД(Ф)Н и их вкладов.

В результате были определены характерные оптические критерии токсического повреждения печени, которые были специфичны для каждого токсического агента. Методом мультифотонной микроскопии были выявлены клетки печени как с высокой, так и с низкой интенсивностью аутофлуоресценции НАД(Ф)Н, что указывает на наличие поврежденных гепатоцитов. Важно отметить, что индуцированное парацетамолом токсическое поражение характеризовалось увеличением вклада связанной формы НАД(Ф)Н, тогда как воздействие этанола и CCl₄ показало достоверное снижение вклада связанной формы НАД(Ф)Н, что отражает специфичные отличия в механизмах повреждения каждым токсическим агентом. Полученные результаты согласуются со стандартными методами молекулярного и морфологического анализа. Таким образом, используемый в данной работе подход на основе методов мультифотонной микроскопии эффективен для прижизненного мониторинга состояния ткани печени при токсическом повреждении.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (№22-25-00098).

[1] Roberts M.S., Dancik Y., et al., *Eur J Pharm Biopharm*, **77**, №3, 469-488, (2011).

[2] Pearen M.A., Lim H.K., Gratte F.D., et al., *JoVE*, **157**, e60992, (2020).

**ВЛИЯНИЕ L-АРГИНИНА НА АГРЕГАЦИЮ ЭРИТРОЦИТОВ:
РОЛЬ ЭНДОТЕЛИЯ**

**Максимов М.К.¹, Ермолинский П.Б.¹, Щегловитова О.Н.²,
Умеренков Д.А.¹, Луговцов А.Е.¹, Приезжев А.В.¹**

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

²НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия

В данной работе методом лазерного захвата было исследовано влияние аминокислоты L-аргинина на парную агрегацию эритроцитов в присутствии монослоя эндотелия. Установлено “колоколообразное” снижение агрегации эритроцитов в ответ на L-аргинин.

Ключевые слова: агрегация эритроцитов, L-аргинин, эндотелий.

Важным свойством эритроцитов является способность к обратимой агрегации друг с другом, что значительно влияет на реологию крови и играет роль при многих социально-значимых заболеваниях (гипертоническая болезнь, сахарный диабет 2-го типа и др.) [1]. На агрегацию эритроцитов влияет множество факторов, одним из которых является концентрация сигнальных молекул в кровотоке. В число таких молекул входит оксид азота (NO), вырабатываемый эндотелиоцитами, выстилающими стенки сосудов изнутри, через катализ аминокислоты L-аргинина ферментом эндотелиальной синтазой оксида азота. Эндотелиальная синтаза оксида азота также обнаружена в эритроцитах. Помимо прочего, эритроциты способны адгезировать к эндотелию, что вызывает патологические состояния при некоторых заболеваниях (серповидно-клеточная анемия, малярия) [2].

В данной работе методом захвата и манипулирования отдельными клетками с помощью лазерных ловушек исследовалась парная агрегация эритроцитов. Толщина кюветы составляла около 300 мкм, объём около 300 мкл. Кювета заполнялась плазмой крови с эритроцитами при низком гематокрите (0.1%), в части экспериментов на дне кюветы находилось стёклышко с монослоем эндотелия. Сила агрегации эритроцитов – минимальная сила, необходимая для предотвращения спонтанной агрегации двух эритроцитов, приведённых в контакт. Чтобы уменьшить разброс данных, вызванный индивидуальными особенностями доноров эритроцитов и эндотелиоцитов, значения измерений были нормированы на среднее значение для контроля. Статистическая значимость зарегистрированных различий рассчитывалась по критерию Манна-Уитни.

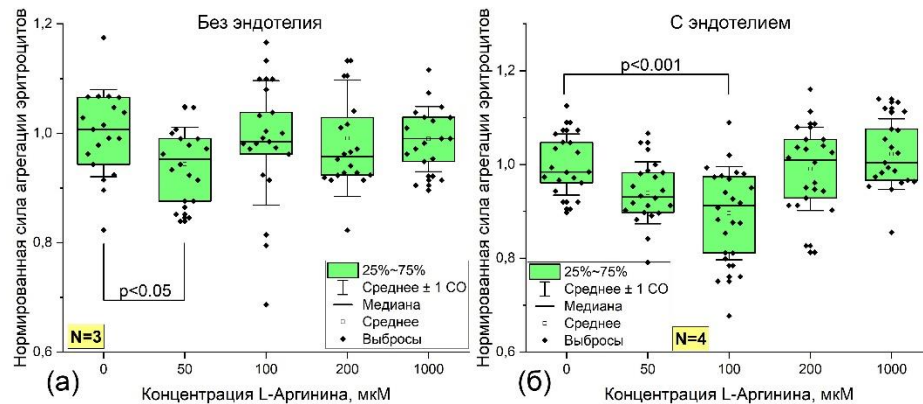


Рисунок. Зависимость силы парной агрегации эритроцитов от концентрации L-аргинина, (а) – в кюветах без эндотелия, (б) – в кюветах с эндотелием

Добавление L-аргинина вызывает снижение силы агрегации (рисунок). При этом в кювете без эндотелия максимум эффекта наблюдается при 50 мкМ, в то время как в кювете с эндотелием максимум приходится на 100 мкМ. Также заметно, что в присутствии эндотелия эффект больше по амплитуде, что связано с выделением оксида азота эндотелием. Интересен “колоколообразный” характер зависимости: увеличение концентрации L-аргинина приводит к исчезновению эффекта, что связано с ингибированием синтазы оксида азота своим продуктом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-15-00120).

[1] Maslianitsyna A., Ermolinskiy P., Lugovtsov A., Figurenko A., Sasonko M., Gurfinkel Y., Priezzhev A., *Diagnostics*, **11**(1), 76, (2021).

[2] Wautier J.L., Wautier M.P., *Int. J. Mol. Sci.*, **21**(15), 5315, (2020).

СПЕКТРОСКОПИЯ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ЖЕЛЧИ В ОЦЕНКЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПЕЧЕНИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЖЕЛТУХЕ ПОСЛЕ АНТЕГРАДНОЙ ДЕКОМПРЕССИИ

Приземин В.Н.¹, Сумин Д.С.^{1,2}, Мамошин А.В.^{1,2}, Потапова Е.В.¹

¹Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Россия

²Орловская областная клиническая больница, г. Орёл, Россия

В работе показано, что изменения спектров комбинационного рассеяния желчи могут выступить в качестве прогностических признаков течения печеночной недостаточности. Описывается исследование пациентов с различной динамикой выздоровления после антеградной декомпрессии желчевыводящей системы.

Ключевые слова: спектроскопия комбинационного рассеяния, механическая желтуха, желчь.

Послеоперационная оценка состояния функционального состояния печени имеет решающее значение для улучшения результатов лечения пациентов с синдромом механической желтухи (МЖ). Специфические функции печени, такие как детоксикационная, синтетическая (синтез желчных кислот), выделительная (выведение билирубина) важны для оценки интегративной деятельности организма [1]. Исследование содержания и концентрации компонентов желчи дает дополнительную диагностическую информацию о функциональном состоянии паренхимы печени [2]. Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) желчи, полученной по дренажному катетеру при выполнении антеградной декомпрессии желчевыводящей системы и в динамике послеоперационного периода, может быть использована для определения концентрации билирубина в желчи.

Для регистрации спектров КР желчи использовалась установка, включающая в себя: спектрометр QEPRO-RAMAN, лазер 785-LAB-ADJ, держатель для кювет 10x10 мм OOA-HOLDER-RFA Raman Sample Holder и зонд RIP-RPB-785-FC-SMA. В исследовании приняло участие 15 пациентов с синдромом МЖ различной этиологии и 3 пациента без симптоматики МЖ. Забор образцов желчи осуществлялся в день проведения антеградной декомпрессии желчевыводящей системы, а затем каждые 3-е суток с получением до 4 образцов у каждого пациента. Обнаружение билирубина проводилось в спектральных полосах: 1258-1264 см⁻¹ и 1615-1620 см⁻¹ [3].

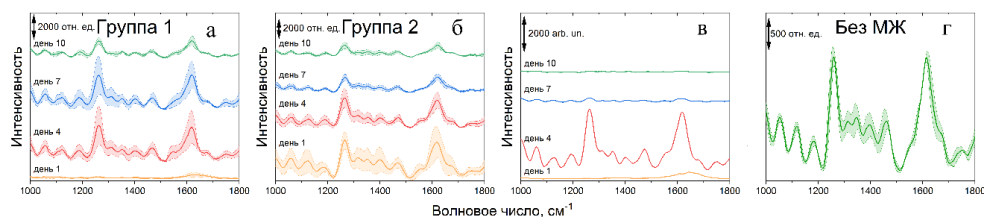


Рисунок. Спектры КР желчи пациентов: а, б) с положительной динамикой течения патологического процесса в печени, в) с отрицательной динамикой течения патологического процесса в печени, г) без синдрома МЖ

После анализа полученные данные были разделены на три группы: спектры желчи пациентов с синдромом МЖ с положительной динамикой течения патологического процесса в печени представлены на рисунке (а, б), пациента с отрицательной динамикой течения патологического процесса в печени – на рисунке (в), пациентов без синдрома МЖ – на рисунке (г). В день выполнения декомпрессии желчевыводящих путей первая группа характеризовалась высокой амплитудой пиков билирубина, что указывает на повышенную концентрацию пигмента в желчи. Во второй группе пики билирубина не выделялись, либо имели меньшую интенсивность в сравнении с образцами желчи первой группы пациентов. Группы пациентов с положительной реакцией паренхимы печени на билиарную декомпрессию показали нормализацию пиков КР билирубина к уровню пациентов без синдрома МЖ. У пациента с отрицательной динамикой течения патологического процесса в печени наблюдалось кратковременное восстановление выделительной функции печени после оперативного вмешательства с последующим ее угнетением.

Предложенная методика может стать основой прогнозирования динамики оценки функционального состояния печени у пациентов с МЖ после проведения декомпрессии желчевыводящей системы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-25-00487, <https://rscf.ru/project/23-25-00487/>.

[1] Ганиткевич Я.В., Карбач Я.И. - К., *Вища шк. Головное изд-во.*, 136, (1985).

[2] Kandurova K., Golubova N., Prizemin V., Sumin D., Adamenkov N., Shabalin V., Mamoshin A., Potapova E., *Proc. SPIE.*, **12147**, 8, (2022).

[3] Yang B., Morris M.D., Xie M. and Lightner D.A., *Biochemistry*, **30**, №3, 688–694, (1991).

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНСАМБЛЯ РАКОВЫХ КЛЕТОК В УСЛОВИЯХ ИММЕРСИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ПРОСВЕТЛЕНИЯ

Светлицына Н.А., Тучин В.В., Семенова Н.И.

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

В данной работе исследуется процесс развития и роста раковых клеток на двумерной поверхности эпидермиса при наличии осмотического давления, которое прикладывается к некоторой части рассматриваемой поверхности. Используемая модель представляет собой систему уравнений в частных производных, основанную на уравнении «реакции-диффузии» и логистической модели распространения эпидемий.

Ключевые слова: меланома, просветление, эпидермис.

Исследуемая система основана на наших работах [1, 2], в которых рассматривалась динамика роста раковых клеток в условиях влияния осмотического давления как на всю рассматриваемую поверхность [1], так и на ее часть [2] эпидермиса в условиях иммерсионного оптического просветления. Было показано, что имеет смысл изменять давление в области не менее 1x1 мм из рассматриваемых 2x2 мм. Целью данной работы является установление особенностей влияния длительности и времени начала действия локализованного дополнительного давления на динамику роста раковых клеток.

В качестве системы рассматривается двумерная клеточная решетка, представляющая собой слой эпидермальных клеток на базальной мембране [3] размером 200x200 (2x2 мм). Эволюция отношения раковых клеток к общему числу клеток в выбранной области пространства и времени $\phi(x, y, t)$ приведена на рис. а–в. Динамика роста усредненного по всей поверхности значения $\phi_{cp}(t)$ приведена на рис. г, где 25 единиц безразмерного времени соответствуют примерно 30 мин [3]. На рис. д приведены отношения числа раковых клеток к общему числу в моменты времени 1000 и 10000 для разных моментов включения дополнительного давления 0.5П от изначального давления $\Pi \approx 10^3$ Па на площадке 100x100. Рассматривалось два возможных способа введения давления: краткосрочное воздействие, когда давление задается 0.5П в течение времени 25, и когда давление 0.5П задается до конца моделирования. Пунктиром показана величина, полученная без введения дополнительного давления.

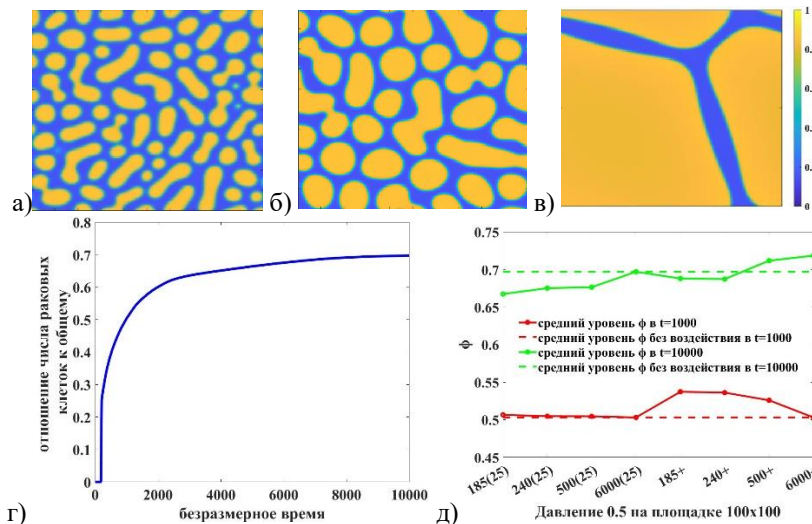


Рисунок. Временная эволюция двумерной системы в моменты времени: а) 500, б) 1000, в) 10000; г) – динамика роста отношения количества раковых клеток к общему числу клеток без дополнительного давления; д) – динамика роста отношения областей с преобладанием раковых клеток к общему числу клеток в зависимости от момента начала и интервала введения дополнительного давления

Из рис. д следует, что длительное воздействие приводит к увеличению числа раковых клеток по сравнению с изначальным случаем. Если же вводить давление краткосрочно (около 30 мин), то однократное воздействие не приводит к серьезным изменениям через 20 часов (1000 единиц безразмерного времени), но примерно через неделю (10000 единиц безразмерного времени) число раковых клеток уменьшается на ~3%.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (проект № FSRR-2023-0007).

[1] Семенова Н.И., Тучин В.В., *Известия вузов. ПНД*, **29**, №4, 559–570, (2021).

[2] Светлицына Н.А., Тучин В.В., Семенова С.И., *Нелинейные дни в Саратове для молодых: сборник научных трудов*, **17**, 150-151, (2023).

[3] Hoshino T., Liu M.-W., Wu K.-A., Chen H.-Y., Tsuruyama T., *Phys. Rev. E.*, **99**, №3, 032416, (2019).

ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЕРФУЗИОННО-КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗДОРОВЫХ И РАКОВЫХ ТКАНЕЙ ЯИЧНИКОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ГЛИЦЕРИНА

Селифонов А.А.¹, Тучин В.В.^{2,3}

¹Образовательно-научный институт наноструктур и биосистем, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

²Научный медицинский центр, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

³Лаборатория лазерной молекулярной визуализации и машинного обучения, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

В данной работе исследовали оптические свойства тканей яичников кошек в норме и при онкологической патологии под воздействием глицерина методом отражательной спектроскопии в диапазоне от 200 до 800 нм. Определены перфузионно-кинетические параметры процесса диффузии глицерина в исследуемых тканях.

Ключевые слова: спектроскопия диффузного отражения; яичник; глицерин.

Лечение некоторых детских заболеваний, злокачественных новообразований, некоторых анатомических особенностей может привести к бесплодию во взрослом возрасте. Криоконсервация является перспективным способом сохранения фертильности у таких женщин. Яичники удаляют во время лапароскопической овариэктомии и обрабатывают криоконсервантами, в частности глицерином [1]. Криоконсервация ткани яичника также предлагается пациенткам с доброкачественной патологией с риском преждевременной недостаточности яичников или в качестве альтернативы отсрочке беременности при климаксе у здоровых женщин. Однако для повышения выживаемости фолликулов требуется оптимизация методов криоконсервации. Значительное усовершенствование оптических технологий, позволяющих неинвазивно и точно визуализировать ткани на клеточном и даже субклеточном уровнях, безусловно, очень важно для приложений в клинической медицине [2-4]. Однако сложность применения оптических технологий в практике клиницистов связана с сильным рассеянием света для большинства тканей [2-4]. Метод иммерсионного оптического просветления уменьшает светорассеяние в тканях. Для этого используют как гиперосмотические, так и изосмотические средства [2-4], в частности, касторовое масло при колоноскопии [5]. Глицерин является одним из эффективных гиперосмотических агентов. В данном исследовании изменения оптических свойств здоровых и раковых тканей яичников кошек под действием глицерина изучались с помощью оптической спектроскопии диффузного пропускания и отражения в широком спектральном диапазоне от УФ до БИК. Выявлено, что при взаимодействии глицерина с тканью яичников наблюдается эффект оптического просветления, что выражается в увеличении пропускания излучения вглубь ткани. При количественной оценке данного эффекта выявлено, что наибольшая эффективность оптического просветления наблюдается в УФ области спектра, хотя абсолютные значения коэффициента пропускания не превышают 0.5%. С использованием модели свободной диффузии и модифицированных уравнений для молекулярной диффузии Фика [6] и закона ослабления излучения Бугера-Бера-Ламберта [3] рассчитаны коэффициенты диффузии интерстициальной воды, индуцированной осмотическим действием глицерина, в тканях яичников. С помощью полученного коэффициента определяли время полной дегидратации всего яичника [7], что важно для лучшего понимания механизмов криоконсервации яичников.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 22-75-00021 от 28.07.2022 г.

[1] Hinkle K., Orwig K.E., Valli-Pulaski H., Taylor S., Leeuwen K., Carpentieri D., Walsh A., Cryopreservation of ovarian tissue for pediatric fertility. *Biopreservation and Biobanking*, **19**, №2, p. 130-135, (2021).

[2] Genina E.A., Bashkatov A.N., Tuchin V.V., Tissue optical immersion clearing. *Expert Rev. of Med. Devices*, **6**, p. 825-842, (2010).

[3] Tuchin V.V., Optical Clearing of Tissues and Blood; *SPIE Press: Bellingham, USA*, (2006).

[4] Selifonov A.A., Tuchin V.V. Chapter 36. Optical clearing and molecular diffusivity of hard and soft oral tissues. In *Handbook of Tissue Optical Clearing : New Prospects in Optical Imaging*, Eds. Tuchin, V.V.; Zhu, D.; Genina, E.A., *Boca Raton: CRC Press*, p. 629-646, (2022).

[5] Deding U., Jensen S.S., Schelde-Olesen B., Kaalby L., Bjorsum-Meyer T., Koulaouzidis A., Systematic Review: Castor Oil in Bowel Preparation Regimens for Colon Capsule Endoscopy: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Diagnostics*, **12**, №11, p. 2792-2799, (2022).

[6] Kotyk A., Janacek K., Cell Membrane Transport. Principles and Techniques, 2nd ed.; *Plenum Press: New York and London*, p. 501-583, (1974).

[7] Selifonov A.A., Tuchin V.V., Determination of the kinetic parameters of glycerol diffusion in the gingival and dentinal tissue of a human tooth using optical method: in vitro studies. *Optical and Quant. Electr.*, **52**, p. 123-127, (2020).

**АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ
ЭНДОГЕННЫХ ФЛУОРОФОРОВ БИОТКАНЕЙ МЕТОДАМИ
ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

**Хасан А.¹, Будылин Г.С.^{2,3}, Ровнягина Н.Р.³, Касьянова П.С.⁴, Якимов Б.П.^{3,4},
Гайер А.В.⁵, Ширшин Е.А.^{2,3,4}**

¹Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва, Россия

²Институт Спектроскопии РАН, ФГБУН, Москва, Россия

³Лаборатория Клинической Биофотоники, ФГАОУ ВО Первого МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия

⁴Лаборатория Лазерной Биофотоники, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Лаборатория гибридной фотоники, Федеральная политехническая школа Лозанны, Лозанна, CH-1015, Швейцария

Исследованы оптические свойства гетерогенных систем флуорофоров, и их связь с размерами агрегатов в системе. Обнаружено сверхбыстрое затухание флуоресценции в растворе крупных агрегатов. Результаты имеют важное значение для решения задач биофизики.

Ключевые слова: автофлуоресценции, меланин, триптофан.

Эндогенная автофлуоресценция (АФ) биологических систем является важным источником информации для биомедицинской диагностики, например, её используют как маркер онкологических заболеваний - позволяет определять тип ткани (здоровый или больной) [1]. Несмотря на то, что флуоресцентная спектроскопия широко используется для нужд биомедицинской диагностики, природа наблюдаемого сигнала в ряде случаев неясна. К таким примерам относится новый сигнал флуоресценции амилоидных фибрилл в инфракрасном (ИК) диапазоне в мозге мышей с болезнью Альцгеймера [2].

Существуют две гипотезы относительно природы автофлуоресценции биомолекул и биологических тканей в видимой и ближней инфракрасной (БИК) области спектра, в ряде работ показано, что возникновение АФ в видимой/ИК области может сопровождаться формированием супрамолекулярных агрегатов в органических системах, например, при агрегации белка с последующим формированием амилоидных фибрилл [2]. Другие работы связывают появление данного сигнала с химическими модификациями, происходящими в системе [3], которые также могут сопровождаться формированием гетерогенной системы агрегатов. Для лучшего понимания природы сигнала АФ в таких системах необходимо анализировать оптические свойства макромолекул гетерогенной системы флуорофоров и их взаимосвязь с размерами агрегатов.

В данной работе были анализированы спектры поглощения и флуоресценции водного раствора синтетического меланина и продуктов окисления аминокислоты триптофана, формирующихся в результате фотоокисления (УФ-излучения, максимум эмиссии 254 нм, интенсивность излучения на образце ~ 10 мВт/см²) и исследованы оптические свойства образуемых агрегатов разных размеров, полученных в результате последовательной фильтрации через серию фильтров с порами различных размеров (1.3-450 нм). Было установлено что, уменьшение размеров агрегатов в растворе влечет за собой уменьшение обратного наклона спектров поглощения Λ и увеличение квантовый выход флуоресценции.

В данном исследовании также был произведен анализ механизмов затухания флуоресценции и анизотропии флуоресценции предоставленных систем с помощью метода время-коррелированного счёта единичных фотонов (TCSPC) с пикосекундным временным разрешением и метода ап-конверсии флуоресценции с фемтосекундным временным разрешением. С помощью метода ап-конверсии было показано наличие сверхбыстрого затухания флуоресценции в растворе крупных агрегатов. Данная компонента не наблюдалась для низкомолекулярной фракции. Полученные результаты дают новое понимание механизмов формирования оптических свойств в гетерогенных системах флуорофоров в различных биологических системах.

Благодарности:

Работа выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина». Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант 22-25-00864).

[1] Jacobson M.C, et al., *J. Biomed. Opt.*, **17**, №3, 036011, (2012).

[2] Pansieri J., et al., *Nat. Photonics.*, **13**, 473, (2019).

[3] Semenov A.N., et al., *Molecules.*, **25**, 1863, (2020).

ОПТИЧЕСКАЯ МЕТРОЛОГИЯ

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛУВОЛНОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ KDP, DKDP
В ПЕРЕМЕННОМ СИНУСОИДАЛЬНОМ ПОЛЕ**

Арсентьев С.С.^{1,2}, Смирнова Е.А.^{1,2}, Хышов А.А.², Новиков М.А.²

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

²ИПФ РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород, Россия

Предлагается оригинальная методика измерения полуволнового напряжения кристаллов в переменном синусоидальном поле с использованием функций Бесселя. Получены значения полуволнового напряжения в кристаллах KDP, DKDP.

Ключевые слова: полуволновое напряжение, переменное поле.

В данной работе измерение полуволнового напряжения производится в переменном электрическом поле, в отличие от стандартных методов, в которых используется постоянное электрическое поле [1]. Измерение производится в двухпроходной оптической установке, оптическая схема приведена на рисунке ниже.

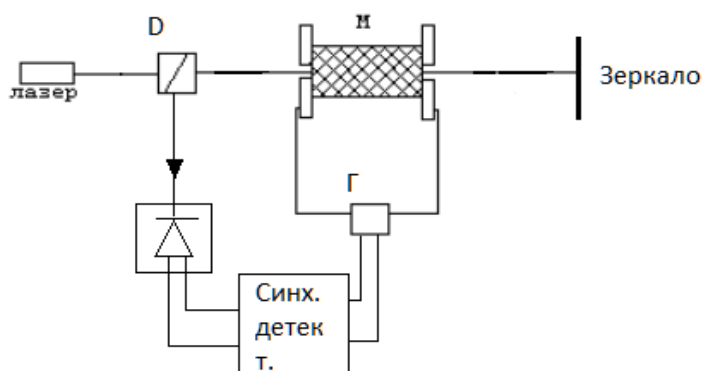


Рисунок. Двухпроходная оптическая схема для измерения полуволнового напряжения кристаллов. D – поляризационный расщепитель, Г – генератор электрического поля, М – кристалл с электродами

Двухпроходная схема позволяет увеличить фазовый набег в два раза, из-за чего можно использовать генераторы с меньшим выходным напряжением.

Измерение полуволнового напряжения основывается на разложении регистрируемого сигнала по функциям Бесселя (1).

$$I = I_0 \cdot \sin^2 \left(\frac{\Gamma_0}{2} \sin(\omega t) \right) = \frac{1}{2} I_0 \left(1 - J_0 - 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(\Gamma_0) \cos 2k\omega t \right), \quad (1)$$

где I – регистрируемая интенсивность света, I_0 – начальная интенсивность света, Γ_0 – фазовая задержка, ω – частота переменного электрического поля, J_0 – функция Бесселя нулевого порядка, $J_k(\Gamma_0)$ – функция Бесселя k -го порядка, t – время.

Для кристаллов KDP, DKDP были измерены значения полуволнового напряжения в схеме с продольным электрооптическим эффектом. Показана высокая сходимость с табличными значениями.

Исследование выполнено при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

[1] Yutong Wu and Bo Su, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1600**, 012083, (2020).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАРТМАНОМЕТРА И ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФИЗО В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Галактионов И.В.¹, Никитин А.Н.¹, Шелдакова Ю.В.¹, Топоровский В.В.¹,
Денисов Д.Г.², Сахаров А.А.², Карасик В.Е.², Кудряшов А.В.¹

¹ИДГ РАН, Москва, Россия

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

В работе рассмотрены две методики измерения качества оптических поверхностей. Представлены результаты измерения кривизны поверхности тестового оптического элемента с помощью интерферометра Физо и гартманометра — устройства на основе датчика Шака-Гартмана.

Ключевые слова: гартманометр, интерферометр Физо, датчик волнового фронта Шака-Гартмана.

Одним из традиционных устройств, использующих явление интерференции для контроля качества поверхности оптического элемента [1], является интерферометр Физо [2]. Альтернативное устройство, также широко используемое для этих целей, это датчик волнового фронта Шака-Гартмана [3, 4].

Лаборатория адаптивной оптики много лет занимается разработкой деформируемых зеркал для адаптивных оптических систем [5] и использует оба представленных метода для тестирования отражающих поверхностей. Одним из основных параметров, которые необходимо контролировать при изготовлении деформируемых зеркал [6], является плоскостность. Для этого можно использовать традиционный интерферометр Физо. Однако деформируемое зеркало представляет собой оптико-механический узел, который используется для коррекции волнового фронта излучения путем изменения формы отражающей поверхности. Поэтому на этапе итогового контроля необходимо анализировать оптические поверхности со значительными, до нескольких десятков микрон, отклонениями от плоскости. На этом этапе используется датчик Шака-Гартмана.

В результате исследований было разработано принципиально новое устройство, названное гартманометром. Фактически, сильно упрощая, гартманометр можно получить, если удалить из схемы интерферометра Физо клин с эталонной поверхностью, заменить цифровую камеру на датчик Шака-Гартмана, а высококогерентный источник излучения — на одномодовый волоконно-оптический лазер, например диодный.

В работе представлен метод калибровки разработанного устройства. На рисунке ниже приведены результаты измерения волнового фронта тестируемой оптической поверхности с помощью классического интерферометра Физо и разработанного гартманометра.

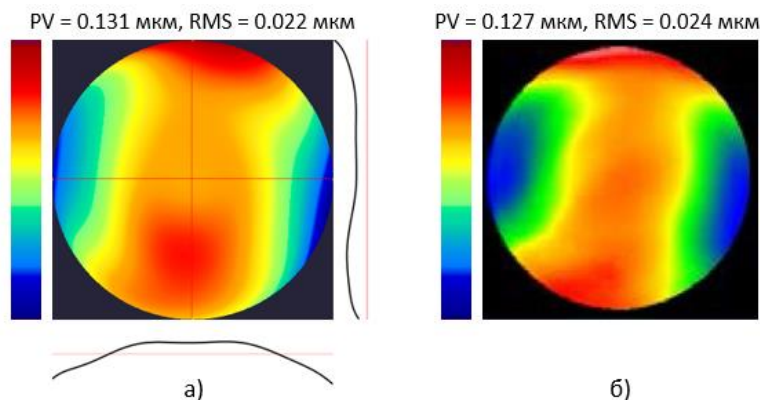


Рисунок. Форма поверхности тестового объекта, измеренная с помощью а) гартманометра, б) интерферометра Физо

Общая амплитуда искажений волнового фронта, измеренная с помощью интерферометра Физо, составила 0.127 мкм (СКО 0.024 мкм). Гартманометр показал амплитуды искажений 0.131 мкм (СКО 0.022 мкм).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-19-00597.

[1] Malacara D., *Optical Shop Testing*, 3th Ed., John Wiley & Sons, New York, (2007).

[2] Galaktionov I., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A., *Proc. SPIE*, **12223**, 122230T, (2022).

[3] Neal D., Copland J., Neal D., *Proc. SPIE*, **4779**, (2002).

[4] Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., Kudryashov A., *Proc. SPIE*, **11818**, 118180N, (2021).

[5] Belousov V., Galaktionov I., Kudryashov A., Nikitin A., Otrubyannikova O., Rukosuev A., Samarkin V., Sivertceva I., Sheldakova J., *Proc. SPIE*, **11560**, 1156026, (2020).

[6] Galaktionov I., Sheldakova J., Toporovsky V., Samarkin V., Kudryashov A., *Proc. SPIE*, **11672**, 1167214, (2021).

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ И АМПЛИТУДНЫХ ШУМОВ
ОДНОЧАСТОТНЫХ ЛАЗЕРОВ

Загорулько К.А.¹, Козлов А.В.^{1,2}, Хатырев Н.П.¹

¹ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская область, Россия

²НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

Выполнены измерения частотных и амплитудных шумов узкополосных лазеров. Измерения частотных шумов проведены с использованием метода оптического гетеродинамирования с прямыми измерениями частотных шумов лазеров с помощью радиочастотного анализатора фазовых шумов.

Ключевые слова: частотные шумы, амплитудные шумы, одночастотные лазеры.

Одночастотные лазеры (ОЧЛ) широко используются в различных приложениях: атомные стандарты частоты, гравиметрия, лазерная спектроскопия, радиофотоника, оптоволоконная связь, сенсорные приложения, LIDAR и др. Для многих приложений наиболее важной характеристикой ОЧЛ является "спектральная чистота", определяемая частотным шумом S_ν (ЧШ), спектральной шириной линии (СШЛ) и стабильностью частоты. Следует отметить, что спектральная плотность мощности ЧШ S_ν (в единицах Гц²/Гц) является наиболее информативным параметром, поскольку она может использоваться для оценки СШЛ [1] и расчета нестабильности частоты [2]. В настоящее время продолжают активные исследования по совершенствованию методик измерений ЧШ и СШЛ ОЧЛ [3, 4].

Также важной характеристикой лазерных источников излучения, в том числе ОЧЛ, является относительный амплитудный шум (Relative Intensity Noise - RIN). Хотя методики измерения RIN хорошо известны, серийно выпускаемые полупроводниковые лазеры с распределённой обратной связью (Distributed Feedback - DFB) могут иметь RIN на уровне - 165 дБн/Гц, что затрудняет измерение этой характеристики. Также известно, что узкополосные волоконные ОЧЛ с лоренцевой СШЛ менее 1 кГц имеют намного больший RIN, чем, например, полупроводниковые DFB-лазеры с лоренцевой СШЛ в диапазоне 50 кГц ÷ 10 МГц [5]. Таким образом, узкополосные ОЧЛ с минимальными значениями ЧШ, как правило, имеют большие значения RIN и для многих приложений при выборе типа используемых ОЧЛ может потребоваться компромисс между характеристиками ЧШ и RIN.

В данной работе для измерений ЧШ ОЧЛ использовался метод оптического гетеродинамирования [3]. С помощью фотоприёмника был получен радиочастотный сигнал биений двух ОЧЛ и проведены измерения ЧШ этого сигнала, который равен сумме ЧШ тестируемых ОЧЛ. В работе будут представлены результаты измерений ЧШ и RIN следующих ОЧЛ: трех волоконных лазеров разных производителей, двух полупроводниковых DFB-лазеров, полупроводникового лазера с внешним резонатором на брэгговской решётке в оптическом волноводе и полупроводникового перестраиваемого лазера с внешним резонатором типа ITLA. Также будут рассмотрены преимущества и недостатки методики измерений ЧШ с использованием оптического гетеродинамирования в сравнении с методиками самогетеродинамирования.

[1] Domenico G. Di, Schilt S., Thomann P., *Appl. Opt.*, **49**, 25, 4801–4807, (2010).

[2] Риле Ф., Стандарты частоты. Принципы и приложения. М.: Физматлит, 67-70, (2009).

[3] Bai Z., Zhao Z., Qi Y., Ding J., Li S., Yan X., Wang Y. and Lu Z., *Front. Phys.*, **9**, 768165, (2021).

[4] Kantner M., Mertenskötter L., *Optics Express*, **31**, 10, 15994-16009, (2023).

[5] Llopis O., Bailly G., Bougaud A., Fernandez A., *2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF)*, 446-448, (2020).

РАСЧЕТ ЛИДАРНЫХ СИГНАЛОВ В ИНФОРМАТИВНОМ ДИАПАЗОНЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ

Кравцова Н.С., Садовников С.А., Яковлев С.В., Тужилкин Д.А.

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

Уровень концентраций парниковых газов в атмосфере является определяющим фактором формирования климата планеты. Вследствие сильного влияния парниковых газов на климат Земли, наблюдение за их содержанием в атмосфере является актуальной проблемой.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, парниковые газы, атмосфера.

Среди систем дистанционного лазерного газоанализа атмосферы на сегодняшний день наибольшее распространение получили лидары дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР) [1, 2]. Для трассовых измерений концентраций нескольких газовых компонент атмосферы широко используется дифференциальная оптическая абсорбционная спектроскопия (ДОАС) [3]. В рамках исследования был проведён расчет спектров пропускания атмосферы с использованием параметров спектроскопической базы данных HITRAN [4], позволивший обнаружить наиболее подходящий спектральный диапазон при одновременном МДП-ДОАС зондировании углекислого газа (CO_2) и водяного пара (H_2O) в ближней ИК области спектра. Проведена оценка степени перекрытия поля зрения приемного телескопа и лазерного пучка при различных параметрах приемо-передающего тракта. Исследованы энергетические характеристики лазера, обеспечивающего генерацию импульсного излучения в спектральных диапазонах 1795–2615 нм, который будет использован для создания экспериментального образца лидара. Для различных сезонов рассчитаны сечения поглощения CO_2 и H_2O , которые будут применены при проведении тестовых испытаний по восстановлению концентраций исследуемых газов с использованием разрабатываемой лидарной системы. На трассах различной протяжённости (вплоть до 3 км) проведено численное моделирование эхо-сигналов.

В качестве основных входных параметров для численного моделирования лидарных сигналов выступали: длина волны генерации лазера, энергия в импульсе лазерного излучения, аппаратная функция, диаметр приемной апертуры телескопа, характеристики элементов фотоприёмного тракта функция перекрытия и др. Моделирование проведено для условий атмосферы лета и зимы средних широт с использованием метеорологических моделей USA [5]. Вместе с тем, применялась оптико-локационная модель континентального аэрозоля [6]. Результаты моделирования приведены на рисунке ниже.

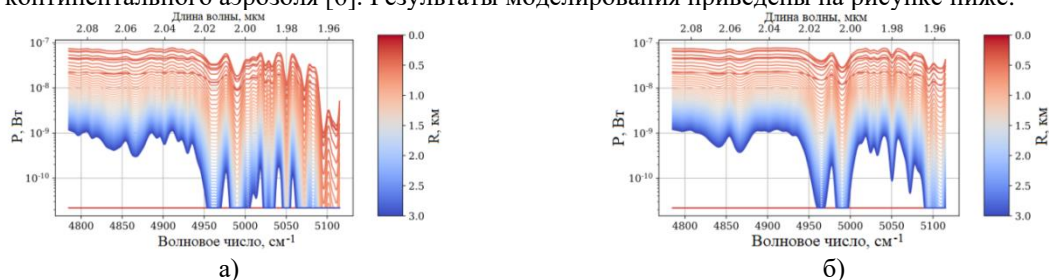


Рисунок. Рассчитанные эхо-сигналы в информативном диапазоне зондирования CO_2 и H_2O двухканальным лидаром ИК-диапазона (а – лето средних широт, б – зима средних широт)

Из рисунков видно, что для полосы поглощения в спектральном диапазоне 4800–4900 cm^{-1} уровень лидарных сигналов лежит в интервале значений 10^{-7} – 10^{-10} Вт/Гц^{0.5}, что превышает заданный NEP фотодетектора 10^{-11} Вт/Гц^{0.5}. Таким образом, можно сделать вывод о возможности регистрации лидарных сигналов с заданными характеристиками системы. На основе результатов численного моделирования и измерения характеристик приемо-передающих элементов разрабатываемой системы предложены различные конфигурации технического исполнения лидара.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10203, <https://rscf.ru/project/22-79-10203/>.

- [1] Wagner G.A., Plusquellic D.F., *Opt. Express*, **26**, №15, 19420-19434, (2018).
- [2] Matvienko G.G., Sukhanov A.Y., *Remote Sens.*, **11**, №6, 1-18, (2019).
- [3] Platt U., Perner D., Paetz H.W., *J. Geophys. Res.*, **84**, №C10, 6329-6335, (1979).
- [4] Gordon I.E., Rothman L.S., Hargreaves R.J. et al., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **277**, 1-82, (2022).
- [5] U.S. Standard Atmosphere, *US Government Printing Office.*, 243, (1976).
- [6] Креков Г.М., Рахимов Р.Ф., *Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука*, 199, (1982).

**БИНАРИЗАЦИЯ АМПЛИТУДНЫХ ГОЛОГРАММ ФРЕНЕЛЯ,
СИНТЕЗИРОВАННЫХ В РАСХОДЯЩИХСЯ ПУЧКАХ, С ПОМОЩЬЮ
МЕТОДА ПРЯМОГО ПОИСКА СО СЛУЧАЙНОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ**
Овчинников А.С., Черёмхин П.А., Родин В.Г., Савченкова Е.А., Свистунов А.С.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В представленной исследовательской работе рассматривалась возможность улучшения существующего метода синтеза бимодальных голограмм Френеля, синтезированных в расходящихся пучках. Были получены голограммы изображения в оттенках серого, произведены численные, а также, при помощи DMD, оптические эксперименты.

Ключевые слова: амплитудные голограммы, методы бинаризации.

При помощи бинарных микрозеркальных модуляторов света (DMD) возможно произвести быстрое воссоздание голографических и дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1]. В представленной работе были рассмотрены варианты улучшения метода синтеза бимодальных голограмм Френеля [2], которые заключаются в выборе наиболее подходящего алгоритма бинаризации. Метод синтеза состоит из трёх этапов: видеоизмененный алгоритм Герчберга-Сакстона [3], применение глобального метода бинаризации по Отсу и прямой поиск со случайной траекторией (ППСТ). Применение ППСТ позволяет существенно повысить качество реконструкции и дифракционную эффективность (ДЭ). Однако этот заключительный шаг метода не является обязательным, в то время как шаг бинаризации необходим. Но раньше применялся только глобальный порог по Отсу [4]. Существуют группы методов бинаризации, которые потенциально могут обеспечить лучшие результаты.

Для численных экспериментов были выбраны изображения в оттенках серого размером 256×256 отсчетов. Затем осуществлялось конструирование голограммы изображения в оттенках серого размером 1024×1024 отсчетов.

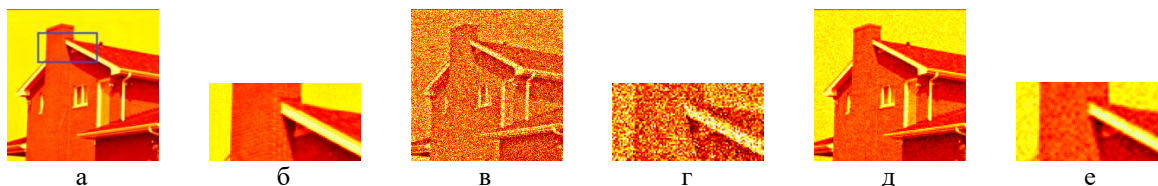


Рисунок. Численно восстановленное изображение (а) и его фрагмент (б), оптически восстановленное изображение после бинаризации по методу Сауволы (в) и его фрагмент (г), оптически восстановленное изображение после применения метода бинаризации Сауволы и ППСТ (д) и его фрагмент (е)

Далее синтезированная голограмма в оттенках серого была бинаризована с использованием методов различных типов – глобальных, локальных и диффузионных. А такие показатели как ДЭ, SSIM и MSE были выбраны для численного сравнения эффективности рассмотренных методов. Применительно к изображениям в оттенках серого метод Сауволы дает улучшение на 60% по сравнению со стандартным методом Отсу. После численных экспериментов, для бинарных голограмм, с помощью DMD было произведено численное реконструирование. Некоторые результаты численных и оптических экспериментов показаны на рисунке.

С использованием метода Сауволы на втором этапе синтеза голограммы Френеля было получено улучшение на 27% по метрике ДЭ, на 29% по метрике MSE и на 62% по метрике SSIM. А после ППСТ прирост составил 5% по метрике ДЭ, 11% по метрике MSE и 61% по метрике SSIM.

Применяя наиболее подходящий метод бинаризации, после реализации ППСТ, получается результат на 36% лучше относительно использования стандартного метода Отсу с последующим ППСТ. Так же и время вычислений снижается в 5 раз по сравнению со стандартным методом Отсу с последующим ППСТ.

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

- [1] Pan Y., Liu J., Li X., Wang Y., *IEEE Trans. Ind. Inform.*, **12**, 1599–1610, (2016).
[2] Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov R.S., Zlokazov E.Y., *Opt. Lasers Eng.*, **150**, 106859, (2022).
[3] Gerchberg R.W., Saxton W.O., *Optik*, **2**, 237–246, (1971).
[4] Ovchinnikov A.S., Krasnov V.V., Cheremkhin P.A., Rodin V.G., Savchenkova E.A., Starikov R.S., Evtikhiev N.N., *J. Imaging*, **9**, 28, (2023).

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ «ЭФФЕКТ ТАЛЬБОТА»
ДЛЯ НАУЧНЫХ ПРОЕКТОВ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ**

Пчелкина Н.В., Рабенандрасана Ж., Смольский А.А.

МГУСИ, Москва, Россия

Представлено описание лабораторной установки для демонстрации эффекта Тальбота и приведены примеры ее применения в учебно-исследовательских проектах. Показана высокая вариативность, установки для проведения научных исследований с использованием датчика волнового фронта, основанного на эффекте Тальбота.

Ключевые слова: датчик волнового фронта, эффект Тальбота, оптические неоднородности.

Освоение студентами различных разделов курса физики, например, понимание ряда оптических эффектов проходит более эффективно, когда подача теоретического материала дополняется наглядной демонстрацией физического явления в лабораторных условиях. При выполнении учебно-исследовательских проектов и лабораторных работ интерес к научной деятельности и мотивация студентов существенно возрастает, когда они не только выполняют рутинные измерения по заданному алгоритму, а могут варьировать условия эксперимента и проводить на этой установке самостоятельные исследования. Примером лабораторной работы, вызывающей интерес студентов к курсу атмосферной оптики, является лабораторная работа «Эффект Тальбота», которая была разработана в МГУСИ. В работе представлено описание, как самой лабораторной работы по изучению этого эффекта, так и возможных вариаций установки и применения ее для реализации конфигурируемого датчика волнового фронта (ДВФ) [1], с помощью которого могут проводиться исследование оптических неоднородностей разных сред [2]. Особый интерес вызывает практическая значимость исследований, проводимых студентами на этой установке. Известно, что при распространении лазерного излучения в атмосфере актуальной задачей является коррекция волнового фронта (ВФ) лазерного пучка с учетом возмущений оптической плотности, возникающих на трассе распространения лазерного излучения, где ключевым элементом является ДВФ, с помощью которого и производится регистрация ВФ [2]. Применение ДВФ на основе эффекта Тальбота позволяет визуализировать и исследовать оптические искажения, возникающие на трассе лазерного пучка с большими поперечными размерами [1]. Отсутствие оптики позволяет применять данные датчики в разных спектральных диапазонах и использовать для юстировки широкоапертурных оптических систем, в чем студенты могут убедиться самостоятельно. На рисунке приведены: фотография типичной реализации лабораторной установки и тальбограмма, полученная в первой плоскости воспроизведения.

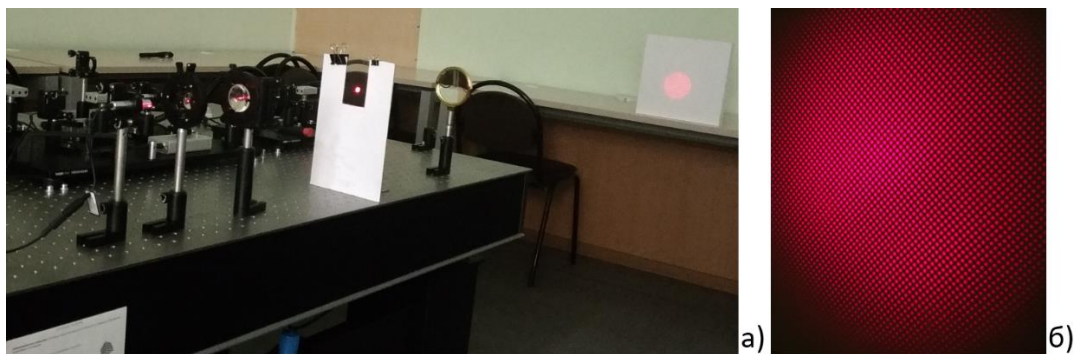


Рисунок. Фотографии: а) - лабораторной установки «Эффект Тальбота»; б) - тальбограмма в первой плоскости воспроизведения

Установлено, что проведение исследований на этой лабораторной установке позволяет отрабатывать навык командной работы, в частности, естественным образом формируется коллектив, кто с интересом занимается модификацией установки и проведением эксперимента и группа, которая концентрируется на математической обработке получаемых изображений (тальбограм). Показан значительный потенциал лабораторной установки «Эффект Тальбота» для выполнения учебно-исследовательских проектов студентов и аспирантов, а многофункциональность созданной платформы позволяет проводить широкий спектр научных исследований.

[1] Казанцев С.Ю., Музыка А.Ю., Пчелкина Н.В., Кузьмин М.С., Смольский А.А., Лазерно-информационные технологии 2022: труды XXX Международной научной конференции, 43-44. – EDN OXGHNH.

[2] Андреев С.Н., Казанцев С.Ю., Музыка А.Ю., X Международная конференция по фотонике и информационной оптике. 2021. 401-402. EDN: WCQHVN.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ
ФОТОТЕРМИЧЕСКИМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ**

**Арсентьев С.С.^{1,2}, Смирнова Е.А.^{1,2}, Хышов А.А.²,
Новиков М.А.², Лукьянов А.Ю.³**

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

²ИПФ РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород, Россия

³ИФМ РАН, Нижний Новгород, Россия

В данной работе рассматривается проблема изучения физических свойств кристаллов, широко используемых в нелинейной оптике. Для измерения объемного поглощения используется фототермический интерференционный метод измерения объемного поглощения в кристаллах. Показана возможность измерения объемного рассеяния света в кристаллах.

Ключевые слова: поглощение, кристаллы.

Фототермический интерференционный метод исследования объемного поглощения в кристаллах использует явление зависимости показателя преломления среды от её температуры. Интерферометр представляет собой прибор, оптическая схема которого представлена на рисунке ниже.

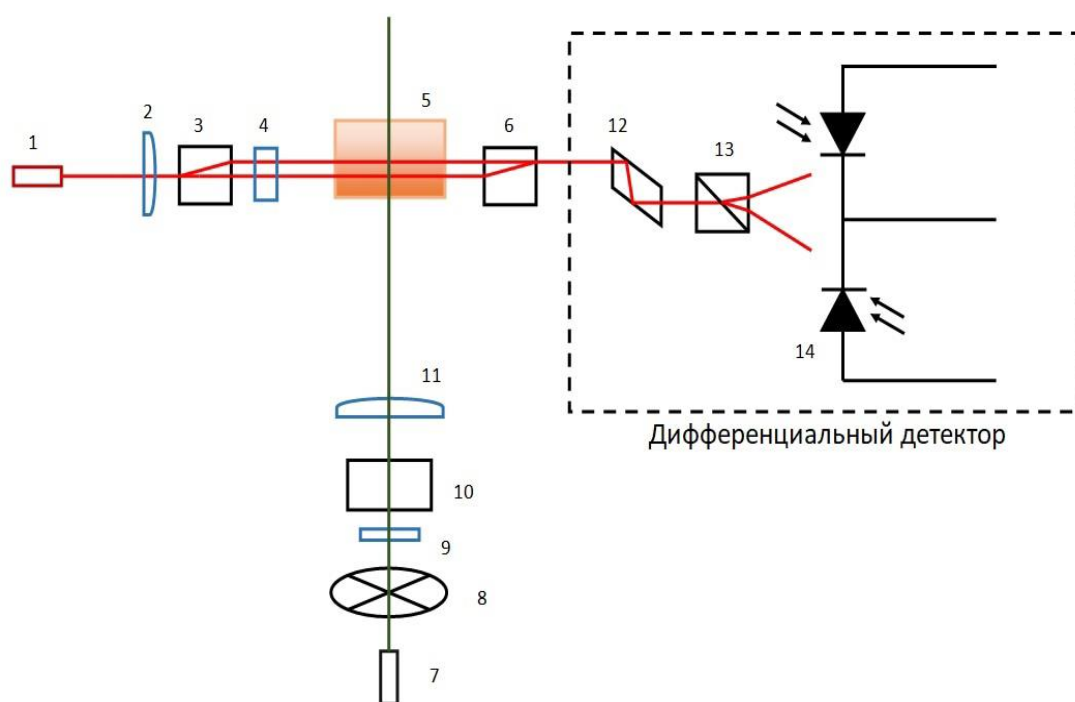


Рисунок. Схема интерферометра для исследования объемного поглощения: 1 – зондирующий лазер, 3, 6 – расщепители, 13 – призма Волластона, 4 – ротатор на 90°, 2 и 11 – линзы, 5 – исследуемый кристалл, 7 – лазер накачки, 8 – механический прерыватель, 9 – пластинка $\lambda/4$, 10 – поляризатор, 12 – ромб Френеля, 14 – фотодиоды

Разработан метод исследования объемного поглощения в кристаллах на основе поляризационного интерферометра Жамена-Лебедева. Метод обладает высокой чувствительностью и возможностью прецизионного сканирования всего объема кристалла за счет малых диаметров зондирующего пучка и пучка накачки, и направлен на выявление дефектных областей кристалла.

Установка протестирована на кристалле KDP для длин волн 1064 нм и 532 нм, полученные результаты соответствуют теории поглощения. Получены зависимости амплитуды фототермического сигнала от положения области пересечения зондирующего пучка и пучка накачки.

Показано, что с помощью данной установки можно исследовать не только поглощение кристалла, но и рассеяние, что также является приоритетной задачей в исследовании качества выращенных кристаллов.

Исследование выполнено при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

[1] Лукьянов А.Ю., Ральченко В.Г., Хомич А.В., Сердцев Е.В., Волков П.В., Савельев А.В., Конов В.И., *Квантовая электроника*, **38**, 12, 1171–1178, (2008).

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ИЗ ДВУХ СВЯЗАННЫХ СУБВОЛНОВЫХ РЕШЕТОК С ОПТИЧЕСКОЙ РТ-СИММЕТРИЕЙ

Венедиктов В.Ю.^{1,2}, Ефремова Е.А.³, Зинчик А.А.³, Крылов И.Р.², Прохорова У.В.², Шалымов Е.В.^{1,3}, Шоев В.А.^{1,3}

¹Университет СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

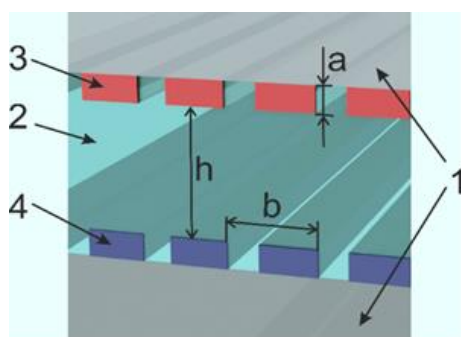
²Университет СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

³Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

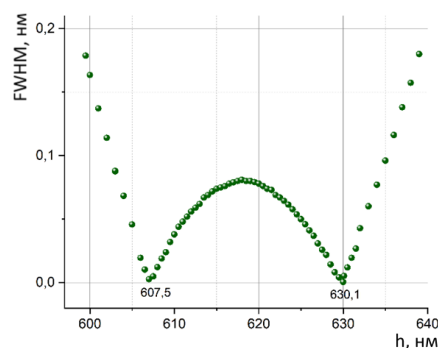
С использованием компьютерного моделирования методом конечных элементов исследуются особенности резонансного отклика системы с оптической РТ-симметрией, образуемой двумя параллельными связанными субволновыми одномерными периодическими структурами.

Ключевые слова: РТ-симметрия, субволновые решетки, резонансный отклик.

Исследуемая система представлена на рисунке ниже. Она состоит из двух кремниевых оптически связанных субволновых периодических решеток прямоугольного профиля – 3 и 4. Считалось, что геометрические параметры дифракционных решеток идентичны. Эффективный показатель преломления решеток больше, чем у окружающей их среды. Исследуемая система окружена воздухом 1, а пространство между решетками 2 заполнено кварцевым стеклом (SiO_2).



(а)



(б)

Рисунок. а – Конструкция исследуемой системы: 1 – воздух, 2 – материал подложки, 3 и 4 – две субволновые решетки высотой a и периодом b , расстояние между решетками – h ; б – зависимость FWHM резонансной линии от h

Исследование проводилось на основе моделирования методом конечных элементов. При этом в начале для апробации и сравнения был рассмотрен полностью пассивный вариант структуры (показатели преломления элементов 3 и 4 равны). Основное внимание было уделено второму варианту структуры: действительные части показателей преломления 3 и 4 равны, мнимые – равны по величине, но имеют противоположный знак, т.е. элемент 3 вносит усиление (например, за счет легирования и оптической накачки), а элемент 4 равные ему потери. Была произведена настройка резонансного отклика на зеленую область спектра.

Настройка геометрии исследуемой структуры позволяет получить резонансный отклик практически на любой заданной длине волны, но достижимые параметры резонансной линии (например, ширина спектра) могут существенно (на порядки) различаться для разных длин волн. Для рассматриваемой структуры в зеленом диапазоне длин волн были идентифицированы две возможные резонансные линии при 514,86 нм и 518,5 нм, соответствующие $h = 607,5$ и 630,1 нм (рис. б). При этом были найдены оптимальные значения и других параметров: $a = 60$ нм, $b = 320$ нм, коэффициент заполнения решетки 0,6.

Было продемонстрировано, что в режиме РТ-симметрии [1, 2] возможна компенсация потерь и усиление света, проходящего и отражающегося от структуры. Также была продемонстрирована теоретическая возможность получения сверхузких резонансов (FWHM 0,3 пм), усиленных до 10^5 раз. Благодаря этому она видится перспективной для разработки оптических фильтров и усилителей.

Была обнаружена и исследована зависимость отклика структуры от взаимного расположения двух ее решеток и величины усиления ее активной части. Благодаря РТ-симметрии влияние описанных факторов на оптический отклик структуры достаточно для ее применения, например, в оптомеханических датчиках. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №22-22-20072.

[1] El-Ganainy R., et al., *Optics Letters*, **32**, №17, 2632-2634, (2007).

[2] Efremova E.A., Perminov S.V., and Vergeles S.S., *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, **46**, 100953, (2021).

ФИЗИКА НАНОСТРУКТУР

**ЭЛЕКТРОННЫЙ МАКЕТ
ТРЕХМЕРНОЙ ОКТУПОЛЬНОЙ ИОННОЙ ЛОВУШКИ**

Семьнин М.С., Рудый С.С., Рыбин В.В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В настоящей работе представлены результаты исследовательских испытаний электронного макета трехмерной октупольной ионной ловушки. Определены зависимости эффективности локализации частиц от размеров электродов ловушки, параметров питания электродов ловушки и характеристик объектов локализации.

Ключевые слова: мультипольные ионные ловушки, трехмерные ионные ловушки, квази-кулоновские структуры.

В настоящее время бурное развитие получили технологии квантовых вычислений. Возможной элементной базой для таких вычислений являются квантовые процессоры на плененных ионах, для локализации которых используются двумерные ионные ловушки с использованием запирающих электродов. Однако, использование запирающих электродов приводит к деформации идеального поля и ограничению максимального числа упорядоченных квантово-запутанных кубитов, что в свою очередь приводит к ограничению вычислительной способности квантовых компьютеров. Одним из возможных решений этой проблемы является переход к трехмерным октупольным ионным ловушкам. Уникальной особенностью трехмерных мультипольных ионных ловушек является то, что они объединяют в себе свойства мультипольных ионных ловушек – обеспечивают множественность изолированных в пространстве минимумов эффективного потенциала [1] и трехмерных ионных ловушек – обеспечивают ограничение движения захваченной частицы по всем трем трансляционным степеням свободы. Объединение настоящих свойств позволяет преодолеть ограничение на количество элементов в цепочке ионов, что является одним из ограничивающих факторов в развитии квантовых вычислений.

Для определения оптимальных технических характеристик трехмерной октупольной ионной ловушки был спроектирован и реализован электронный макет настоящей ловушки. Электронный макет трехмерной октупольной ловушки для локализации ионных квази-кулоновских структур выполнен в виде подключаемой библиотеки для программной среды Wolfram Mathematica и предназначен: для моделирования геометрии электродов ловушки с оптимизированной формой электродов в соответствии с результатами исследования [2]; для расчета пространственного распределения потенциала при различных схемах подключения питания электродов; для симуляции динамики заряженных объектов в рабочей области локализации при различных параметрах среды локализации, параметров питания и характеристик объекта локализации. Для расчета технических характеристик трехмерной октупольной ионной ловушки были проведены исследовательские испытания электронного макета, которые проводились численным моделированием динамики заряженных стеклянных микросфер размером $10^{-7} - 10^{-4}$ м в рабочей области ловушки.

В ходе исследовательских испытаний электронного макета трехмерной октупольной ионной ловушки были определены зависимости эффективности локализации заряженных частиц от размеров электродов ловушки, от параметров питания электродов ловушки и от характеристик объектов локализации, а также определено количество потенциальных минимумов. На основании полученных зависимостей были получены технические характеристики трехмерной октупольной ионной ловушки для трех схем подключения электродов ловушки. Полученные результаты необходимы для проектирования и изготовления опытного образца исследуемой ловушки. Следующим логическим этапом работы является реализация опытного образца трехмерной октупольной ионной ловушки и проведение исследовательских испытаний для верификации полученных результатов в настоящей работе.

[1] Vasilyev M., Rudyi S., Rozhdestvensky Y., *Eur. J. Mass Spectrom.*, **27**, №5, 158-165, (2021).

[2] Rybin V., Ivanov A., Rozhdestvensky Y., Rudyi S., *2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech)*, 313-314, (2022).

ОХЛАЖДЕНИЕ КЛАССИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ
КВАНТОВОГО ПРЕДЕЛА ПРИ ПРИЛОЖЕНИИ ПЕРЕМЕННОГО
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРИМЕРЕ КАНТИЛЕВЕРА

Орлов В.К., Рождественский Ю.В.

Университет ИТМО, МНОЦ Физики Наноструктур, Санкт-Петербург, Россия

В работе предложен способ охлаждения и снижения кинетической энергии классической колебательной системы в виде кантилевера с заряженным нанокристаллом на конце с помощью активного управления внешним электрическим полем.

Ключевые слова: охлаждение с обратной связью, квантовый предел, охлаждение кантилевера.

В настоящее время значительное внимание уделяется различным механизмам охлаждения [1] мезоскопических систем с целью достижения квантового состояния и изучения перехода из классического мира в квантовый [2]. Можно выделить два наиболее популярных метода охлаждения наночастиц: оптическое охлаждение в высокодобротном резонаторе (cavity cooling) и охлаждение с обратной связью (feedback cooling) [3]. Последний метод разделяется на два в зависимости от вида обратной связи — оптической или электрической. В работе представлен новый метод охлаждения для такой мезоскопической системы как кантилевер, который может быть реализован различными экспериментальными методами и рассматривается как маятниковая колебательная система, описываемая определенным набором параметров (длина, собственная частота, и т.п.). [4]. Предложенный метод является разновидностью метода охлаждения с электрической обратной связью и позволяет снизить тепловые колебания кантилевера и охладить систему до уровня квантового перехода.

Принцип охлаждения кантилевера рассмотрен на примере микромеханической системы с нанокристаллом алмаза, имеющим заряженный NV-центр [4]. Поместив такую систему в конденсатор, т.е. поставив с двух сторон от неё проводящие пластины, на которые можно наводить заряд и которыми можно создавать электрическое поле, можно попеременно включать ту из пластин, навстречу которой в данный момент поднимается маятник. Тогда каждый раз при движении микромаятника от нижней точки траектории до верхней, его энергия будет тратиться на работу не только силы тяжести, но и кулоновской силы, что в итоге приведет к постепенному уменьшению кинетической энергии и, как следствие, уменьшению колебаний системы и её охлаждению.

Таким образом, постановку задачи можно сформулировать следующим образом: необходимо генерировать внешнее электрическое поле таких направления и продолжительности, чтобы кинетическая энергия системы снижалась.

Аналогичный принцип охлаждения возможен и с одной пластиной, а также с аналогичными методами генерации внешнего электрического поля, обсуждаемыми в работе. Параметры рассчитанной системы были взяты из статьи 2011 года, описывающей реальный эксперимент [4]. Нанокристалл алмаза весом в 16 фг и размером 50 нм с NV-центром был закреплён на кантилевере в виде SiC-нити длиной 10 мкм. Частота колебаний системы достигает 1 МГц, а среднеквадратичная скорость при комнатной температуре 3 нм в секунду. Первая часть решения задачи состоит в получении уравнений движения, вторая – это численные расчёты системы. Каждый этап, в котором меняется уравнение движение, требует отдельного численного расчёта, начальные условия для которого получаются из предыдущего.

В результате нами показано, что предложенный механизм охлаждения может быть относительно просто реализован для мезоскопических систем типа кантилевера. Оценки показывают, что возможно уменьшение кинетической энергии кантилевера, практически до энергии основного квантового состояния.

[1] Neuhaus L., *Optics infobase conference papers*, **F73-QIM**, (2017).

[2] Qiu L., Shomroni I., Kippenberg T.J., et al., *Physical review letters*, **124**, №17, 173601, (2020).

[3] Munakata T., Rosinberg M.L., *Cond-mat.stat-mech*, **2013**, №6, P06014, (2013).

[4] Arcizet O., Jacques V., Sirea A. et al., *Nature Physics*, **7**, №11, 879-883, (2011).

PECULIARITIES OF ABLATION AND DEPOSITION OF BRASS BY
NANOSECOND LASER PULSES

Ramos-Velazquez A.¹, Amiaga J.V.²,
Khuznakhmetov R.M.³, Veiko V.P.¹

¹ITMO University, Saint Petersburg, Russia

²Laser Center LLC, St. Petersburg, Russia

³Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

The ablation and deposition thresholds in the acceptor-donor scheme when using the LIFT technique were investigated as well as the effect of pulse overlap on the transferred film thickness and mass.

Keywords: LIFT, laser transfer, laser deposition of metals.

The deposition of metals and their alloys has found wide applications such as color marking, patterning, and metallization [1]. One innovative technique facilitating these advancements is Laser Induced Film Transfer (LIFT), a process capable of depositing brass on transparent substrates. The LIFT technique operates through laser ablation and deposition mechanisms, both of which hold significant importance in current research and practical applications. Laser ablation has proven to be a powerful tool in the fabrication of thin films with complex stoichiometry [2]. Conversely, the deposition of material often occurs via laser-induced plasma, a state in which excited particles facilitate the transfer of the material to a desired transparent substrate.

The LIFT technique has been instrumental in creating color marks on glass using only brass in a donor-acceptor scheme (see Figure) [3]. This technique, when combined with other methodologies and materials, has presented opportunities to create precise patterns of materials such as copper and nickel for microelectronics. However, like any technology, the search for process optimization is ongoing and forms an essential part of contemporary research.

The scope of this study included exploring the interplay of different variables in the LIFT process, specifically pulse energies and overlapping of pulses. These parameters form the cornerstone of the laser-based deposition process, and their fine-tuning can lead to significantly enhanced outcomes.

In our experiments, we irradiated the donor surface with a laser system. This system was a TurboMarker from Laser Center LLC in Russia, equipped with an IPG Photonics YLPM-1-4x200-20-20 (1064 nm) laser source, and a galvo scanning head from Cambridge Technologies, USA. We focused the laser beam onto the sample using an F-theta lens, assuming a Gaussian distribution with a spot size of 55 microns. The donor material was brass (L63) Cu63Zn35, and the acceptor substrate was borosilicate glass. The acceptor was positioned in soft contact.

We analyzed the film thickness using a SEM (Zeiss Merlin, Germany) and obtained cross-sectional views through ion milling. Precise measurements of the removed and deposited mass were carried out using an ET-300P-M (UNIGRAM) balance.

In this study, we determined the ablation and deposition thresholds in glass using the acceptor-donor scheme with the Laser-Induced Film Transfer (LIFT) technique. Moreover, we investigated the influence of pulse superposition on the film thickness and mass transferred onto the glass substrate.

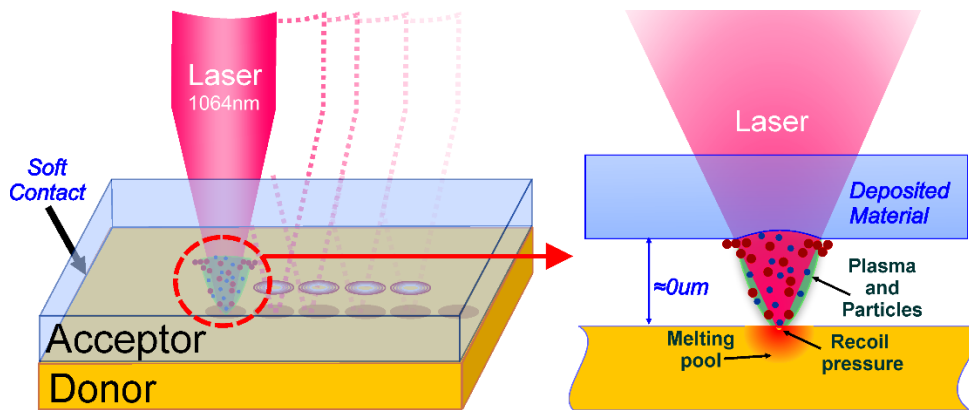


Figure. Donor-acceptor scheme using in the laser-induced film transfer technique LIFT

The reported study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation research agreement No. 075-11-2021-045 of 24.06.2021, project title "Development of high-tech production of equipment and technologies for laser functionalization of medical devices" (within the framework of decree of the Government of the Russian Federation No. 218 of 09/04/2010).

[1] Liu H., Lin W., and Hong M., *Light: Science & Applications*, **10**, 162, (2021).

[2] Bäuerle D., *Laser processing and chemistry*. Springer Science & Business Media, 2013.

[3] Ramos-Velazquez A., Amiaga J., Pankin D., Odintsova G., Zakoldaev R., & Veiko V. *Materials Letters*, **343**, 134372, (2023).

СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА ПО СПЕКТРАМ ПОГЛОЩЕНИЯ, КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНИКИ АТОМНО-СИЛОВОЙ И СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Иноземцева А.В.¹, Аржанов А.И.^{1,2,3}, Каримуллин К.Р.^{1,2,3}, Наумов А.В.^{1,2,3}

¹Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

²Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Троицкое обособленное подразделение, Москва, Россия

Развит комплексный подход для исследования фотофизических свойств наночастиц серебра и изучения их связи с размерами, структурой и морфологией образцов с использованием методов оптической спектроскопии, атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Для характеристики плазмонного резонанса наночастиц измерены оптические спектры поглощения. На основе анализа СЭМ-изображений построено распределение наночастиц по размерам. Изучена морфология и спектральные особенности синтезированных наночастиц с использованием метода атомно-силовой микроскопии для картирования параметров спектров комбинационного рассеяния света.

Ключевые слова: наночастицы, плазмонный резонанс, синтез и характеристика.

Наночастицы серебра являются объектом интенсивного исследования благодаря своим уникальным оптическим, электронным и каталитическим свойствам. Исследование морфологии наночастиц серебра важно для поиска материалов с заданными свойствами [1], разработки новых и оптимизации существующих технологий [2].

В работе был развит метод коллоидного синтеза Ag-наночастиц, выполнен комплексный анализ их морфологии и спектральных свойств с использованием различных методов, таких как спектроскопия поглощения, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и комбинационное рассеяние света. Целью работы было получить информацию о связи спектральных свойств с размерами и морфологией наночастиц в зависимости от условий синтеза.

Для коллоидного синтеза наночастиц серебра использовали цитратный и борогидридный методы. Структура и морфология наночастиц на нанометровом масштабе были исследованы с использованием техники сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Анализ СЭМ-изображений позволил построить распределение наночастиц серебра. Полученная информация важна для понимания механизмов и управления процессами синтеза.

Спектроскопия поглощения является мощным методом для изучения оптических свойств различных материалов. Плазмонный резонанс, наблюдаемый в спектрах поглощения, обусловлен коллективной осцилляцией электронов в наночастицах и зависит от их размеров. Исследование спектра поглощения дало возможность определить параметры плазмонного резонанса, связывающие спектральные параметры синтезированных наночастиц с их размерами.

Спектры комбинационного рассеяния света позволяют получить информацию о химической структуре наночастиц, их составе и внутренней колебательной динамике. С использованием метода комбинационного рассеяния света в сочетании с техникой атомно-силовой микроскопии (АСМ) были построены картограммы распределения спектральных параметров. Совместное использование методов оптической спектроскопии, СЭМ, АСМ и комбинационного рассеяния света дает возможность осуществить комплексную характеристику синтезированных наночастиц, установить взаимосвязь между их размерами, морфологией и химической структурой. Такие комплексные методы могут быть востребованы в задачах материаловедения для нанотехнологий, катализа, фотоники, сенсорики, био- и медицинской физики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Просвещения Российской Федерации в рамках темы государственного задания Московского педагогического государственного университета «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» (АААА-А20-120061890084-9). Авторы являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (грант Президента РФ НШ-776.2022.1.2).

[1] Ke N.H. et al., *Plasmonics*, **16**(6), 2125-2137, (2021).

[2] Nicolae-Maranciuc A. et al., *International Journal of Molecular Sciences*, **23**(10), 5778, (2022).

**ХИРОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АТОМАРНО-ТОНКИХ
НАНОСТРУКТУР CdSe С ХИРАЛЬНЫМИ ЛИГАНДАМИ**

Куртина Д.А, Васильев Р.Б.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Проведено исследование индукции хиральности в атомарно-тонких коллоидных наноструктурах на основе CdSe с энантиомерными лигандами на поверхности и изучено ее влияние на оптические свойства таких систем.

Ключевые слова: 2D наноструктуры, экситоны, хиральность.

Хиральность – одно из фундаментальных свойств природы, повсеместно встречающееся во Вселенной, начиная от небольших молекул и заканчивая галактиками. Очевидно, что хиральность всегда была одной из самых важных тем исследований с ее глубоким значением для происхождения жизни. В последнее время большой интерес представляют хиральные коллоидные наночастицы и наноструктуры [1], демонстрирующие различное поглощение света с правой и левой круговой поляризацией (круговой дихроизм, CD) или вращение плоскости поляризации света (оптическая активность), а также излучение фотонов заданной круговой поляризации (люминесценция с круговой поляризацией). Необычайно высокая интенсивность хирооптических явлений из-за экситонных эффектов, характерных для наноразмерных материалов, подогревает этот интерес. Хиральные наноструктуры имеют многообещающие применения в биохимических, фотонных и оптоэлектронных технологиях, таких как энантиоселективное разделение и асимметричный катализ, оптические технологии и спинтроника [1, 2]. Для получения хиральных наночастиц из ахиральных полупроводников используется индукция хиральности, т.е. создание оптической активности наночастиц, индуцируемой хиральными лигандами [3]. Однако понимание того, как взаимодействие анизотропии, кристаллической структуры и координации лигандов в 2D наноструктурах приводит к сильной оптической активности и высокому сигналу CD, остается не решенной задачей.

В настоящей работе было проведено исследование индукции хиральности в атомарно-тонких коллоидных наноструктурах на основе CdSe при обмене нативных длинноцепочечных лигандов на хиральные лиганды L-цистеина (L-Cys) и N-ацетил-L-цистеина (L-AcCys). Были синтезированы двумерные наноструктуры с предельно тонкими толщинами 0.6 и 0.9 нм, заданными с атомарной точностью, и латеральными размерами 100-200 нм, чтобы достичь чистого 2D-режима квантового конфайнмента для экситонов и усилить их взаимодействие с хиральными лигандами на базальных плоскостях наночастиц. Было проведено сравнение L-цистеина, с более стерически объемным N-ацетил-L-цистеином. А также анализ индуцирования хиральности лигандами L-аланина, L-фенилаланина и L-лейцина. Разработанные протоколы обмена лигандов позволили полностью покрыть базальные плоскости. Состав и координация лигандов на базальных плоскостях наночастиц были детально проанализированы с помощью ИК спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR).

Оптические и хирооптические свойства хиральных атомарно-тонких нанопластин CdSe были изучены с помощью спектроскопии поглощения, люминесценции и кругового дихроизма (CD). Исследовано поведение хиральных экситонов в зависимости от типа лиганда и толщины наноструктуры. Установлены разные знаки кругового дихроизма для лигандов L-цистеина и N-ацетил-L-цистеина, что подтверждается разной координацией этих лигандов. Максимальное значение фактора диссимметрии $(2-3) \times 10^{-3}$ было обнаружено для N-ацетил-L-цистеина для предельно тонких наноструктур. Детальные исследования экситонных свойств были дополнены анализом влияния типа растворителя. Была показана зависимость спектрального положения и интенсивности экситонных полос от диэлектрической проницаемости среды, что свидетельствует о вкладе экситонов Ванье-Мотта в свойства таких систем. Анализ люминесцентных свойств хиральных наноструктур показал неожиданный эффект расщепления экситонных полос при комнатной температуре.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-13-0 0101.

[1] Ma W., Xu L., de Moura A.F. et al., *Chem. Rev.*, **117**, 8041–8093, (2017).

[2] Naaman R., Paltiel Y., Waldeck D.H., *Nat. Rev. Chem.*, **3**, 250–260, (2019).

[3] Kurtina D.A., Grafova V.P. et al., *Materials*, **16**, 1073, (2023).

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОМОЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА НА ПОВЕРХНОСТИ
Si(100) МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Лозовой К.А., Дирко В.В., Кукенов О.И.,
Соколов А.С., Коханенко А.П., Войцеховский А.В.

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

В работе методом дифракции быстрых электронов исследованы особенности переходов от моноатомных к биатомным ступеням при гомоэпитаксиальном росте кремния на поверхности Si(100) в диапазоне температур осаждения от 200 до 800 °С.

Ключевые слова: кремний, молекулярно-лучевая эпитаксия, моноатомная ступень.

Прогресс в области полупроводниковой наноэлектроники и фотоники неизбежно сопровождается ужесточением требований к качеству выращиваемых наноструктур. Наиболее качественные эпитаксиальные структуры с минимальным количеством дефектов получают методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Создание наноструктур высокого качества невозможно без тщательной подготовки ростовой поверхности и точного метода контроля состояния поверхности. Метод дифракции быстрых электронов, реализованный в методе молекулярно-лучевой эпитаксии, зарекомендовал себя как универсальное средство контроля морфологии поверхности при выращивании полупроводниковых наноструктур *in situ* [1, 2].

Для создания высококачественных подложек для дальнейшего синтеза на них гетероструктур АШ–BV, являющихся основным материалом современной нанофотоники, используется гомоэпитаксиальный рост кремния на поверхности кремния с кристаллографической ориентацией (100). Изучение особенностей такого роста и возможностей управления процессами переходов от моноатомных к биатомным ступеням позволяет добиться атомарно-гладкой поверхности с минимальным количеством дефектов и террас, имеющих максимальную площадь.

Гомоэпитаксиальный ступенчатый рост Si на Si(100) происходит с образованием чередующихся ступеней двух типов: ступеней со сверхструктурой 1x2 и ступеней со сверхструктурой 2x1. После химической очистки и последующего высоковакуумного отжига подложки Si(100) при температуре 1000 °С были синтезированы структуры Si/Si(100) в интервале температур подложки от 200 до 800 °С. При анализе поверхности при росте методом дифракции быстрых электронов в направлении [110] наблюдался бимодальный характер колебаний интенсивности дифракции. Он заключается в том, что наблюдаются два чередующихся максимума разной интенсивности, каждый из которых соответствует своему периоду осцилляций интенсивности. Большой максимум интенсивности соответствует росту ступеней со сверхструктурой 1x2, в которой атомы в димерах располагаются вдоль направления падающего электронного пучка. Меньший максимум соответствует образованию ступеней со сверхструктурой 2x1, в которых димеры располагаются поперек электронного пучка. При анализе поверхности в процессе роста методом дифракции быстрых электронов в направлении [100] наблюдались изменения интенсивности рефлексов от сверхструктур 1x2 и 2x1 при изменении температуры роста.

В ходе исследования гомоэпитаксиального роста Si/Si(100) в направлении [110] методом ДБЭО были получены температурные зависимости отношения интенсивностей локальных максимумов вблизи 00-рефлекса в диапазоне 200–550 °С. Применимость описанной методики определения отношения площадей ступеней с двумя различными сверхструктурами в направлении [110] подтверждается совпадением полученных результатов с результатами, полученными по методике других авторов в направлении [100] [3]. При анализе рефлексов от сверхструктур 1x2 и 2x1 на дифрактограммах в направлении [100] по отношению к электронному пучку были получены отношения интенсивностей этих рефлексов в широком диапазоне температур. Показано, что кривые, полученные обоими методами, имеют максимум при температуре 550 °С, что свидетельствует о преобладании на поверхности одного типа сверхструктуры. Вдали от этой температуры площади ступеней обоих типов примерно равны. Температурная зависимость отношения периодов роста ступеней с различной сверхструктурой в диапазоне 200–550 °С качественно совпадает с ранее описанными кривыми.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10031, <https://rscf.ru/project/21-72-10031/>.

[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] Esin M.Yu., Nikiforov A.I., Timofeev V.A., et al., Formation of a stepped Si(100) surface and its effect on the growth of Ge islands, *Semiconductors*, **52**, 3, 409-413, (2018).

КВАНТОВЫЙ ВЫХОД МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
ВБЛИЗИ ПЛАЗМОННОЙ НАНОЧАСТИЦЫ

Мушин Ф.Ю., Чмерева Т.М.

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

Методами квантовой механики рассчитаны скорости спонтанного излучения молекулы вблизи сферической плазмонной наночастицы (НЧ) и безызлучательного переноса энергии от молекулы к НЧ. Исследовано влияние плазмонной НЧ на квантовые выходы флуоресценции и фосфоресценции молекулы люминофора.

Ключевые слова: плазмонная наночастица, люминесценция, квантовый выход.

В рамках квантовомеханической теории возмущений для скорости безызлучательного переноса энергии от возбужденной молекулы, находящейся в первом возбужденном синглетном (триплетном) состоянии, к плазмонной НЧ может быть получено следующее выражение [1]

$$W_{NP}^{S(T)}(r, \theta) = \frac{4\pi^2 |A_{S(T)}|^2}{\hbar \omega_p^2} \sum_{lm} \frac{\omega_l^3 (l+1)(2l+1)R^{2l+1}}{lr^{2l+4}} |\mathbf{d}_{01} \cdot \mathbf{Y}_{lm}^{l+1*}(\theta, \alpha)|^2 \delta\left(\omega_l - \frac{E_{S(T)}}{\hbar}\right), \quad (1)$$

где $E_{S(T)}$ – энергия возбужденного S_1 или T_1 – состояния молекулы, \mathbf{d}_{01} – дипольный момент перехода молекулы, ω_l – частота локализованного плазмона мультипольности l , ω_p – плазменная частота металла, R – радиус НЧ, $\mathbf{Y}_{lm}^{l+1}(\theta, \alpha)$ – шаровой вектор. Коэффициент $A_{S(T)}$ равен 1 для перехода $S_1 \rightarrow S_0$ и равен доле синглетного состояния, которое из-за спин-орбитального взаимодействия подмешивается к волновой функции триплет-возбужденной молекулы, для перехода $T_1 \rightarrow S_0$.

Скорость спонтанного излучения молекулы определяется формулой [2]

$$W_{sp}^{S(T)}(m|r, \theta, \alpha) = \frac{4\omega_{S(T)}^3 \sqrt{\epsilon_a}}{3\hbar c^3} |C_{1m}^{S(T)}(r, \theta, \alpha) \mathbf{p}_{01}^{NP} + D_{1m}^{S(T)}(r, \theta) A_{S(T)} \mathbf{d}_{01}|^2, \quad (2)$$

где \mathbf{p}_{01}^{NP} – матричный элемент перехода НЧ из состояния с одним дипольным плазмоном в состояние без плазмонов, $\omega_{S(T)}$ – частота перехода $S_1(T_1) \rightarrow S_0$, ϵ_a – диэлектрическая постоянная окружающей среды, $C_{1m}^{S(T)}$ и $D_{1m}^{S(T)}$ – вклады \mathbf{p}_{01}^{NP} и \mathbf{d}_{01} в дипольный момент объединенной системы «молекула + НЧ» [3].

На рисунке ниже представлены результаты расчетов квантовых выходов флуоресценции $\eta_F = W_{sp}^S / (W_{sp}^S + W_{NP}^S + W_{nr}^S)$ и фосфоресценции $\eta_P = \eta_{ST} W_{sp}^T / (W_{sp}^T + W_{NP}^T + W_{nr}^T)$, где η_{ST} – квантовый выход интеркомбинационной конверсии, $W_{nr}^{S(T)}$ – скорость внутримолекулярных безызлучательных процессов. В расчетах предполагалось, что \mathbf{d}_{01} молекулы параллелен оси z , сферической системы координат с началом в центре НЧ. Расчеты выполнены для золотой НЧ радиуса 20 нм, характеристики молекулы выбирались близкими к эритрозину.

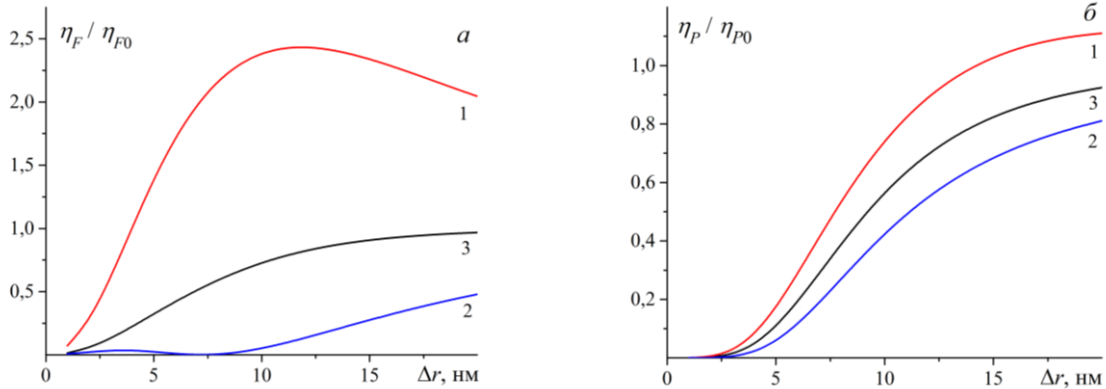


Рисунок. Зависимости квантовых выходов флуоресценции (а) и фосфоресценции (б) от расстояния между молекулой и поверхностью НЧ при различных полярных углах, определяющих местоположение молекулы $\theta = 0$ (1), $\pi/2$ (2), и усреднении по телесному углу (3).

η_{F0} и η_{P0} – квантовые выходы в отсутствие НЧ

Из рисунка видно, что наибольшее увеличение квантового выхода флуоресценции наблюдается для радиально ориентированных \mathbf{d}_{01} в молекуле, отстоящей от поверхности НЧ на $\Delta r \sim 10$ нм, а незначительный рост квантового выхода фосфоресценции приходится на $\Delta r \sim 20$ нм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт № FSGU-2023-0003).

[1] Мушин Ф.Ю., Русинов А.П., Кучеренко М. Г., Чмерева Т.М., *Универ. компл. как регион. центр образов., науки и культуры: матер. Всерос. науч.-метод. конф.*, Оренбург.: ОГУ, 3031-3038, (2023).

[2] Чмерева Т.М., Кучеренко М.Г., Мушин Ф.Ю., *Известия вузов. Физика*, **65**, №7, 16-27, (2022).

[3] Goliney I.Yu., Sugakov V.I., Valkunas L., Vertsimakha G.V., *Chem. Phys.*, **404**, 116-122, (2012).

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТРАВЛЕНИЯ НА ПОРИСТОСТЬ СЛОЁВ И
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ МНОГОСЛОЙНОГО ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ**

Леньшин А.С.^{1,2}, Пешков Я.А.¹, Золотухин Д.С.¹, Черноусова О.В.²,

Канныкин С.В.¹, Минаков Д.А.¹

¹ВГУ, г. Воронеж, Россия

²ВГУИТ, г. Воронеж, Россия

В этой работе мы изготовили многослойный пористый кремний при различных параметрах электрохимического травления. Постепенное увеличение плотности тока травления привело к образованию двухслойной структуры со слоями различной пористости. Пористость многослойных структур оценивали рентгеновской рефлектометрией.

Ключевые слова: пористый кремний, рентгеновская рефлектометрия, фотолюминесценция.

Пористый кремний (Por-Si) достаточно активно применяется в устройствах оптоэлектроники, биосенсорах и наномедицине [1]. В последнее время активно обсуждается использование Por-Si в качестве буферных слоев для роста тонких пленок различных металлов и полупроводников A^3B^5 . Главным преимуществом Por-Si является возможность управления морфологией его поверхности. Точная настройка пористости, шероховатости, размера пор и других морфологических параметров позволяет использовать Por-Si в качестве подложки, уменьшающей механические напряжения и улучшающей адгезию пленок. Буферные слои из Por-Si позволяют выращивать на кремнии эпитаксиальные тонкие пленки материалов с высоким расхождением постоянных решетки. Одним из видов дизайна регулируемой пористой подложки является многослойная структура, имеющая несколько чередующихся пористых слоев с различной пористостью в каждом слое. В этой работе представлены влияние технологических режимов на морфологию поверхности и люминесценцию таких структур многослойного Por-Si.

Образцы Por-Si выращены электрохимическим травлением (ЭХТ) пластин кристаллического кремния. Многослойный Por-Si с различными показателями пористости получался ступенчатым изменением плотности тока электрохимического травления с 20 до 50 mA/cm^2 . Время травления для всех образцов было одинаково. Режим ЭХТ подбирался так, чтобы средняя плотность тока ЭХТ была равна 35 mA/cm^2 . Оценка пористости осуществлялась рентгеновской рефлектометрией (XRR) [2]. XRR позволяет вычислить показатель пористости поверхностного слоя толщиной в десятки нанометров. Спектры фотолюминесценции регистрировались при комнатной температуре с помощью волоконно-оптического спектрометра Ocean Optics USB4000-VIS-NIR; использовался лазерный диод с длиной волны излучения 405 nm.

Расчет показателя пористости по XRR-профилю Por-Si показывает, что пористость однослойного образца составила около 25%. Изменение режима травления на двухстадийный с резким увеличением плотности тока от 20 до 50 mA/cm^2 привело к возникновению дополнительного приповерхностного пористого слоя с пористостью около 65%. В то же время пористость более глубокого слоя близка к пористости однослойного образца и равна 23%. Дополнительное увеличение числа стадий травления до четырех с плавным ростом плотности тока также привело к формированию двухслойной структуры Por-Si. Приповерхностный слой имеет пористость 55%, что меньше, чем у двухстадийного образца, а пористость глубинного слоя оказалась около 27% и почти не отличается от пористости более глубоких слоёв других образцов. Стоит отметить, что переключение плотности тока травления влияет только на морфологию поверхностного слоя, сохраняя неизменной пористость глубинного пористого слоя.

Спектры фотолюминесценции демонстрируют красное смещение по мере увеличения пористости верхнего пористого слоя, что соответствует увеличению среднего размера кристаллических частиц Si в образце. Спектр однослойного образца с наименьшей пористостью около 25% демонстрирует несколько особенностей. В области от 450 до 550 nm появляется пик низкой интенсивности, соответствующий люминесценции нестехиометрического оксида SiO_x . Кроме того, более интенсивный пик появляется в диапазоне от 550 до 800 nm. Этот эффект хорошо согласуется с нашим предыдущим исследованием, в котором было показано, что в интервале пористости от 14 до 32% происходит переход к квантово-размерному механизму появления фотолюминесценции [3]. Многостадийные образцы с высокопористыми верхними слоями демонстрируют значительно более интенсивную фотолюминесценцию в диапазоне от 600 до 800 nm. Положение пика с центром на 700 nm обычно ассоциируется с люминесценцией нанокристаллов в столбцах P-Si. При этом, чем выше пористость поверхностного слоя P-Si, тем интенсивней пик фотолюминесценции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-72-10007.

[1] Moretta R., De Stefano L., Terracciano M., Rea I., *Sensors*, **21**, 1336, (2021).

[2] Buttard D., Dolino G., Bellet D., Baumbach T., Rieutord F., *Solid State Commun.*, **1**, 1-5, (1998).

[3] Leshin A.S., Peshkov Ya.A., Chernousova O.V., Kannykin S.V., Minakov D.A., *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, **98**, 36, (2023).

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК ZnO МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Саенко А.В.¹, Хубежов С.А.², Билык Г.Е.¹

¹Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия

²Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, г. Владикавказ, Россия

Проведено формирование тонких пленок ZnO методом ВЧ магнетронного распыления при комнатной температуре в бескислородной среде. Исследовано влияние мощности магнетронного распыления на скорость осаждения и структурные свойства пленок ZnO.

Ключевые слова: пленки ZnO, магнетронное распыление, свойства пленок.

Оксид цинка (ZnO) является одним из перспективных полупроводниковых материалов для применения в структурах солнечных элементах в качестве оконного (буферного) слоя из-за большой ширины запрещенной зоны (3,3-3,4 эВ) и высокой подвижности электронов (до 120 см²/В·с). Для формирования пленок ZnO используется множество различных методов, включая магнетронное распыление. В последние годы существенно возрос интерес к низкотемпературному магнетронному распылению керамических мишеней в атмосфере инертного газа для снижения теплового воздействия и окисления слоев на поверхности подложки [1].

В данной работе тонкие пленки ZnO осаждались на стеклянные и кремниевые подложки методом высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления при комнатной температуре в бескислородной среде на установке VSE-PVD-DESK-PRO (ООО «АкадемВак»). Проведено исследование влияния мощности магнетронного распыления (25-75 Вт) на скорость осаждения и структурные свойства пленок ZnO для использования в солнечных элементах, в том числе и на гибкой подложке. Измерение толщины пленок осуществлялось с помощью профилометра Alpha-Step D-100 (KLA-Tencor). Шероховатость поверхности исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на нанолaborатории NTEGRA (HT-МДТ). Морфология поверхности пленок исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа Nova Nanolab 600 (FEI Company). Химический состав пленок определялся рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией (РФЭС) на спектрометре K-Alpha (Thermo Scientific) с использованием монохроматических лучей Al_{Kα} с энергией 1486,6 эВ и размером пятна 400 мкм.

Толщина полученных пленок ZnO составила от 30 нм до 100 нм, что соответствует линейной зависимости скорости осаждения от мощности плазменного разряда. С увеличением мощности от 25 Вт до 75 Вт скорость осаждения возрастает с 3,7 нм/мин до 11,5 нм/мин, что связано с увеличением кинетической энергии бомбардирующих мишень ионов аргона и, как следствие, возрастанием количества выбитых атомов из мишени, переход их в газовую фазу и осаждение на подложку.

На рисунке показаны РЭМ-, АСМ-изображения поверхности и обзорные энергетические спектры пленок ZnO, полученных при мощности плазменного разряда 75 Вт.

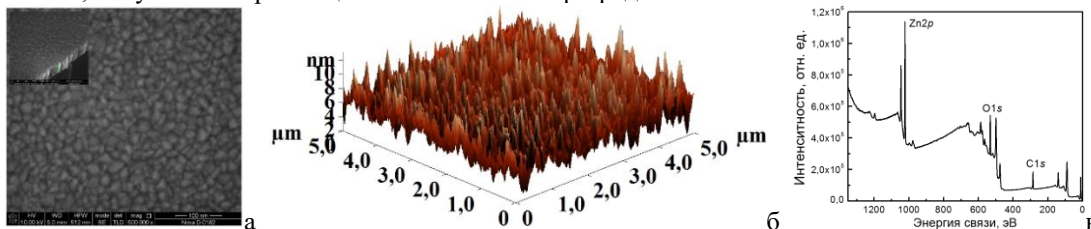


Рисунок. РЭМ- (а), АСМ-изображения (б) поверхности и обзорные энергетические спектры (в) пленок ZnO

Получено, что морфология поверхности пленок ZnO является однородной (без трещин и пор) со средним размером зерен от 10 нм (25 Вт) до 30 нм (100 Вт), причем на поперечном срезе наблюдаются характерные для ZnO столбчатые образования с направлением перпендикулярно к плоскости слоя (рис. а). Пленки ZnO имеет относительно гладкую поверхность со средним значением шероховатости (рис. б) от 2,8 нм (25 Вт) до 6,3 нм (75 Вт), что связано с возрастанием кинетической энергии осаждаемых атомов и толщины пленки. Из обзорного спектра (рис. в) видно, что на поверхности пленок ZnO присутствуют цинк, кислород и углерод. Наличие пика углерода свидетельствует о его адсорбции на поверхности пленки из окружающей атмосферы. Положения пиков на спектре уровня цинка (1022 эВ и 1045 эВ) соответствуют степени окисления Zn²⁺. Пики на спектре уровня кислорода соответствуют кислороду кристаллической решетки (531 эВ) [2]. Положения всех пиков совпадают с литературными данными, что подтверждает химический состав пленок ZnO, полученных методом магнетронного распыления при комнатной температуре в бескислородной среде.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00827, <https://rscf.ru/project/23-29-00827/> в Южном федеральном университете.

[1] Chander S., Tripathi S.K., *Materials Advances*, **3**, 7198-7211, (2022).

[2] Nalimova S.S., Shomakhov Z.V., Moshnikov V.A., Bobkov A.A., Ryabko A.A., Kalazhokov Z.K., *Technical Physics*, **65**, 1087-1090, (2020).

ПЕРЕХОД ОТ НЕПРЯМОЙ К ПРЯМОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЕ В
ТОНКИХ СЛОЯХ β -InSe

Котова Л.В.^{1,2}, Бородин Б.Р.¹, Галимов А.И.¹, Елисеев И.А.¹, Рахлин М.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Монослои монохалькогенидов металлов III группы M(IIIА)X имеют непрямую запрещенную зону, которая с увеличением количества слоев переходит в прямую. Параболическая дисперсия, характерная для объемных M(IIIА)X, в монослоях превращается в дисперсию «мексиканская шляпа». В работе экспериментально установлен момент трансформации запрещенной зоны в тонких слоях β -InSe, что дает важную информацию для изготовления устройств на основе InSe.

Ключевые слова: 2D-материалы, зонная структура.

Активное развитие 2D-материалов привело к появлению нескольких классов слоистых материалов. Наиболее перспективными полупроводниками считаются дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) и монохалькогениды металлов III группы (M(IIIА)X). ДПМ известны главным образом уникальными оптическими свойствами монослоев. В отличие от них, монослои M(IIIА)X имеют непрямую запрещенную зону, которая с увеличением количества слоев переходит в прямую [1]. Следует отметить, что трансформация зонной структуры носит не только количественный, но и качественный характер. Параболическая дисперсия, характерная для объемных M(IIIА)X, в монослоях превращается в дисперсию «мексиканская шляпа» [2]. Этот тип дисперсии приводит ко многим уникальным электронным свойствам и создает условия для наблюдения сильно коррелированных электронных явлений [3]. Однако, несмотря на значительный прогресс в изучении свойств и использовании этих материалов, точное количество слоев M(IIIА)X, при которых происходит переход ширины запрещенной зоны от не прямой к прямой, не определено. Монослой имеет непрямую запрещенную зону типа «мексиканской шляпы», а после толщины ~ 10 слоев она становится прямой зоной [4], однако точный момент перехода остается неизвестным.

Проведено экспериментальное исследование тонких слоев β -InSe для определения количества слоев InSe, при которых происходит переход к прямозонной структуре. Толщину исследуемых чешуек определяют с помощью атомно-силовой микроскопии. Использование низкотемпературной μ -ФЛ позволило обнаружить толщину, при которой возникает фотолюминесценция, связанная с прямым межзонным переходом. Работу выхода и визуализацию изменения электронных свойств наноструктур на основе InSe исследовали с помощью Кельвин-Зондовой микроскопии. Показано, что момент появления фотолюминесценции соответствует скачку работы выхода при толщине 8 слоев. Таким образом, экспериментально установлен момент трансформации запрещенной зоны, что дает важную информацию для изготовления устройств на основе InSe.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 21-12-00304).

[1] Guo Y., Robertson J., *Phys. Rev. Materials*, **1**(4), 044004, (2017).

[2] Zolyomi V., Drummond N.D., Fal'Ko V.I., *Phys. Rev. B*, **87**(19), 195403, (2013).

[3] Lugovskoi A.V., Katsnelson M.I., Rudenko A.N., *Phys. Rev. Letters*, **123**(17), 176401, (2019).

[4] Rybkovskiy D.V., Osadchy A.V., Obratsova E.D., *Phys. Rev. B*, **90**(23), 235302, (2014).

**ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РОСТА
ПЛАНАРНЫХ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ**

Сибирев В.Н.¹, Сибирев Н.В.²

¹Горный университет, Санкт-Петербург, Россия

²СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Предложена теоретическая модель, описывающая изменение направление роста планарного нитевидного нанокристалла.

Ключевые слова: планарные нитевидные нанокристаллы, механизм Пар-Жидкость-Кристалл.

Планарные полупроводниковые нитевидные нанокристаллы III-V (ННК) часто рассматриваются как перспективные активные компоненты для новых опто- и наноэлектронных устройств [1]. Управление ростом и легированием ННК на наноуровне в процессе формирования наноструктур является одной из ключевых задач изготовления устройств. Обычно эти процессы рассматриваются отдельно.

Здесь мы хотели бы обсудить влияние легирующих примесей на рост планарных ННК по механизму Пар-Жидкость-Кристалл (ПЖК). В настоящей работе исследуется влияние примесей на форму и направление роста планарных ННК. Мы сосредоточились на следующих аспектах роста планарных ННК: поворот в плоскости подложки, отмеченный R на рисунке, и отрыв от подложки ННК, обозначенное D на рисунке.

Мы построили теоретическую модель в предположении, что скорость роста определяется кристаллизацией на границе капля кристалл, а не на транспорте материала в каплю из газовой среды. Наши основные результаты можно сформулировать следующим образом: вращение и отрыв ННК обусловлены изменением поверхностной энергии и объема капли катализатора. Введение большого количества примеси-легирующей добавки может приводить к изменению направления роста – поворота в плоскости подложки или переходу в наклонный режим роста ННК. Для предотвращения таких изменений направления роста, введение примеси должно сопровождаться изменением скорости поступления материала в ННК.

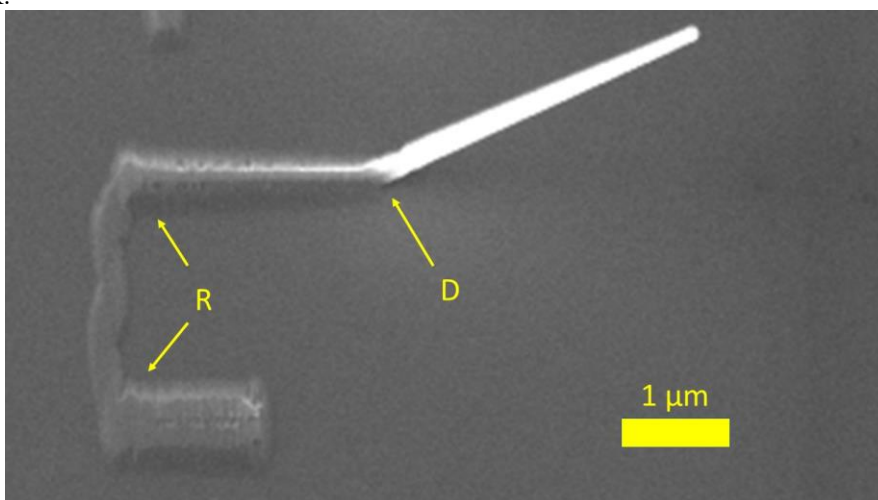


Рисунок. Изменения направления роста ННК, вызванные изменением уровня легирования: вращение в плоскости отмечено R, отрыв ННК отмечен D

Результаты теоретического моделирования сравнивались с экспериментами по росту планарных ННК GaAs методом газофазного осаждения и легированных Zn и Sn [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках гранта № 94033852.

[1] Borodin B.R., Alekseev P.A., Khayrudinov V., Ubyivovk E., Berdnikov Y., Sibirev N., *Harri Lipsanen CrystEngComm*, **25**, 1374-1382, (2023).

КИНЕТИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РОСТА GaAs ПЛАНАРНЫХ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ

Сибирев Н.В.¹, Штром И.В.^{1,2}

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

²Институт аналитического приборостроения Российской академии наук., Санкт-Петербург, Россия

Предложена модель, описывающая изменение длины и диаметра планарных нитевидных нанокристаллов, растущих по механизму «пар-жидкость-кристалл». Дано объяснение возникновения периодических изменений диаметра нанокристалла. Построена зависимость скорости роста нанокристалла от его диаметра.

Ключевые слова: планарные нитевидные нанокристаллы, механизм роста «пар-жидкость-кристалл», поверхностная диффузия.

Полупроводниковые планарные нитевидные нанокристаллы (п-ННК) являются перспективными «строительными блоками» для различных приложений в области нанoeлектроники и нанofотоники [1-3]. Практические применения наногетероструктур на основе ННК, в том числе – совмещенных с кремниевой электронной платформой, в ряде случаев осложняются их вертикальной геометрией, что вызывает сложности изготовления верхнего контакта и другие проблемы. В настоящей работе представлен вывод и исследование кинетического уравнения для скорости роста планарных ННК арсенида галлия с учетом эффекта Гиббса-Томсона в капле и различных механизмов поверхностной диффузии адатомов, и изменения состава капли.

Процесс роста п-ННК на плоской поверхности подложки, будем описывать в следующих предположениях. Скорость роста п-ННК определяется текущим составом капли. Материал катализатора, мы будем рассматривать в качестве примера золото и олово, не расходуется. Предполагается, что поступление мышьяка происходит, только из газовой среды, поэтому в уравнении, описывающем количество мышьяка N_{As} в капле есть только три слагаемых: кристаллизация мышьяка на границе п-ННК-капля, адсорбция из газовой фазы и десорбция (1). Уравнения, описывающее количество галлия N_{Ga} в капле, содержит, кроме того, еще два диффузионных вклада: диффузию с поверхности подложки сначала к поверхности п-ННК и затем вдоль последней в каплю и адсорбцию на боковой поверхности п-ННК с последующей диффузией в каплю (2).

$$\frac{d}{dt} N_{As} = -\frac{S}{\Omega_{GaAs}} W + J_{As} A - \frac{N_{As} r_{As}}{\tau_{As} R}, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} N_{Ga} = -\frac{S}{\Omega_{GaAs}} W + J_{Ga} A - \frac{N_{Ga} r_{Ga}}{\tau_{Ga} R} + j_{diff}^s + j_{diff}^f. \quad (2)$$

Здесь S – площадь поперечного сечения ННК, Ω_{GaAs} – объем на Ga-As пару, W – скорость роста п-ННК в нм/с, J_{As}, J_{Ga} – плотность потока прекурсоров мышьяка и галлия, A – площадь поверхности капли, τ_{As}, τ_{Ga} – время жизни атома мышьяка в поверхностном слое до испарения, r_{As}, r_{Ga} – атомарный радиус мышьяка, R – радиус капли, j_{diff}^s – диффузионный поток адатомов в каплю с поверхности подложки и j_{diff}^f – диффузионный поток в каплю с боковой поверхности ННК.

В работе обнаружено, что если рост ННК не лимитирован только одним элементом, обычно галлием, то возможно возникновения автоколебаний радиуса капли и соответственно диаметра планарного ННК. Показано, что такие колебания для GaAs п-ННК возможны [2], при выполнении условия (3):

$$\frac{1-c_{As}}{c_{As}} + \frac{1-c_{Ga}}{c_{Ga}} + \frac{\omega_{GaAs}}{k_B T} < 0. \quad (3)$$

Здесь ω_{GaAs} – бинарный коэффициент разложения зависимости химического потенциала раствора Ga и As в катализаторе.

В работе показано, что скорость роста п-ННК может лимитироваться либо эффектом Гиббса-Томсона, либо диффузией адатомов с поверхности подложки. Зависимость диффузионно-лимитированной скорости роста от R можно описать в виде R^{-m} , где степенной показатель m принимает значения 1, 3/2 или 2 в зависимости от характера поверхностной диффузии, что соответствует ранее полученным зависимостям, полученным в предположении, что рост лимитирован галлием [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках гранта № 94033852.

[1] Zhang A., Zheng G., Lieber C. M. Nanowires: building blocks for nanoscience and nanotechnology, Springer, (2016).

[2] Borodin B., Alekseev P., Khayrudinov V., Ubyivovk E., Berdnikov Y., Sibirev N., Lipsanen H. *CrystEngComm*, **25**, 1374-1382, (2023).

[3] Дубровский В.Г., Штром И.В., *Письма в ЖТФ*, **46** (20), 15-18, (2020).

**МАКРОКРИСТАЛЛЫ NaCl ДОПИРОВАННЫЕ КОЛЛОИДНЫМИ
КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ РАЗНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА**

Новиков З.Б., Ципотан А.С.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

В работе впервые получены кристаллы, допированные графеновыми квантовыми точками и произведено их сравнение с кристаллами, включающими квантовые точки CdTe.

Ключевые слова: квантовые точки, макрокристаллы, люминесценция.

Химически синтезированные полупроводниковые коллоидные квантовые точки привлекают большой интерес для применения в качестве компонентов современных оптоэлектронных и фотоэлектрических устройств [1]. В частности, они уже давно используются в светодиодах, благодаря их низкой токсичности и возможности настройки их фотолюминесцентных свойств путем изменения состава в многокомпонентной системе.

Однако для эффективного использования квантовых точек требуются твердые композиты, включающие их, а не коллоидные растворы, в которых квантовые точки синтезируются [2]. Существует различные методы имплантации квантовых точек в неорганические соли. Хорошо изучены и очень часто используются квантовые точки CdTe. Однако CdTe токсичен для человека, поэтому необходимо искать альтернативы для таких квантовых точек. В качестве такой альтернативы могут выступить графеновые квантовые точки.

Для приготовления кристаллов с включенными квантовыми точками используются насыщенные растворы, в основном таких солей как NaCl, KBr, KCl и т.д. [1]. Кристаллизация идет от одной до нескольких недель и завершается, когда раствор становится бесцветным.

В работы использовали два вида квантовых точек – квантовые точки CdTe и графеновые КТ. Был подготовлен перенасыщенный раствор соли NaCl при молярной концентрации 5,7 М, которые смешивался с растворами квантовых точек в различных соотношениях для получения кристаллов с различными молярными концентрациями. После смешивания квантовых точек с раствором соли начиналась кристаллизация, которая продолжалась три недели.

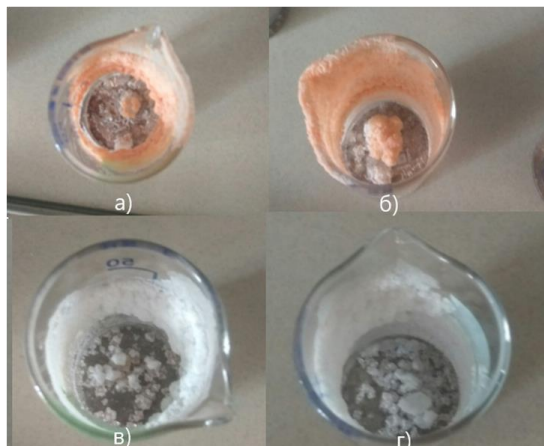


Рисунок. Выравнивание. Заключительный этап кристаллизации NaCl в присутствии графеновых квантовых точек (а,б) и в присутствии квантовых точек CdTe (в,г)

Допирование кристаллов соли подтверждается изменением их окраса (рисунок) и наличием у них люминесцентных свойств. Исследование оптических свойств, полученных макрокристаллов, показало принципиальные отличия между ними. Так, положения максимума спектра фотолюминесценции кристаллов, включающих графеновые квантовые точки, практически совпадают друг с другом и со спектром раствора квантовых точек. Напротив, максимумы спектров фотолюминесценции кристаллов, включающих квантовые точки CdTe, смещаются в красную область, что может быть объяснено изменением диэлектрической проницаемости образца, а также реабсорбцией синей части спектра в оптически плотных образцах.

Таким образом, с помощью метода прямого включения получены образцы макрокристаллов NaCl, допированных коллоидными квантовыми точками CdTe и графеновыми квантовыми точками, исследованы их спектры люминесценции. Допирование кристаллов соли подтверждает наличием у них люминесцентных свойств.

[1] Otto T., Muller M. et.al., *Nano Lett.*, **12**, 5348-5354, (2012).

[2] Vorontsov D.S., Okrepka G.M., Khalavka Yu.B., *Theor. Exp. Chem.*, **55**, 110-114, (2019).

**ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПЛЕНКИ ОКСИДА ОЛОВА
НА ПОРИСТОМ КРЕМНИИ**

Ким К.Б.¹, Леньшин А.С.^{1,2}, Черненко С.С.¹, Золотухин Д.С.², Нифталиев С.И.¹

¹ФГБОУ «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Россия

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Россия

Осаждение оксида олова на пористом кремнии приводит к увеличению накопления заряда в присутствии восстанавливающих газов, а значит, у сенсоров на основе оксидов олова и пористого кремния значительно увеличится чувствительность к газам-реагентам.

Ключевые слова: пористый кремний, оксид олова, наноструктурированная пленка.

В настоящее время для контроля и анализа загрязняющих веществ в окружающей среде широко используются газочувствительные сенсоры. Современные датчики требуют постоянного улучшения для достижения требуемой чувствительности, селективности и надежности работы. В качестве подложки газочувствительных датчиков используют пористый кремний, имеющий высокую удельную поверхность, что является важной характеристикой для адсорбции газов [1]. В работе для улучшения характеристик датчиков на подложках пористого кремния синтезировали тонкую пленку оксида олова золь-гель методом. Среди многих методов изготовления тонких пленок золь-гель метод имеет ряд преимуществ: низкие энергетические затраты, простое и дешевое оборудование, а также возможность контролировать пористость кремния [2]. Наночастицы SnO₂ обладают такими уникальными свойствами, как большая удельная поверхность, широкая запрещенная зона, низкая стоимость, высокая химическая реакция с газами, высокая чувствительность и нетоксичность материала [3, 4].

Пленки оксида олова получали золь-гель методом на подложках монокристаллического кремния. Подложки пористого кремния получали электрохимическим анодированием монокристаллического кремния КЭФ (111). Для приготовления золь использовали легкогидролизирующееся соединение – этиловый эфир ортокремниевой кислоты (ТЭОС, Si(OC₂H₅)₄). Реакции гидролиза и поликонденсации ТЭОС проводили в присутствии хлорида олова (SnCl₂·2H₂O).

Анализ поверхности пористого кремния с частицами оксида олова оценивали методом атомно-силовой микроскопии. Осаждение металлоксидной пленки олова на пористом кремнии приводит к образованию гранул (менее 100 нм) и крупных пор. Анализ образцов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показал, что олово в образцах присутствует в основном в оксидной фазе с небольшим присутствием металлической фазы.

Для оценки электрических свойств полученных нанокмозитов использовали метод спектроскопии импеданса. Анализ полученных годографов позволяют сделать вывод, что в присутствии восстанавливающего газа релаксационный максимум сдвигается в более высокочастотную область, при этом частота увеличивается в 2 раза.

Результаты, описанные в работе, показывают, что золь-гель метод может успешно использоваться для формирования пленок оксида олова на пористом кремнии. Показано, что осаждение оксида олова на пористом кремнии приводит к увеличению накопления заряда в присутствии восстанавливающих газов, а значит, у сенсоров на основе оксидов олова и пористого кремния значительно увеличится чувствительность к газам-реагентам.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-73-00154.

[1] Al-Enizi A.M., Naushad M, Al-Muhtaseb A.H., *Chem. Eng. J.*, **345**, 58–66, (2018).

[2] Baker P.G.L., Sanderson R.D., Crouch A.M., *Thin Solid Films.*, **515**, 6691, (2007).

[3] Roy S.S, Podder J., *Optoelectron. Adv. Mater.*, **12**(7), 1479, (2010).

[4] Turgut G., Keskenler E.F., Aydin S., Sonmez E., *Superlattices Microstruct.*, **56**, 107–116, (2013).

**ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ
ДЛЯ ФОТОННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ**

**Касьянова И.В.¹, Горкунов М.В.¹, Артемов В.В.¹, Ежов А.А.², Мамонова А.В.¹,
Симдянкин И.В.¹, Гейвандов А.Р.¹, Палто С.П.¹**

¹ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, Москва, Россия

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

В работе исследованы закономерности самоорганизации ЖК-метаповерхностей на подложках, обработанных сфокусированным ионным пучком, изучены их электрооптические свойства и заложены принципы дизайна и экспериментального создания фотонных устройств на их основе.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, метаповерхности, электрооптическое переключение.

Использование жидких кристаллов (ЖК) в фотонике открывает возможности для дизайна компактных и эффективных оптических устройств, управляемых электрическим полем. В основе подобных устройств лежат оптические элементы различного типа, такие как дифракционные решетки, призмы, линзы и др. При производстве функциональных ЖК-устройств используются ориентирующие покрытия, задающие однородную планарную или вертикальную ориентацию ЖК-слоя у поверхности подложки, которая транслируется в объем ЖК-слоя. Для создания периодических граничных условий, необходимых для реализации фотонных свойств, как правило, применяют методы, связанные с облучением фоточувствительных ориентирующих слоев поляризованным светом с наведением необходимых текстур. Нашей группой был разработан альтернативный метод [1], связанный с обработкой поверхности стандартного ориентирующего слоя пучком ионов галлия и приводящий к изменению ориентирующих свойств с планарных на вертикальные. Создание текстур в виде решеток с периодом в несколько микрометров позволило получить ЖК-метаповерхности с выраженными дифракционными свойствами в видимом диапазоне.

Преимуществом ЖК-метаповерхностей является возможность их управления низковольтными электрическими сигналами. Нами было показано [2], что данные системы характеризуются миллисекундными временами переключения между режимами дифракции и пропуска. Была разработана полуаналитическая модель, хорошо описавшая процесс переключения и объяснившая характерные зависимости времен переключения от периода метаповерхностей.

Важным следствием предложенного нами метода локального изменения граничных условий является возможность прецизионного формирования фактически произвольного фазового профиля проходящей световой волны, что существенно расширяет диапазон фотонных устройств. Развитие метода позволило получить более сложные по дизайну и свойствам устройства (рис. б-в), такие как микролинзы, асимметричные дифракционные решетки, направляющие свет в заданный канал [3] или в несколько каналов с возможностью переключения между ними под действием электрического поля [4].

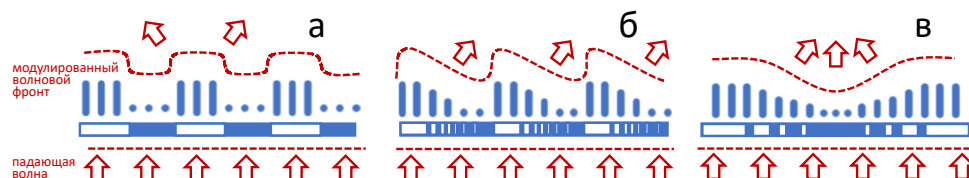


Рисунок. Устройство и принцип действия метаповерхностей со свойствами симметричных (а) и асимметричных (б) дифракционных решеток и микролинз (в)

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

[1] Kasyanova I., Gorkunov M., Artemov V., Geivandov A., Mamonova A., Palto S., *Optics Express*, **26**, 16, 20258-20269, (2018).

[2] Gorkunov M., Kasyanova I., Artemov V., Ezhov A., Mamonova A., Simdyankin I., Palto S., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 7, 30815–30823, (2020).

[3] Kasyanova I., Gorkunov M., Palto S., *Europhys. Lett*, **136**, 2, 24001, (2022).

[4] Gorkunov M., Mamonova A., Kasyanova I., Ezhov A., Artemov V., Simdyankin I., Geivandov A., *Nanophotonics*, **11**, 17, 3901-3912, (2022).

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ИОНОВ Eu^{3+} В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ МОЛИБДАТА ЕВРОПИЯ СО СТРУКТУРОЙ ШЕЕЛИТА

Кулинкин А.Б.¹, Магарян К.А.², Аржанов А.И.^{2,4}, Смирнов А.Н.¹, Коровин А.М.¹, Кузин Д.С.¹, Чернышев В.А.³, Наумов А.В.^{2,4}, Соколов Н.С.¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

³Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

⁴Институт спектроскопии Российской академии наук, г. Троицк, Россия

Изучена фотолюминесценция выращенных на подложках SrTiO_3 эпитаксиальных слоев молибдата европия со структурой шеелита. При неселективном и селективном возбуждении в области ${}^7\text{F}_0$ - ${}^5\text{D}_2$ перехода при 300 К и 8.6 К измерены спектры фотолюминесценции Eu^{3+} .

Ключевые слова: фотолюминесценция, ионы Eu^{3+} , молибдат европия.

Эпитаксиальные оксидные пленки и многослойные гетероструктуры привлекательны с точки зрения фундаментальных исследований материалов для нанофотоники. Молибдаты образуют большое семейство неорганических соединений и широко используются в качестве люминесцентных материалов, сцинтилляторов, а также для апконверсии благодаря своим уникальным химическим и физическим свойствам. Легированные/замещенные редкоземельными элементами молибдаты представляют особый интерес в связи с их потенциальным применением в твердотельных источниках света на основе светодиодов ближнего ультрафиолетового диапазона и изображения биологических объектов.

В настоящей работе были проведены исследования фотолюминесценции (ФЛ) эпитаксиальных слоев молибдата европия Eu_xMoO_4 , выращенных методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках $\text{SrTiO}_3(001)$. Картины дифракции быстрых электронов показали, что эти слои имеют тетрагональную структуру шеелита, в которой все ионы европия двукратно заряжены. В случае $x < 1$ появляются вакансии, концентрация которых возрастает при уменьшении x , но структура шеелита сохраняется в широком диапазоне значений этой величины из-за эффекта эпитаксиальной стабилизации. Появление вакансий сопровождается захватом на них электронов с Eu^{2+} и образованием ионов Eu^{3+} .

При возбуждении зеленым лазером ($\lambda_{\text{exc}} = 532$ нм) наблюдалась люминесценция Eu^{3+} в области ${}^5\text{D}_0$ - ${}^7\text{F}_{0,1,2,3}$ переходов, при этом форма спектра в области наиболее сильного ${}^5\text{D}_0$ - ${}^7\text{F}_2$ перехода указывала на наличие более низкой, чем S_4 симметрии центра, характерной для примеси европия в решетке типа шеелита [1]. При проведении низкотемпературных измерений с помощью перестраиваемого лазера в области ${}^7\text{F}_0$ - ${}^5\text{D}_2$ перехода линии ФЛ существенно сузились, что позволило обнаружить ряд интересных особенностей энергетической структуры ионов Eu^{3+} , рис. В области магнитодипольного перехода ${}^5\text{D}_0$ - ${}^7\text{F}_1$ наблюдалась очень резкая зависимость интенсивности и ширины линий ФЛ от длины волны возбуждения, рис. (а). Кроме того, при увеличении длины волны лазера всего на 0.1 нм ($\Delta E = 4.6 \text{ см}^{-1}$), наблюдается еще одна линия излучения, указывающая на наличие центра с близкой, но несколько различной энергетической структурой. В области перехода ${}^5\text{D}_0$ - ${}^7\text{F}_2$ также наблюдается существенная зависимость вида спектра от небольших изменений длины волны возбуждения, рис. (б). В настоящее время ведется анализ соответствия наблюдаемой картины расщепления с предложенными моделями локального окружения ионов Eu^{3+} в молибдате европия со структурой шеелита с вакансиями ионов Eu^{2+} .

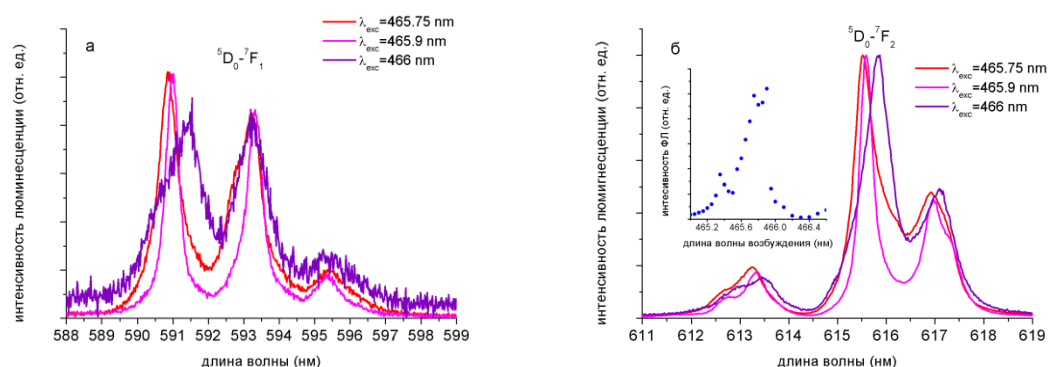


Рисунок. Нормированные спектры люминесценции пленки молибдата европия на подложке $\text{SrTiO}_3(001)$ при различном возбуждении. Вставка — зависимость интенсивности ФЛ на 615.63 нм от λ_{exc} , $T=8.6$ К

Работа поддержана (К.А.М., А.И.А., А.В.Н.) в рамках темы ГЗ МПГУ АААА-А20-120061890084-9 и Гранта Президента РФ НШ-776.2022.1.2.

[1] Guzik M., Tomaszewicz E., Guyot Y., Legendziewicz J., Boulon G., *J. Mater. Chem. C*, **3**, 8582-8594, (2015).

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК И НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ GaP

Ридер М.А.¹, Большаков А.Д.^{2,3}, Кондратьев В.М.^{2,3}, Кузнецов А.С.^{2,3}, Федоров В.В.^{2,4}, Захаров В.В.¹, Орлова А.О.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия

³МФТИ, Физтех, Долгопрудный, Россия

⁴Санкт-Петербургский Политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе исследовались методы создания и оптические, морфологические, электрофизические свойства гибридных наноструктур на основе углеродных точек и нитевидных нанокристаллов из фосфида галлия.

Ключевые слова: гибридные наноструктуры, углеродные точки, нитевидные нанокристаллы.

Гибридные системы ННК/УТ активно изучаются по всему миру, например для применения в фотокаталитических технологиях [1], для фотоанодов [3], а также для создания спектрально чувствительных фотодетекторов [3, 4]. Целью же данной работы является изучение методов формирования, оптических, электрофизических и морфологических свойств гибридных наноструктур на основе углеродных точек и нитевидных нанокристаллов GaP. В работе использовались «синие» и «красные» углеродные точки (С-УТ и К-УТ), синтезированные гидротермальным методом и нитевидные нанокристаллы (ННК) из фосфида галлия со средней длиной 20 мкм и диаметром 150 нм с каплей Ga на вершине. ННК были синтезированы в СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова научной группой под руководством Большакова А.Д. Образцы полученных гибридных наноструктур были изучены с помощью электронной и лазерной сканирующей конфокальной микроскопии. Зависимость времени жизни люминесценции УТ от метода создания гибридных структур была исследована методом время-разрешенной микроскопии.

Были получены флуоресцентные изображения и изображения в проходящем свете систем ННК/УТ, а также проанализированы локальные спектры интенсивности люминесценции углеродных точек в созданных системах (рис. а). Также были получены трехмерные флуоресцентные изображения массива ННК на ростовой подложке с равномерно распределенными УТ (рис. б), СЭМ изображения и измерена кинетика люминесценции систем.

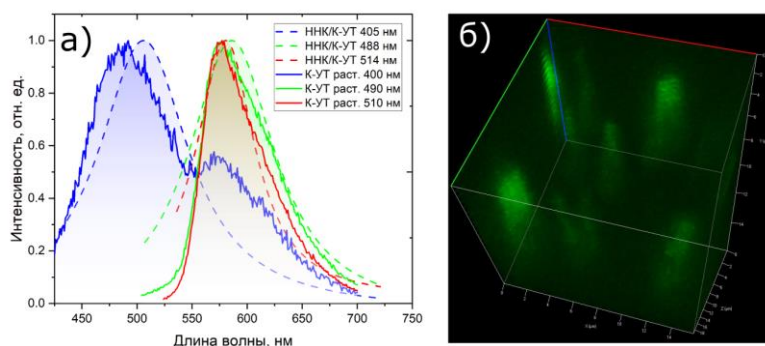


Рисунок. а) Спектры интенсивности волны люминесценции систем ННК/К-УТ. б) Флуоресцентное 3D изображение гибридной наноструктуры ННК/К-УТ на ростовой подложке, возбуждение 405 нм, объектив 50x/0,95

Выявлено, что оптимальным методом сопряжения является нанесение раствора УТ на вертикально ориентированный массив ННК с последующим высушиванием в течение пяти часов. Исследование трехмерных флуоресцентных изображений показывает, что УТ распределяются по поверхности ННК, а не на ростовой подложке, что говорит о том, что данные УТ способны закрепляться на поверхности нановискеров. В структурах ННК/УТ обнаружено уменьшение времени жизни и усиление люминесценции на концах ННК, что подтверждают люминесцентные изображения и измерение кинетики люминесценции. Такие особенности могут свидетельствовать об инжектировании носителей заряда от УТ к ННК, что называется эффектом Парселла, открытым в 1946 году и многократно подтвержденным в различных системах с добротным резонатором.

Исследование выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 2, с. 2019-1080 при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, грант 08-08.

- [1] Chen Z., *Chin. J. of Catalysis*, **39**, 841-848, (2018).
- [2] Xu X., *Carbon*, **121**, 201-208, (2017).
- [3] Yin C., *Sensors and Actuators*, **321**, 112590, (2021).
- [4] Shen X., *Mater. Res. Express*, **6**, 045002, (2019).

**ВЛИЯНИЕ ПОСТСИНТЕЗНОЙ ОБРАБОТКИ И ВНЕШНЕГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
БИОСОВМЕСТИМЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ**

Ефимова А.А., Захаров В.В., Орлова А.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе исследовались методы создания, оптические, морфологические, электрофизические свойства углеродных точек, а также их стабильность при внешнем облучении и смене рН.

Ключевые слова: углеродные точки, стабильность оптических свойств, люминесценция, изменение рН, внешнее электромагнитное облучение.

Нанотехнологии открывают огромные перспективы в различных областях, включая электронику, медицину и энергетику. Углеродные многоатомные кластерные образования играют ключевую роль в сфере нанотехнологий по ряду причин. В данной работе речь идет об углеродных точках – сравнительно новом классе углеродных наноструктур. Углеродные точки (УТ) – это общий термин, используемый для обозначения наноразмерных нульмерных фотолюминесцентных углеродных наноматериалов с характерным размером менее 20 нм и квазисферической морфологией [1]. Благодаря низкой токсичности, регулируемой флуоресценции и отличной биосовместимости углеродные точки перспективны в таких областях, как биовизуализация, доставка лекарств, оптоэлектроника и зондирование, что делает их интересным аналогом хорошо изученных квантовых точек [2]. В то же время, перспективными являются УТ, люминесцирующие в ближней инфракрасной области благодаря лучшей визуализации люминесценции в тканях живых организмов, так как окно оптической прозрачности биологической ткани находится в диапазоне 600–1000 нм. Также УТ должны оставаться стабильными для возможности их успешного применения в живых организмах [3].

В работе были исследованы углеродные точки, их классификации, эмиссионные модели, способы синтеза, оптические и морфологические свойства, и их особенности. Были отработаны протоколы сольвотермальных и гидротермальных синтезов УТ на основе *p*- и *o*-фенилендиамина. В результате синтезов получены УТ на основе фенилендиаминов, обладающие люминесценцией в длинноволновой области видимого спектра с максимумами на длинах волн от 600 до 675 нм. УТ были охарактеризованы с помощью спектрофотометра, спектрофлуориметра и конфокального микроскопа с коррелированным по времени однофотонным счетом времен жизни ФЛ. На основании характеристики были отобраны углеродные точки, синтезированные с помощью кислот, подвергнувшиеся впоследствии экспериментам с целью проверки стабильности их свойств при облучении и смене рН их окружения. Эксперименты по фотоиндуцированному воздействию на растворы исследуемых УТ проводились с использованием лазера с длиной волны 532 нм и максимальной мощностью в пределах 100 мВт. После каждого шага 15-минутного облучения регистрировались спектральные данные раствора. Суммарно засветка проводилась в течение 90 минут, что соответствовало суммарной экспозиции $A = 583,2 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$. Нейтрализация и смена рН УТ проводились методом титрования с добавлением раствора КОН или азотной кислоты, достигая значения рН равные 2, 5, 7 и 10. В данных состояниях растворы проходили процедуру характеристики оптических свойств для наблюдения динамики их изменения.

Эксперименты показали подверженность лазерному облучению и появлению эффектов фотоиндуцированных изменений оптических свойств не у всех образцов, что может говорить о наличии у подверженных образцов сопутствующих особенностей (наличие разрушаемых облучением молекул тушителя, взаимодействовавших с люминесцентными центрами УТ, или возможность активации новых энергетических переходов, связанных с фотоиндуцированными структурными изменениями). Изменение рН оказывает значительное влияние на углеродные точки, синтезированные с использованием кислот, изменяя при подщелачивании не только интенсивность и локализацию спектров люминесценции, но и значительно уширяя их для некоторых образцов. Также пограничные щелочные состояния (рН 7 и 10) негативно влияют на стабильность УТ.

Понимание реакции углеродных точек на внешнее облучение имеет решающее значение для их эффективного использования в таких областях, как флуоресцентная визуализация или фотодинамическая терапия. Контроль и оптимизация их фотолюминесцентных свойств при внешнем облучении может повысить их производительность и надежность в различных приложениях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 2, с. 2019-1080 при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, грант 08-08.

[1] Đorđević, *Nature Nanotechnology*, **17**, 112-130, (2022).

[2] Zhu C., *Journal of Materials Chemistry*, **3**, 8810–8816, (2015).

[3] Javed N., *Particle & Particle Systems Characterization*, **38**, 2000271, (2021).

**СИСТЕМА НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ И
КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ZAIS ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ**
Ковова М.С.¹, Шмаков С.В.², Захаров В.В.¹, Большаков А.Д.^{2,3}, Орлова А.О.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия

³МФТИ, Физтех, Долгопрудный, Россия

В работе была исследована локализация квантовых точек ZAIS, внедренных различными методами в клетки при перфорировании мембраны нитевидными нанокристаллами. Также были исследованы оптические свойства водного раствора квантовых точек в средах, применяемых для культивации клеток и подготовки образцов.

Ключевые слова: квантовые точки ZAIS, нитевидные нанокристаллы, клетки HeLa.

Нитевидные нанокристаллы (ННК) весьма перспективны для использования в различных биологических исследованиях. Массивы электродов из ННК могут внутриклеточно записывать и стимулировать активность нейронов [1], функционализированные массивы ННК могут быть использованы для захвата и количественного определения определенного типа клеток [2], возможность использования ННК в качестве платформы для введения биомолекул в живые клетки также была продемонстрирована в работе [3]. Трансфекция за счет механопорации – многообещающий метод доставки генетического материала к клеткам-мишеням, такое перфорирование клеточной мембраны можно реализовать за счет культивации клеточной линии на поверхности с вертикально ориентированными нитевидными нанокристаллами, а квантовые точки выступают в роли люминофора, позволяющего определить эффективность механопорации и локализацию наноразмерных частиц при подобном взаимодействии нанокристаллов с клеткой, этот подход и рассматривается в данной работе.

В ходе данного исследования были применены квантовые точки (КТ) ZAIS, стабилизированные глутатионом и полиэтиленгликолем, нитевидные нанокристаллы из фосфида галлия со средней длиной 4 мкм и диаметром 150 нм, а в качестве биологического объекта была использована клеточная линия карциномы шейки матки HeLa. Были созданы и исследованы образцы на стекле, при добавлении раствора КТ в питательную среду клеток, образцы на кремниевой подложке с вертикально ориентированным массивом ННК, перфорирующим клеточную мембрану в присутствии раствора КТ в питательной среде, и образцы на кремниевой подложке с массивом ННК, поверхность которых покрыта КТ, и выращенными на этой структуре клетками. Были получены флуоресцентные изображения (рисунок), изображения в проходящем и отраженном свете, а также проанализированы локальные спектры интенсивности люминесценции квантовых точек в созданных образцах.

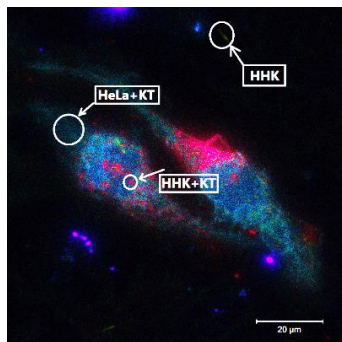


Рисунок. Люминесцентное изображение в реальных цветах образца на кремниевой подложке с вертикально ориентированным массивом ННК, перфорирующим клеточную мембрану в присутствии раствора КТ в питательной среде клеток, объектив 20x/0.75, длина волны возбуждения 405 нм

Исходя из результатов исследования, были сделаны следующие выводы: КТ AIS, стабилизированные глутатионом, достаточно сильно связываются с вертикально ориентированными ННК, локализуясь на их поверхности, однако в клетки эти КТ заходят менее эффективно, чем КТ AIS, стабилизированные полиэтиленгликолем. Квантовые точки, стабилизированные полиэтиленгликолем, проникают из питательной среды через перфорированную мембрану и локализуются преимущественно на поверхности ННК. Перфорирование мембраны клетки ННК в присутствии КТ в питательной среде позволяет эффективно доставлять AIS в различные части клетки, в том числе ядро.

Исследование было выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание №. 2019-1080.

[1] Robinson J.T., *Nat. nanotechnol.*, **7**, №3, 180-184, (2012).

[2] Lee S.K., *Nano Lett.*, **12**, №6, 2697-2704, (2012).

[3] Shalek A.K., *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **107**, №5, 1870-1875, (2010).

**КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ ТРОЙНЫХ СОЕДИНЕНИЙ $AgInS_2/ZnS$ КАК
ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СОЗДАНИЯ
ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРОВ**

Осколкова Т.О., Орлова А.О.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе сформированы наноконпозиты на основе нанокристаллов $AgInS_2/ZnS$ и тетрафенилпорфирина. Продемонстрировано, что квантовые точки могут выступать в качестве эффективных доноров энергии для тетрафенилпорфирина, увеличивая количество генерируемого им синглетного кислорода.

Ключевые слова: безкадмиевые квантовые точки, фотосенсибилизатор, синглетный кислород.

За последние годы полупроводниковые квантовые точки (КТ) тройных соединений I-III-VI привлекли большое внимание исследователей как альтернатива классическим двойным нанокристаллам на основе кадмия или свинца [1]. Благодаря своей низкой токсичности и уникальным фотофизическим свойствам, а именно, высокому квантовому выходу люминесценции в видимой и ближней инфракрасной спектральных областях и длительным временам затухания люминесценции, КТ тройных соединений зарекомендовали себя как перспективные материалы для широкого ряда биомедицинских приложений [2]. К примеру, данные нанокристаллы обладают потенциалом применения в фотодинамической терапии – методе лечения, основанном на способности молекул фотосенсибилизатора генерировать активные формы кислорода в условиях фотовозбуждения [3]. В таком случае, КТ могут выступать в качестве доноров энергии электронного возбуждения для молекул фотосенсибилизатора, тем самым повышая их эффективность генерации активных форм кислорода. Принимая во внимание, что КТ тройных соединений I-III-VI являются относительно новым классом наноструктур, актуальной задачей становится исследование механизмов увеличения генерации активных форм кислорода наноконпозитами на их основе.

В рамках данной работы были разработаны наноконпозиты на основе гидрофильных КТ тройных соединений $AgInS_2/ZnS$, гидрофобных молекул тетрафенилпорфирина (ТФП) и полимерной матрицы из хитозана. Анализ оптических свойств разработанных наноконпозитов с использованием методов стационарной электронной и люминесцентной спектроскопии показал, что увеличение концентрации молекул ТФП в составе наноконпозита сопровождается эффективным тушением люминесценции КТ и сенсбилизацией молекул ТФП. Данный результат может свидетельствовать о возникновении дополнительного канала релаксации возбуждения, связанного с безызлучательным переносом энергии по механизму Фёрстера [3]. На основании анализа фотофизических свойств наноконпозитов с различным соотношением компонент, была проведена оценка эффективности переноса энергии, максимальное значение которой составило приблизительно 35%. Далее была предложена модель для теоретического описания относительного увеличения концентрации генерируемого молекулами ТФП синглетного кислорода за счет переноса энергии от КТ $AgInS_2/ZnS$. Конечное выражение может быть представлено формулой (1):

$$Q = \frac{E_{FRET} \cdot C_{КТ} \cdot \varepsilon_{КТ} \cdot F}{C_{ТФП} \cdot \varepsilon_{ТФП} \cdot m} + 1, \quad (1)$$

где E_{FRET} – эффективность переноса энергии от КТ к молекулам ТФП, $C_{КТ}$ – концентрация КТ, $\varepsilon_{КТ}$ – коэффициент экстинкции КТ, F – степень тушения люминесценции КТ, $C_{ТФП}$ – концентрация молекул ТФП, $\varepsilon_{ТФП}$ – коэффициент экстинкции молекул ТФП, m – доля молекул ТФП в мономерной форме.

Результаты расчетов показали, что в случае разработанных наноконпозитов удастся достигнуть в 2.5 раза более эффективной генерации синглетного кислорода, чем в случае свободных молекул ТФП.

Таким образом, в данной работе был проведен подробный анализ закономерностей безызлучательного переноса энергии между КТ тройных соединений $AgInS_2/ZnS$ и молекулами ТФП в составе наноконпозита. Продемонстрировано, что в разработанных наноконпозитах может наблюдаться более эффективная генерация синглетного кислорода относительно свободных молекул ТФП. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности разработки нового поколения фотосенсибилизаторов активных форм кислорода на основе нанокристаллов тройных соединений и гидрофобных молекул тетрапиррольного ряда.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания (Паспорт №2019-1080) и гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО, а также поддержано Программой «Клевер»: Совместные проекты Сколтеха, МФТИ и ИТМО.

[1] Allen P.M., Bawendi M.G., *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, №29, 9240-9241, (2008).

[2] Girma W.M., Fahmi M.Z., Permadi A., Abate M.A., Chang, J.Y., *J. Mater. Chem. B*, **5**, №31, 6193-6216, (2017).

[3] Samia A.C., Dayal S., Burda C., *Photochem. Photobiol.*, **82**, №3, 617-625, (2006).

АРТФОТОНИКА

ИССЛЕДОВАНИЕ *IN SITU* КАРТИНЫ «ХИРОСИМА I» (1958)

ВЕРНЕРА ТЮБКЕ (1929-2004)

Смолянская А.А.^{1,2}, Андреев И.А.^{1,2}, Сирро С.В.^{1,2},
Асеев В.А.¹, Терещенко Е.Ю.^{2,3,4}, Смолянская О.А.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Государственный Русский музей, Санкт-Петербург, Россия

³Институт кристаллографии им. В.А. Шубникова, Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

В исследовании представлены результаты технико-технологического анализа картины "Хиросима I" (1958) немецкого художника Вернера Тюбке. Благодаря экспертизе был определен пигментный состав живописных слоев и обнаружен ранее неизвестный скрытый портрет отца Вернера Тюбке.

Ключевые слова: Вернер Тюбке, искусство ГДР, исследование *in situ*.

Исследование посвящено творчеству Вернера Тюбке (1929 – 2004), ведущего официального художника ГДР, ярчайшего представителя Лейпцигской школы живописи [1]. Приверженность классическим традициям станковой картины и универсальное владение техникой живописи – одна из уникальных особенностей его творчества. Как художник с высшим не только художественным, но и педагогическим образованием, Тюбке блестяще владел техниками старых мастеров, пренебрегая методами до- и послевоенного модернизма. О глубокой связи искусства Тюбке с традициями старых мастеров пишут все ключевые специалисты по творчеству художника. Тем не менее, несмотря на общее понимание необходимости рассматривать наследие Тюбке в контексте большой художественной традиции европейской живописи, на уровне анализа конкретного материала обнаруживается известная ограниченность подходов.

Чтобы разобраться в технологической «кухне» Тюбке, решено было провести лабораторную экспертизу его живописи в отделе технико-технологических исследований Русского музея с помощью следующих методов: фотография в разных световых диапазонах, элементный анализ, рентгенограмма и молекулярный анализ (ИК-Фурье спектроскопия и рамановская спектроскопия). В качестве объекта анализа была взята единственная известная нам картина, находящаяся в России. Это «Хиросима I» (холст, масло, NT-287), подаренная коллекционером Петером Людвигом Русскому музею в 1995 году.

В экспертизе был применен метод *in situ* с использованием музейных приборов: УФ-люминесценции, инфракрасной рефлектографии, рентгенографии, портативной рентгеновской флуоресценции, ИК-спектроскопии с Фурье-преобразованием и поляризационной микроскопии с использованием микрозондов. Наибольший интерес в проведенной экспертизе представляет элементный анализ и рентгенограмма. Микроскоп показал нижележащий зеленый слой живописи, в результате чего возникло предположение, что это цвет фона другой картины. Рентген подтвердил эту гипотезу, обнаружив под верхним слоем мужской портрет, который был частично соскоблен (стерт), местами до холста. Сопоставление полученного изображения с рисунками Тюбке того времени подтвердило искусствоведческую догадку: под «Хиросимой» скрыт портрет отца художника на зеленом фоне. При этом, в отличие от экспрессивной живописи верхнего слоя, портрет был выполнен в более предметной, конкретной, академической манере, которую художник развивал с годами.

Неочевидную связь «Хиросимы» с более поздними работами Тюбке выявил и молекулярный анализ. В числе пигментов красок Тюбке были обнаружены волконская «Зеленая земля» и гутанкарская «Фиолетовая». Любопытно, что те же пигменты вызывали интерес и недоразумение у немецких коллег, изучающих творческое наследие Тюбке. У автора работы возникло предположение, что Тюбке специально смешивал современные краски, создававшиеся в Советском Союзе и ГДР, с другими веществами, имитируя тем самым живопись старых мастеров.

Таким образом, перед нами первое исследование, в котором для изучения картины Вернера Тюбке «Хиросима I» использовались инструменты музейной лаборатории. Специалисты не только определили состояние картины, фактуру авторского мазка, технику нанесения красочного слоя, работу художника над композицией и типы пигментов, но и выявили ранее неизвестную картину Вернера Тюбке (портрет его отца). Под модернистской картиной была обнаружена академическая живопись, которая характеризует поиск молодым художником собственного уникального художественного языка на раннем этапе его творчества (1958). Возникло предположение о том, что художник уже использовал волконскоит и фиолетовую охру в своих картинах, когда подражал старым мастерам. Например, двадцать лет спустя Тюбке использовал те же пигменты в знаменитой «Панораме крестьянской войны» в немецком городе Бад-Франкенхаузен, в которой есть много отсылок к картинам прошлого.

Исследования выполнены при поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075-15-2021-593 от 01.06.2021 г.).

[1] Tübke W., Mein Herz empfindet optisch: Aus den Tagebüchern, Skizzen und Notizen. Herausgegeben von Annika Michalski und Eduard Beaucamp; Göttingen: Wallstein Verlag, 396, (2017).

**СОЗДАНИЕ КОМПАКТНОЙ СИСТЕМЫ РАДАРНОГО ТИПА ДЛЯ
СКАНИРОВАНИЯ ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ПОЛОТЕН НА ЧАСТОТЕ 122 ГГц**

Цветков А.Р., Смолянская О.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Данная работа посвящена сборке компактной системы радарного типа для сканирования художественных полотен на частоте 122 ГГц [1].

Ключевые слова: арт-фотоника, терагерцовое излучение, сканирующая система.

Основными задачами, которые решались в ходе работы, являются: разработка и сборка механической части компактной системы с возможностью позиционирования радара по двум осям; разработка и тестирование программы для управления системой и обработки результатов сканирования с помощью ПК и проектирование оптической схемы системы [2].

Разработка и проектирование основных узлов системы, включая оптическую схему, велась с применением программы Blender 3D. Программная часть создана на языке Python 3 с использованием различных библиотек, таких как PySerial, NumPy, tkinter и др.

В результате работ была разработана механическая часть компактной системы с возможностью позиционирования радара по двум осям с использованием принципа действия 2D плоттера. Механическая часть компактной системы сканирования собрана с использованием 3D моделирования и 3D печати отдельных компонентов. Основной каркас выполнен из доступных материалов, таких как алюминиевые профили и уголки, а механика выполнена с применением стандартных компонентов 3D принтеров. Разработан программный комплекс с применением языка Python, позволяющий управлять местоположением радара в ручном или автоматическом режиме. Кроме того, комплекс позволяет получать и обрабатывать данные, получаемые в процессе сканирования. На данном этапе получаемые данные позволяют сделать выводы лишь о количестве распознанных целей и о расстоянии до них. В дальнейшем планируется доработать программу для получения визуализации изучаемых объектов [3]. Разработанная оптическая система оказалась малоэффективно ввиду неудачной конструкции объектива и одинакового материала, используемого для печати объектива и линзы, что приводит к нежелательным отражениям сигнала и распознаванию нежелательных целей вне основного фокуса излучения. В дальнейшем планируется переработать конструкцию оптической системы для того, чтобы избежать подобных эффектов.

Работы выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Мегагранта (№ 075-15-2021-593).

[1] Fauquet F., Goh J.S., Pan M., Mounaix P., Guillet J., *IEEE Radar Conference*, (2021).

[2] Артюхина Н.К., Белорусский национальный технический университет, (2014).

[3] Statnikov K., Sarmah N., Grzyb J., et al., *Proceedings of the 2014 11th European Radar Conference*, Rome, 447–450, (2014).

НЕВСКАЯ ФОТОНИКА-2023
ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Дизайн обложки

М.О. Жукова

Вёрстка

А.А. Дроздов

Подписано к печати

Заказ 4760 от 29.11.2023

Тираж 300 экз.

Печатается в авторской редакции

Отпечатано: Учреждение «Университетские коммуникации»
199034, Санкт-Петербург, В.О., Биржевая линия, 16

ИТМО

ISBN 978-5-7577-0698-6



**Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО**

197101, Санкт-Петербург,
Кронверкский пр., д. 49, литер. А