

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОСТРУКТУР, ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Тезисы докладов
Всероссийской
научной молодежной конференции



**24–28 ноября 2025 года
Санкт-Петербург**

**ПОЛИТЕХ-ПРЕСС
Санкт-Петербург
2025**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ
И НАНОСТРУКТУР,
ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ
ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Тезисы докладов
Всероссийской научной молодежной конференции

24–28 ноября 2025 года

Санкт-Петербург



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2025

ББК 22.379
Ф48

Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто-и наноэлектроника : тезисы докладов Всероссийской научной молодежной конференции, 24–28 ноября 2025 г., Санкт-Петербург. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 105 с.

ISBN 978-5-7422-9208-1

© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2025

ОРГАНИЗАТОРЫ И СПОНСОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Организаторы конференции

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Академический университет им. Ж.И. Алферова
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербургский государственный университет
Российско-армянский университет

Финансовая поддержка

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Госзадание Минобрнауки РФ №075-03-2025-256/7)
ООО «Тидекс»

Программный комитет

Председатель — М.М. Глазов, чл.-корр. РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН
Заместитель председателя — Д.А. Фирсов, СПбПУ, С.-Петербург

Члены комитета:

В.Ф. Агекян, СПбГУ, С.-Петербург
И.А. Акимов, Технический университет
Дортмунда, Германия
В.Я. Алешкин, ИФМ РАН, Н. Новгород
С.Ю. Вербин, СПбГУ, С.-Петербург
А.Е. Жуков, НИУ ВШЭ, С.-Петербург
В.И. Зубков, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,
С.-Петербург
М.С. Каган, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
Москва

О.С. Комков, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,
С.-Петербург
В.П. Кочерешко, ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
С.-Петербург
А.А. Саркисян, Российско-армянский
университет, Ереван, Армения
Д.Р. Хохлов, МГУ, Москва
Г.Э. Цырлин, Алфёровский университет,
С.-Петербург
Т.В. Шубина, ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
С.-Петербург

Организационный комитет

Председатель — Д.А. Фирсов, СПбПУ, С.-Петербург
Заместитель председателя — М.Я. Винниченко, СПбПУ, С.-Петербург
Ученый секретарь — Н.Ю. Харин, СПбПУ, С.-Петербург

Члены организационного комитета:

Е.В. Владимирская, СПбПУ, С.-Петербург
В.Э. Гасумянц, СПбПУ, С.-Петербург
Д.А. Карапулов, СПбПУ, С.-Петербург
В.П. Кочерешко, ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
С.-Петербург
Г.А. Мелентьев, СПбПУ, С.-Петербург

И.С. Мухин, Алфёровский университет,
С.-Петербург
В.Ю. Паневин, СПбПУ, С.-Петербург
А.А. Саркисян, РАУ, Ереван, Армения
Р.В. Устименко, СПбПУ, С.-Петербург
В.А. Шалыгин, СПбПУ, С.-Петербург

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ (ПД)	5
ОБЪЕМНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ (ОСП)	7
ПРОЦЕССЫ РОСТА, ПОВЕРХНОСТЬ, ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА (ПР)	21
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ, СВЕРХРЕШЕТКИ, КВАНТОВЫЕ ЯМЫ (ГСКЯ)	28
КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ, КВАНТОВЫЕ НИТИ И ДРУГИЕ	
НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ (КТКН)	41
ПРИБОРЫ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ (ПОиН)	70
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ (НМ)	96
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	103

ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 004.8

В.Г. Малышкин (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

MACHINE LEARNING И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ФИЗИКЕ

С момента возникновения концепции универсальных компьютеров и их первых реализаций вопрос о предмете моделирования возникает как один из наиболее важных. Ещё в работах А. Тьюринга рассматривалась проблема "имитации" человека, известная сейчас как тест Тьюринга. Дальнейшее развитие включало в себя ряд различных направлений, возникли большие ожидания прогресса в искусственном интеллекте. К 70-м годам ожидаемое не свершилось, возникло сильное разочарование. Произошло критическое урезание финансирования. Возникла "зима" искусственного интеллекта. Можно выделить две зимы: 1974–1980 и 1987–2000 годов.

На фоне неудач общего искусственного интеллекта произошло сильное ограничение предмета исследований, а сама деятельность была названа иначе. Появилось machine learning (ML). Машинное обучение (ML) – это область искусственного интеллекта, занимающаяся разработкой и изучением статистических алгоритмов, способных обучаться на данных и обобщать на ранее неизвестные данные, выполняя задачи без явных инструкций. Машинное обучение применяется во многих областях, включая обработку естественного языка, компьютерное зрение, распознавание речи, фильтрацию электронной почты, сельское хозяйство и медицину.

Задача machine learning – это, по сути, обратная задача: построение модели из данных.

Любая задача ML состоит из четырёх компонент: выбор входных атрибутов; представление знания; критерии качества (норма); алгоритм поиска решения в пространстве представления знания.

Представление знания является самым важным элементом, так как оно определяет способность системы машинного обучения к обобщению.

Прогресс в области представления знаний – от коэффициентов линейной регрессии, весов персептрона, статистического обучения и логических подходов к методам опорных векторов, правилам и деревьям решений, нечеткой логике и глубокому обучению – определял развитие машинного обучения в последние четыре десятилетия.

Особый интерес представляет представление знания в виде LLM (large language models), которые стали по сути первым успешным подходом в создании chat bots. Главная особенность LLM – она оперирует как "текст на вход, текст на выход", что отличается от ранних моделей, оперировавших как "числа на вход, числа на выход". В докладе обсуждаются успехи, сложности и ограничения LLM моделей. Например, LLM могут быть крайне эффективны в прохождении теста Тьюринга (для неподготовленного собеседника). Обсуждаются физические задачи, в решении которых LLM может быть эффективно.

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ ФОТОНОВ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ

Полупроводниковые детерминированные источники фотонов являются ключевыми элементами в быстро развивающихся системах квантовых вычислений и квантовых коммуникаций [1]. Коммерчески доступные источники фотонов на основе квантовых точек (КТ) InAs/GaAs с длиной волны излучения около 920 нм обеспечивают требуемые значения таких критических параметров, как чистота однофотонного излучения и неразличимость фотонов [2]. Однако достигнутое значение яркости источников все еще недостаточно для масштабирования разрабатываемых фотонных устройств до размеров, представляющих практический интерес, а их использование в квантовых защищенных системах связи в настоящее время ограничено отсутствием эффективных источников фотонов, излучающих в телекоммуникационных спектральных диапазонах.

В течение последних 10 лет для решения этих задач в лаборатории «Квантовой фотоники» ФТИ им. А.Ф. Иоффе активно разрабатывалась технология изготовления детерминированных источников фотонов на основе микрорезонаторов с одиночными КТ в системе InAs/GaAs, излучающих на длине волны 920 нм и предназначенных для обеспечения работы схем фотонных квантовых вычислений. В результате исследований были разработаны источники неразличимых фотонов с рекордно высокой эффективностью, уже работающие в квантовых фотонных схемах [3]. Другое приоритетное направление исследований связано с разработкой источников фотонов, работающих в телекоммуникационном С-диапазоне (1530–1565 нм). С использованием оригинального подхода, включающего формирование эпитаксиальной метаморфной гетероструктуры с КТ InAs/InGaAs и гибридного микрорезонатора с полупроводниковым и диэлектрическим распределенными брэгговскими отражателями, изготовлены источники одиночных поляризованных фотонов С-диапазона с эффективностью до 22% на выходе источника, что вдвое превышает лучшие мировые достижения. В докладе представлены разработанные источники одиночных фотонов и описаны перспективные направления исследований в области дальнейшего улучшения их характеристик.

1. C. Couteau et al., *Nature Rev. Phys.*, **5**, 326 (2023).
2. <https://quandela.com>.
3. N.N. Skryabin et al., *Optica Quantum*, **3**, 162 (2025).

ОБЪЕМНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

УДК 537.876.46

А.Я. Ахундов (студ., 2 курс маг., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
М.В. Захарченко (м.н.с., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
Г.Ф. Глинский (д.ф.-м.н., проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

ЗОННАЯ СТРУКТУРА И СОБСТВЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МОДЫ НЕЛИНЕЙНЫХ БИАНИЗОТРОПНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

В течение последних десятилетий нелинейные оптические эффекты были объектом многочисленных исследований, в том числе с точки зрения перспективных приборных приложений. Параллельно с этим, в последние годы существенно возрос интерес к так называемым бианизотропным метаматериалам и фотонным кристаллам [1]. Бианизотропными принято называть такие среды, в которых существует невзаимная связь между векторами напряжённостей \mathbf{E} , \mathbf{H} и индукций \mathbf{D} , \mathbf{B} электромагнитного поля

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} + \alpha \mathbf{H}, \quad \mathbf{B} = \beta \mathbf{E} + \mu \mathbf{H},$$

где ϵ, μ – тензоры диэлектрической и магнитной проницаемостей, а α, β – соответствующие тензоры магнитоэлектрических проницаемостей. Такой вид материальных уравнений приводит к появлению эффектов, позволяющих, управлять электрическими характеристиками вещества посредством магнитных и наоборот. С точки зрения структур на основе фотонных кристаллов и метаматериалов это дает колossalный простор для применений – фотонные топологические изоляторы, оптические фильтры, перестраиваемые магнитным полем и др. [2]. В указанном контексте здесь также возникает необходимость в развитии теории, напрямую учитывающей нелинейную зависимость материальных параметров от внешних магнитных и электрических полей.

В настоящей работе предлагается общий подход к анализу зонной структуры и собственных электромагнитных мод бианизотропных фотонных кристаллов. Развиваемый метод основывается на представлении стационарных уравнений Максвелла в операторной форме [3], в рамках биортогонального формализма электродинамики [4]. В работе исследуются фотонные кристаллы из нелинейных бианизотропных сред. При этом построена универсальная математическая модель, позволяющая анализировать структуры с произвольной бианизотропией свойств, а также нетривиальной геометрией. Предлагаемый подход позволяет сводить системы дифференциальных уравнений к системам линейных алгебраических уравнений, в которых непосредственно учтены граничные условия на интерфейсах структуры, что существенно упрощает численный анализ.

1. J.A. Reyes-Avendaño et al., *New J. Phys.*, **13**, 073041 (2011).
2. A.P. Slobozhanyuk et al., *Sci. Rep.*, **6**, 22270 (2016).
3. Г.Ф. Глинский, *ЖТФ*, **89**(3), 329 (2019).
4. M.V. Zakharchenko, G.F. Glinskii, *Phys. Scr.*, **100**, 045212 (2025).

Д.В. Бабин (студ., 2 курс маг., СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова),
Д.А. Конюх, И.О. Райков, Я.М. Бельтюков (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, отд. ФТТ)

НЕАФФИННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В АМОРФНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Изучение микроскопической структуры аморфных тел в настоящее время является предметом интенсивных исследований, в частности, в связи с разработкой на их основе полупроводниковых устройств. Аморфные полупроводники применяются в солнечных батареях, тонкопленочных транзисторах, фотодетекторах и органических светодиодах. Изучение аморфных систем представляет большой теоретический интерес, поскольку беспорядок в них не может рассматриваться как малое возмущение. При этом транспорт электронов сильно зависит от их взаимодействия с фононами и упругих свойств аморфного материала, которые обладают большими флуктуациями на масштабе нескольких нанометров.

Микроскопическая структура играет важную роль при описании упругих и вязкоупругих свойств аморфных тел [1]. Важным проявлением аморфной структуры являются неаффинные деформации, представляющие собой дополнительное смещение атомов, возникающее в результате нескомпенсированных из-за беспорядка сил и играющие важную роль в определении упругих свойств [2]. Теоретическое изучение аморфных тел осложнено тем, что они находятся в метастабильном положении равновесия, обладающим существенной корреляцией констант связей, описывающих взаимодействие.

Для изучения неаффинных деформаций нами была применена теория коррелированных случайных матриц. Данный метод показал свою эффективность при описании критерия Иоффе-Регеля и других наиболее общих колебательных свойств аморфных твердых тел [3]. Подход заключается в рассмотрении взаимодействия ближайших соседей вблизи устойчивого положения равновесия, где система может описываться квадратичной формой по смещениям частиц. В этом приближении мы описали линейный отклик системы на внешнюю силу с помощью матрицы силовых констант Φ , которая, в случае сильного беспорядка, присущего аморфным телам, наилучшим образом описывается коррелированным ансамблем Вишарта $\Phi = AA^T$, где A – вещественная случайная матрица. Коррелированность беспорядка приводит к тому, что $\langle A_{ik}A_{jl} \rangle \neq 0$. Мы показали, что вблизи порога устойчивости системы корреляционные свойства неаффинных деформаций состоят из двух вкладов, пропорционально $1/r$ и $\exp(-r/\xi)$, где ξ – масштаб неоднородности. Результаты исследований мы проверили при помощи молекулярно-динамического моделирования, где показали совпадение с теоретическими предсказаниями [4].

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-72-10083-П.

1. H. Mizuno, S. Mossa, J.-L. Barrat, *Phys. Rev. E*, **87**, 42306 (2013).
2. T.C. Hufnagel, C.A. Schuh, M.L. Falk, *Acta Materialia*, **109**, 375 (2016).
3. Y.M. Beltukov, V.I. Kozub, D.A. Parshin, *Phys. Rev. B*, **87**, 134203 (2013).
4. D.A. Conyuh, D.V. Babin, I.O. Raikov, Y.M. Beltukov, arXiv:2505.04554 (2025).

В.С. Балашов (асп., 1 год, Университет ИТМО, институт ПСПД),
М.С. Ружевич, К.Д. Мынбаев (Университет ИТМО, институт ПСПД),
Д.Д. Фирсов, И.В. Чуманов, О.С. Комков (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
В.Г. Ремесник, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов (ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН)

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ФОТООТРАЖЕНИЕ ОТОЖЖЕННЫХ ПЛЕНОК HgCdTe С БОЛЬШИМ СОДЕРЖАНИЕМ CdTe

Твердые растворы $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ) с большим ($x \geq 0.5$) содержанием CdTe необходимы при разработке фотодетекторов для астрономических наблюдений и при создании барьерных слоев лазерных гетероструктур и nVn фотоприемников. Для изготовления приборных структур нужен материал дырочного типа проводимости, однако для КРТ с $x \geq 0.5$, ранее практически не востребованного, к решению задачи акцепторного легирования ещё только ищутся подходы. Одним из вариантов (исторически традиционным для КРТ с $x < 0.5$) легирования p -типа может быть введение в материал собственных акцепторов – вакансий ртути V_{Hg} – путем термического отжига в условиях её дефицита. В настоящей работе мы сообщаем о результатах исследований вакансационного легирования серии пленок КРТ с $x = 0.5\text{--}0.7$, проведенных методами фотолюминесценции (ФЛ) и фотоотражения (ФО) в интервале температур $T = 4.2\text{--}300$ К.

Пленки толщиной 3–4 мкм были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках (013)GaAs в ИФП СО РАН. Генерация вакансий проводилась путем отжига пленок при $T = 330\text{--}440$ °C (в зависимости от x) в атмосфере Не при пониженном давлении паров Hg в течение 7–15 мин. Свойства пленок исследовались с использованием установок на базе фурье-спектрометра Vertex 80 (ФЛ и ФО) и монохроматора МДР-23 (ФЛ).

Исследования показали, что в результате отжига происходит существенное улучшение качества материала (в виде увеличения резкости края оптического пропускания и сужения полуширины спектров ФЛ в среднем в $\sim 1.5\text{--}2$ раза при $T = 4.2$ К). Также после отжига происходило увеличение среднего химического состава пленок, что проявлялось в смещении спектров ФЛ в коротковолновую область на величину до ~ 50 мэВ. Эти эффекты объяснены наличием в исходном материале существенных флуктуаций химического состава, проявлявшихся, в том числе, в слабой температурной зависимости положения пиков ФЛ и ФО и в её несоответствии расчетной зависимости ширины запрещенной зоны $E_g(T)$. Наличие флуктуаций состава обусловило специфику диффузии точечных дефектов при отжиге. Исследования эффекта Холла подтвердили конверсию типа проводимости в результате отжига из электронного ($n = (3\text{--}60) \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$) в дырочный ($p = (2\text{--}7) \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$). При исследовании ФЛ с использованием фурье-спектроскопии в пленках были обнаружены уровни в запрещенной зоне с энергиями ионизации E_a от 75 до 125 мэВ. Эти значения лежали между зависимостями $E_a(x)$ для нейтральной и однократно заряженной V_{Hg} , полученными экстраполяцией литературных данных в область $x > 0.5$. В докладе обсуждается природа данных уровней и их связь с собственными дефектами материала, в том числе, с вакансиями ртути.

А.В. Батуева (асп., 4 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ОФТТ),
Г.Р. Асатрян (д.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ОФТТ; ИФИ НАН РА,
лаб. сцинтилляционных материалов),
Р.А. Бабунц (д.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ОФТТ),
А.С. Гурин (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ОФТТ),
А.Г. Петросян (д.ф.-м.н., г.н.с., ИФИ НАН РА, лаб. сцинтилляционных материалов)

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ $\text{YAlO}_3:\text{Dy}$ МЕТОДОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Примесные редкоземельные ионы в кристаллах перовскита YAlO_3 , как и в $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, используются как активные центры лазерной генерации, а также как источники сцинтилляционных фотонов, в том числе в ближней ИК области, удобной для радиобиологии и радиационного мониторинга. Активно ведутся исследования спектральных свойств и кристаллических полей примесных центров в таких структурах (например, [1–3]).

В работе представлены результаты исследования кристаллов YAlO_3 , легированных Dy. Образцы выращены методом Бриджмена в Институте физических исследований НАН Республики Армения из высокочистых (4N) оксидов с номинальной концентрацией Dy равной 0.15 ат.%, ориентированы на рентгеновском дифрактометре. Целью исследования являлось определение параметров редкоземельного иона Dy^{3+} . Измерения выполнены методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) на частоте 94 ГГц при температурах около 6 К на ЭПР/ОДМР спектрометре, разработанном в ФТИ им. А.Ф. Иоффе [4].

Зарегистрированы резко анизотропные сигналы, принадлежащие иону Dy^{3+} (конфигурация $4f^9$, $S = 1/2$) на месте Y^{3+} . Для вращения в плоскости (ac) наблюдаются два сигнала от магнитно неэквивалентных позиций Y^{3+} , окруженных 8 ионами O и смещенных относительно перовскитных узлов решётки. Наблюдается хорошо разрешённая сверхтонкая структура, полностью соответствующая ожидаемой – отношение интенсивностей линии чётных изотопов и линий изотопов с $I = 5/2$, ^{161}Dy и ^{163}Dy , соответствует отношению природных концентраций. В соответствии с численным моделированием определены параметры сверхтонкого взаимодействия и компоненты анизотропного g-фактора для наблюдаемого перехода. В полях около $g = 2$ зарегистрированы также наборы линий, предположительно принадлежащие ионам Cr^{3+} и Fe^{3+} , замещающим Al^{3+} .

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FFUG-2024-0046).

1. E. Cavalli, *Optical Materials: X*, **1**, 100014 (2019).
2. Г.Р. Асатрян и др., *ФТТ*, **67**, 1027–1033 (2025).
3. X.-Y. Cai et al, *J. Luminescence*, **231**, 117711 (2021).
4. R.A. Babunts et al., *Appl. Magn. Reson.*, **51**, 1125–1143 (2020).

И.С. Белоконь (студ., 1 курс маг., ННГУ, ФПЭН),
 А.В. Кудрин (д.ф.-м.н., проф., ННГУ, ФПЭН), А.А. Скрылев (асп., 2 год, ННГУ, ФПЭН),
 А.В. Нежданов (к.ф.-м.н., доц., ННГУ, ФПЭН), А.И. Машин (д.ф.-м.н., проф., ННГУ)

ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА НОСИТЕЛЕЙ В ПЛЁНКАХ ZnSnN₂

Нитрид цинка и олова является перспективным материалом для создания солнечных ячеек за счёт высокого показателя поглощения (около 10^5 см^{-1}) и ширины запрещённой зоны в 1.4 эВ, которая позволит достичнуть максимального КПД однокаскадного устройства в 33 % по теории Шокли-Квайссера [1, 2]. Главное препятствие на пути к массовому применению данного соединения в промышленности – это трудность получения невырожденных и структурно упорядоченных образцов с высокой подвижностью носителей [3, 4]. В готовых разупорядоченных плёнках наблюдается отрицательное магнитосопротивление, представленное в данной работе.

При изучении эффекта Холла в плёнках ZnSnN₂ при температурах 6–70 К было обнаружено отрицательное магнитосопротивление, имеющее нетривиальную температурную зависимость (рис. 1, а). Для описания явления была применена теория

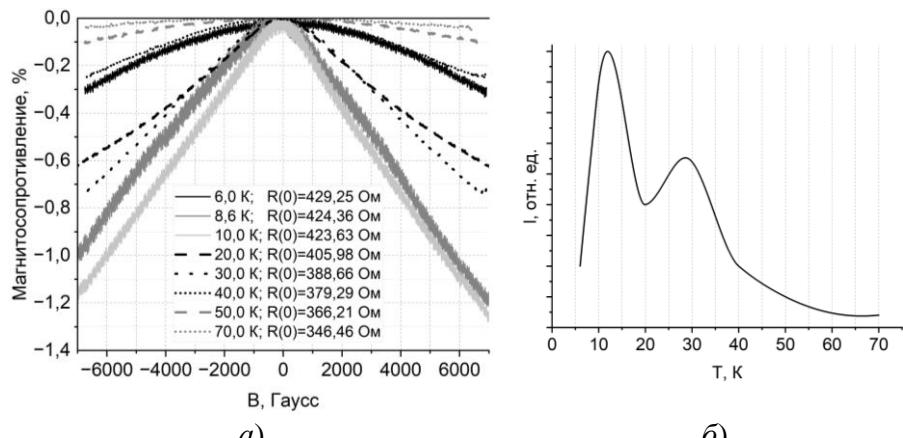


Рис. 1. Магнитосопротивление (а) и температурная зависимость длины свободного пробега носителей заряда (б)

слабой локализации [5], согласно которой интерференционный вклад разрушается в поле $B = \hbar c / el^2$, где \hbar , c , e – мировые константы, l – длина свободного пробега. Из этой формулы можно оценить качественно вид температурной зависимости длины свободного пробега носителей заряда (рис. 1, б).

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства "Приоритет 2030" Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

1. W. Shockley et al., *J. Appl. Phys.*, **32**, 510–519 (1961).
2. И.С. Белоконь и др., Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника: тез. докл. Всерос. научн. молод. конф. – Санкт-Петербург, 2024 – с. 21.
3. A. Nezhdanov et al., *Opt. Mat.*, **144**, 114335 (2023).
4. A. Skrylev et al., *Opt. Mat.*, **156**, 116035 (2024).
5. В.Ф. Гантмахер, Электроны в неупорядоченных средах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 232 с.

ТОНКАЯ СТРУКТУРА И СПИНОВАЯ ДИНАМИКА ЭКСИТОНОВ
В ПЕРОВСКИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В настоящее время галогенидные перовскиты привлекают значительное внимание благодаря своему возможному применению в оптоэлектронике, фотовольтаике и спинtronике. Относительно недорогой и быстрый синтез перовскитов позволяет получать разнообразные структуры, включая объемные кристаллы, двумерные слои и нанокристаллы [1, 2]. Оптические свойства перовскитных полупроводников в значительной степени определяются экситонными эффектами.

В данной работе исследовалась динамика экситонных спинов в объемных кристаллах галогенидного перовскита с кубической, тетрагональной и орторомбической симметрией. Мы разработали теоретическую модель, описывающую эволюцию спиновых состояний экситона в магнитном поле с учетом обменного взаимодействия между электроном и дыркой после возбуждения короткими импульсами поляризованного света. В зависимости от ориентации магнитного поля относительно направления распространения света, экситон демонстрирует качественно различную спиновую динамику, которую можно наблюдать в кинетике поляризованной фотолюминесценции. В продольном магнитном поле теория предсказывает квантовые биения состояний светлого экситона при линейно поляризованном возбуждении и детектировании, при этом темный экситон остается оптически неактивным. Напротив, в поперечных полях все спиновые подуровни экситонов становятся оптически активными, что приводит к многокомпонентным осцилляциям степени линейной поляризации излучаемого света. Анализ показывает, что выбор определенных поляризаций возбуждения и регистрации позволяет упростить сложную картину биений до осцилляций, обусловленных либо разностью, либо суммой ларморовских частот электронов и дырок. Это возможно, если возбуждение циркулярно поляризовано, а регистрируются компоненты, линейно поляризованные вдоль или перпендикулярно направлению магнитного поля.

Сравнение модельных расчетов и экспериментальных данных по кинетике поляризованной фотолюминесценции экситонов в галогенидных перовскитах позволяет определить величины g-факторов и обменного взаимодействия, а также оценить их анизотропию, вызванную снижением симметрии кристалла.

1. Halide Perovskites for Photonics, eds. A. Vinattieri and G. Giorgi. – AIP Publishing, Melville, New York, 2021.
2. Halide Perovskites for Generation, Manipulation and Detection of Light, eds. J.P. Martinez-Pastor, P.P. Boix, G. Xing. – Elsevier, 2023.

И.Д. Исаков (студ., 2 курс маг., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. ЭПУ),
Е.М. Вербицкая, И.В. Еремин, Н.Н. Фадеева, В.К. Еремин
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, отд. ОТЭ)

ВРЕМЯ ЖИЗНИ ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК В ЧИСТОМ Si ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 40 мК

Болометрические детекторы (БД) излучений, в которых сигналом является изменение температуры их полупроводникового чувствительного элемента (ЧЭ) за счет выделения в нем энергии зарегистрированной частицы, вызывают возрастающий интерес в связи с уникально высокой чувствительностью. Она обеспечивается за счет падения теплоемкости твердотельного ЧЭ как $1/T^3$, использования термисторов на эффекте сверхпроводимости и эффекта Джоуля–Ленца для усиления теплового воздействия частицы на ЧЭ. Разработки БД инициируются задачами поиска частиц темной материи (коллаборация CDMS [1]) и измерения электромагнитных характеристик нейтрино (программа №8 НЦФМ) с помощью кремниевого БД массой более 10 кг, работающего при температуре в десятки мК [2].

Реализация внутреннего теплового усиления основана на использовании дрейфа неравновесных электронов и дырок, созданных частицей, для генерации дополнительной тепловой энергии в ЧЭ, равной $\Delta E = Q_n(t) \cdot \Delta V_n + Q_p(t) \cdot \Delta V_p$, где $Q_n(t)$, $Q_p(t)$ и ΔV_n , ΔV_p – заряды неравновесных электронов и дырок, зависящие от времени t , и доли приложенного к ЧЭ напряжения V . Так, при дрейфе компонент e-h пары ΔE может быть увеличена в сотни раз. Максимальный эффект усиления достигается при неизменности Q_n и Q_p в процессе дрейфа, т.е. в отсутствии захвата носителей при температуре ниже 100 мК, что в настоящее время не имеет экспериментального подтверждения.

Представленные в докладе результаты по захвату носителей заряда при температуре 40 мК получены из наблюдений фотоотклика кремниевого диода со структурой $p^+ - i - n^+$ и толщиной 3 мм на лазерный импульс с длиной волны 670 нм и длительностью 47 пс. Сравнительный анализ формы сигналов при облучении светом каждого из контактов позволил установить доминирующий захват электронов. Так, импульс, возникающий при дрейфе пакета электронов, содержит участок, показывающий динамику уменьшения заряда в дрейфующем пакете с постоянной времени $\tau = 3.5 \cdot 10^{-7}$ с, что на 4 порядка меньше, чем характерное значение времени захвата носителей при комнатной температуре. Захват дырок характеризуется на порядок большей величиной τ и не критичен для работы БД.

Результат получен впервые, и его практическая значимость, учитывая, что время дрейфа неравновесных носителей в БД с планируемой толщиной в несколько см может составить единицы мкс, требует физического осмысливания процесса захвата носителей в объемном кремнии, в том числе и на уровнях мелких доноров и акцепторов, и величины теплового усиления БД в целом.

1. M.F. Albakry et al., *Phys. Rev. D*, **111**, 012006 (2025).

2. А.А. Юхимчук и др., *ФИЗМАТ*, **1**(1), 5 (2023).

ИНДУЦИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ АНИЗОТРОПИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ И ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В *n*-InSb

Электрооптические эффекты широко используются для модуляции электромагнитного излучения. В связи с бурным развитием терагерцовой (ТГц) оптоэлектроники и фотоники, актуальным является их исследование в этой области спектра. Цель данной работы – исследовать анизотропию поглощения и преломления ТГц излучения, возникающую в оптически изотропном полупроводнике при воздействии электрического поля.

Объектом исследования являются монокристаллы антимонида индия, легированные донорами. В эксперименте непосредственно измеряется модуляция оптического пропускания образца при воздействии импульсов электрического поля. Микроскопический механизм наблюдаемой модуляции можно связать с индуцированным полем изменением вклада свободных электронов в диэлектрическую проницаемость *n*-InSb. Этот полупроводник имеет непараболическую зону проводимости. Воздействие электрического поля в этом случае сопровождается изменением диэлектрической проницаемости, которое различно для излучения с поляризацией вдоль поля (необыкновенная волна) и перпендикулярно ему (обыкновенная волна). Ранее такой эффект экспериментально наблюдался в *n*-InSb в среднем ИК диапазоне ($\lambda = 10.6$ мкм) [1]. В [1] длина волны была существенно меньше плазменной длины волны, поглощение излучения на свободных электронах было пренебрежимо мало, и эффект целиком сводился к изменению показателя преломления, различному для обыкновенной и необыкновенной волн.

В данной работе эксперименты проведены в ТГц диапазоне. Длина волны излучения на порядок больше ($\lambda = 118.8$ мкм), и она близка к плазменной длине волны для исследуемых образцов с концентрацией электронов $5.4 \cdot 10^{15}$ см⁻³. В этом случае ситуация более сложная: имеется заметное поглощение на свободных электронах, и модуляция пропускания образца связана с двумя факторами – с изменением показателя преломления и с изменением коэффициента поглощения (которое также различно для обыкновенной и необыкновенной волн). Эксперимент проводился в допробойных электрических полях, были получены полевые зависимости модуляции пропускания для двух взаимно ортогональных линейных поляризаций для образцов разной толщины. Анализ модуляционных кривых проводился с помощью функции Эйри, описывающей многолучевую интерференцию в образце. В результате были определены полевые зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения для обыкновенной и необыкновенной волн, а также найдена степень анизотропии.

Проведено сопоставление полученных экспериментальных результатов с модельными теоретическими расчетами, выполненными ранее.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-12-00036).
1. Л.Е. Воробьев и др., *ФТТ*, **18**(3), 513–518 (1984).

К.В. Лихачев (асп., 4 год, м.н.с., ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, отд. ФТТ),
М.М. Логинова (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»),
М.В. Учаев, Ю.А. Успенская, Р.А. Бабунц, П.Г. Баранов
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, отд. ФТТ)

**ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКАЯ ВЕКТОРНАЯ МАГНИТОМЕТРИЯ
НА ОСНОВЕ СПЕКТРОСКОПИИ АНТИПЕРЕСЕЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ
И ЯДЕРНЫХ УРОВНЕЙ В 4H-SiC**

Современные задачи магнитометрии в микроэлектронике и биомедицине требуют создания методов, сочетающих высокую чувствительность, высокое пространственное разрешение и возможность работы в электропроводящих средах. Перспективным решением является использование парамагнитных центров в карбиде кремния, позволяющих реализовать полностью оптическую магнитометрию без применения микроволнового излучения [1].

В представленной работе развит метод полностью оптической векторной магнитометрии, основанный на спектроскопии антипересечения электронных и ядерных спиновых уровней (LAC) в аксиальных вакансационных центрах с $S = 3/2$ в основном состоянии в 4H-SiC [2] при комнатной температуре. Сверхтонкое взаимодействие электронного спина центра с $S = 3/2$ с ядерным спином изотопа кремния ^{29}Si , расположенного во второй координационной сфере относительно вакансии кремния [3], приводит к появлению дополнительных особенностей в спектре, чувствительных не только к величине внешнего магнитного поля, но и к его ориентации относительно кристаллографической оси c .

Экспериментально продемонстрирована возможность измерения трёх компонент вектора магнитного поля с чувствительностью к продольной компоненте B_z лучше 0.1 мкТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Для определения полярного и азимутального углов разработана схема с использованием модифицирующих магнитных полей, сокращающая количество измерительных итераций. Чувствительность определения угловых параметров лучше 0.01 мТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

Предложенный метод открывает новые возможности для неинвазивной диагностики токов в интегральных схемах и высокочувствительных измерений слабых магнитных полей в биологических объектах.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-12-00152.

1. D. Simin et al., *Phys. Rev. Appl.*, **4**, 014009 (2015).
2. D. Simin et al., *Phys. Rev. X*, **6**, 031014 (2016).
3. К.В. Лихачев и др., *Письма в ЖЭТФ*, **119**, 82–88 (2024).

**ВЛИЯНИЕ КУЛОНОВСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ В ТЕРАГЕРЦОВОЙ ОБЛАСТИ ЧАСТОТ**

Проводимость неупорядоченных полупроводников (в частности, Si:P, Si:B) хорошо описывается степенной частотной зависимостью $\sigma(\omega) \sim \omega^s$ в широком диапазоне частот, где $s \lesssim 1$ (универсальность) [1]. Эта частотная зависимость указывает на прыжковый характер транспорта и часто связывается с прыжками электронов по локализованным состояниям с участием фононов (релаксационная проводимость). Зависимость, близкая к линейной, получается при низких частотах и в теории низкотемпературной бесфононной (резонансной) прыжковой проводимости при учете кулоновских корреляций. Универсальность зависимости $\sigma(\omega)$ затрудняет получение информации об особенностях механизма переноса. В связи с этим существенными становятся исследования особенностей поведения температурной зависимости высокочастотной проводимости неупорядоченных полупроводников. Теория бесфононной проводимости предсказывает переход (кроссовер) от почти линейной частотной зависимости к зависимости, близкой к квадратичной, в терагерцовой области частот. Проведенный в парном приближении расчет [2] показал, что кроссовер может быть связан с переходом от проводимости с переменной длиной прыжка r_ω к проводимости с постоянной длиной прыжка r_{opt} , когда основной вклад в проводимость вносят электронные переходы внутри пар с межцентровым расстоянием $r_{opt} \approx 3.5a$, где a – радиус локализации состояний.

Согласно теории, с понижением частоты выражения для низкотемпературной бесфононной и низкотемпературной релаксационной проводимости становятся одного вида, $\sigma(\omega) \sim r_\omega^3 \omega$; при этом для характерных значений параметров бесфононный вклад преобладает над релаксационным. В этом случае температурная зависимость высокочастотной проводимости с понижением температуры выходит на насыщение немонотонным образом вследствие разнонаправленности изменений релаксационного и резонансного вкладов в проводимость [3]. Так, с понижением температуры при фиксированной частоте вклад от релаксационной проводимости уменьшается ($\sigma \sim r_\omega^3 \omega$ при $e^2/k\tilde{r}_\omega > kT$ и $\sigma \sim kT \tilde{r}_\omega^4 \omega$ при $kT > e^2/k\tilde{r}_\omega, \hbar\omega$), в то время как вклад от бесфононной проводимости растет ($\sigma \sim r_\omega^3 \omega$ при $e^2/k\tilde{r}_\omega > \hbar\omega > kT$ и $\sigma \sim r_\omega^4 \omega^2$ при $kT > e^2/k\tilde{r}_\omega$), что обусловливается главной ролью кулоновского взаимодействия ($e^2/k\tilde{r}_\omega > \hbar\omega$) между электронами в парах, дающих вклад в бесфононную проводимость в области низких температур. Численный расчет температурной зависимости проводимости при заданной частоте показал, что с понижением температуры высокочастотная проводимость выходит на насыщение немонотонным образом [3].

1. E. Helgren, N. Armitage, G. Gruner, *Phys. Rev. B*, **69**, 014201 (2004).
2. М.А. Ормонт, И.П. Звягин, *ФТП*, **54**(1), 36 (2020).
3. М.А. Ормонт, А.А. Ляшенко, *ФТТ*, **67**(1), 14 (2025).

Д.А. Семенов (студ., 3 курс бак., ИТМО),
Е.В. Сапожникова (асп., 4 год, ИТМО, Сколтех),
Г.А. Верхоглядов (к.т.н., с.н.с., Сколтех),
А.П. Пушкарев (к.х.н., в.н.с., Сколтех)

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В КВАЗИДВУМЕРНЫХ ПЕРОВСКИТНЫХ КРИСТАЛЛАХ

В последнее время активным предметом исследования в области полупроводниковых материалов для оптоэлектроники и фотоники стали квазидвумерные перовскиты. В них перовскитные органо-неорганические слои с толщиной в несколько металл-галогенидных октаэдров чередуются с разделяющими их органическими катионами [1]. Ширина запрещенной зоны при этом может варьироваться не только путем настройки химического состава, но и за счет изменения числа слоев металл-галогенидных октаэдров n (фаза) в связи с квантово-размерными эффектами в таком материале [2]. Более того, в некоторых подобных структурах отсутствует центр симметрии кристалла, что открывает ряд возможностей их применения в области нелинейной оптики, в частности, возбуждении генерации второй гармоники (ГВГ) [3]. Однако на данный момент данное явление в квазидвумерных перовскитных кристаллах мало исследовано и не изучена стабильность спектров ГВГ во времени.

В данной работе перовскитные кристаллы состава $\text{PEA}_2\text{MAPb}_2\text{I}_7$ и метилированные $\text{MePEA}_2\text{MAPb}_2\text{I}_7$ были выращены новым методом, заключающимся в кристаллизации структур под давлением при температуре 60°C . На подложке были сформированы структуры с различными фазами. При возбуждении кристалла фемтосекундным лазером длиной волны 1045 нм и частотой импульсов 70 МГц в кристаллах была получена генерация второй гармоники на длине волны 523 нм. Были получены зависимости сигнала от интенсивности накачки, а также поляризационные зависимости спектров при вращении кристалла и изменении поляризации лазера. Также была исследована динамика спектров ГВГ во времени для разных составов.

Для структур состава $\text{MePEA}_2\text{MAPb}_2\text{I}_7$ была впервые получена генерация второй гармоники. Было установлено, что для метилированных структур спектры оказались более стабильными во времени.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 25-22-00278).

1. Y. Chen et al., *Adv. Mater.*, **30**, 1703487 (2018).
2. L.N. Quan et al., *Nano Lett.*, **17**, 3701–3709 (2017).
3. W.J. Wei et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **141**, 9134–9139 (2019).

В.А. Смирнова (асп., 3 год, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
 Г.Ф. Глинский (д.ф.-м.н., проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

НОВЫЙ ПОДХОД К МЕТОДУ ОГИБАЮЩИХ ВОЛНОВЫХ ФУНКЦИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Предлагается новый подход к анализу энергетических состояний и волновых функций носителей заряда в полупроводниках в присутствии внешнего поля $V(x)$ в рамках метода огибающих волновых функций. В отличии от общепринятого подхода [1, 2], когда при построении эффективного гамильтониана в \mathbf{k} -представлении в зонной структуре ограничиваются лишь квадратичными по \mathbf{k} членами вблизи соответствующих экстремумов (метод эффективной массы), в предлагаемом подходе полностью учитывается закон дисперсии $E_n(\mathbf{k})$ во всей зоне Бриллюэна. Это позволяет с единых позиций проводить анализ как локализованных состояний, так и состояний непрерывного спектра. Показано, что эффективный гамильтониан может быть представлен в двух унитарно эквивалентных \mathbf{k} и \mathbf{a} – представлениях, где \mathbf{k} нумерует состояния в зоне Бриллюэна, \mathbf{a} – элементарные ячейки в кристалле. При этом существенную роль в данном подходе играет условие периодичности в \mathbf{k} -пространстве матричного элемента $V(\mathbf{b} + \mathbf{k} - \mathbf{k}') = V(\mathbf{k} - \mathbf{k}')$, которое следует из свойства блоховских волновых функций, и не учитываемое в обычном подходе. Данный метод был использован для расчёта энергетического спектра и волновых функций электрона в кристалле в присутствии внешнего модельного локального поля. Данные, полученные в рамках предложенного метода, находятся в превосходном согласии с результатами точного численного решения уравнения Шредингера (рис. 1).

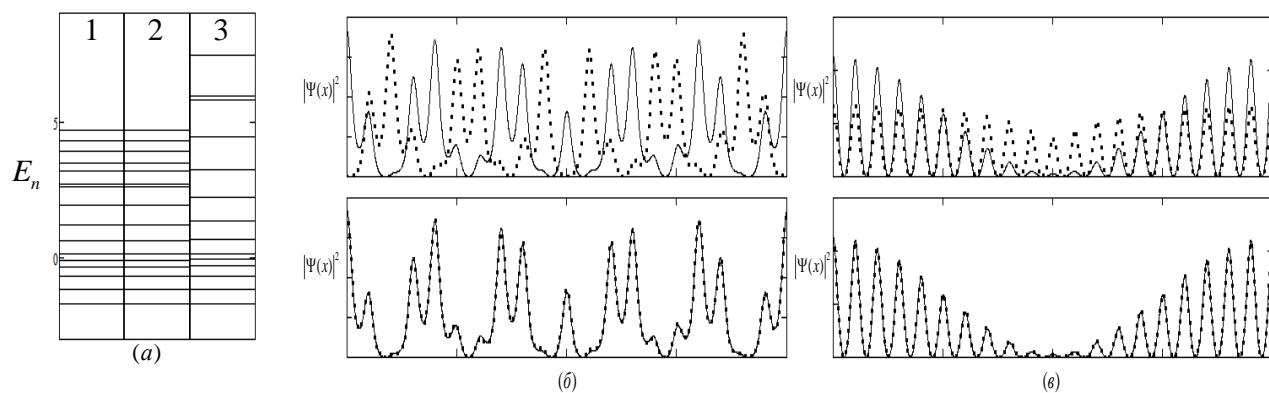


Рис. 1. (а) – энергетический спектр (1 – наш подход, 2 – точное решение, 3 – приближение эффективной массы), (б, в) – сравнение волновых функций с точным расчётом (сплошная линия) для двух состояний (нижний график – наш подход, верхний – приближение эффективной массы)

1. J.M. Luttinger, W. Kohn, *Phys. Rev.*, **97**, 869 (1955).
2. Л. Бир, Г.Е. Пикус. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. – М.: Наука, 1972. – 584 с.

Н.И. Шевага (студ., 3 курс бак., СПбГУ, кафедра фотоники),
Н.М. Киреев (студ., 4 курс бак., СПбГУ, кафедра фотоники),
А.Ю. Самсонова (асп., 4 год, СПбГУ, кафедра фотоники),
Ю.В. Петров (доцент, СПбГУ, кафедра ЭТТ),
Ю.В. Капитонов (д.ф.-м.н., доцент, СПбГУ)

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ДОМЕНОВ И ДОМЕННЫХ СТЕНОК ГАЛОГЕНИДНОГО ПЕРОВСКИТА MAPbCl₃ В НИЗКОСИММЕТРИЧНОЙ ФАЗЕ

Спектр фотолюминесценции MAPbCl₃ содержит три полосы: Е – люминесценция за счёт рекомбинации экситонов; D – люминесценция дефектов; Р – люминесценция сторонних включений. При этом полоса D – самая широкая в спектре [1]. Катодолюминесценция в качестве метода исследования кристаллов удобна тем, что позволяет получать детальные изображения поверхности в различных диапазонах энергий. Следовательно, с помощью неё можно сопоставить светящиеся объекты на поверхности кристалла со спектром излучения.

В настоящей работе исследовалась катодолюминесценция монокристаллов MAPbCl₃ в низкосимметричной фазе при температуре 70 К. На изображениях видно свечение доменов (в полосе Е) и доменных стенок (в полосе D), образующихся вследствие фазовых переходов с понижением симметрии кристалла. Сравнение изображений, полученных с помощью катодолюминесценции, и изображений, полученных с помощью вторичной электронной эмиссии, показывает независимость доменных стенок от рельефа поверхности. Интегральное по спектру свечение стенок ярче интегрального свечения доменов. Важным пунктом исследования стали температурные циклы, содержащие фазовый переход: они наглядно продемонстрировали доменную природу наблюдаемых стенок, так как их распределение после таких циклов заметно менялось. Также температурные циклы показали на поверхности кристалла дефекты, которые не претерпели никаких изменений и которые, следовательно, не порождены фазовыми переходами.

Исследование катодолюминесценции образцов MAPbCl₃ позволило наблюдать их доменную структуру и установить закономерности свечения доменов и доменных стенок.

1. A.Yu. Samsonova et al., *J. Phys. Chem. Lett.*, **15**, 9405–9410 (2024).

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПРОТОНАМИ НА GaAs СТРУКТУРЫ С ДЕЛЬТА-ЛЕГИРИЮЩИМИ СЛОЯМИ Fe

Структуры разбавленных магнитных полупроводников (РМП) на основе GaAs, дельта-легированного Fe, имеют более совершенную кристаллическую структуру, чем РМП полученные путём введения большого введения примеси Fe в GaAs [1]. В данной работе были получены структуры РМП на основе GaAs с тремя дельта-легирующими слоями Fe, имеющие различное значение толщины спейсерного слоя. Магнитные и транспортные свойства структур исследовались с помощью эффекта магнитного циркулярного дихроизма (МЦД), эффекта Холла и магнитосопротивления. Полученные структуры обладают собственными ферромагнитными свойствами, на что однозначно указывает наличие особенностей на спектральной зависимости эффекта МЦД (рис. 1, *a*). Структура с наилучшими магнитными свойствами была облучена протонами с энергией 40 кэВ и дозами (Q) $3 \cdot 10^{12}$ и $1 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$. Анализ свойств структуры до и после облучения проводился с помощью исследования аномального эффекта Холла (рис. 1, *б*). Появление радиационных дефектов в структуре после облучения не влияет на магнитные свойства структуры, так как зависимости аномального сопротивления Холла остаются практически неизменными после облучения. Отсутствие влияния облучения на магнитотранспортные свойства структуры показывает, что проводимость в структуре на основе GaAs с тремя дельта-легированными Fe слоями идёт по глубоким примесным состояниям железа, которые также обеспечивают возникновение ферромагнитного обменного взаимодействия.

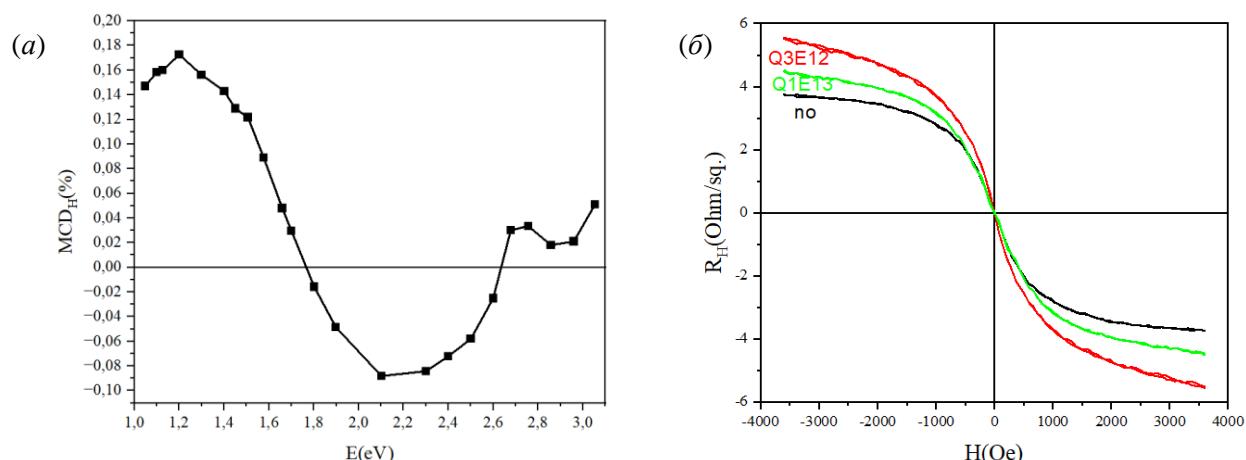


Рис. 1. (а) Спектральная зависимость эффекта МЦД. (б) Магнитополевые зависимости аномального сопротивления Холла до и после облучения протонами

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-22-00151, <https://rscf.ru/project/24-22-00151/>.

1. А.В. Кудрин и др., *ФТТ*, **66**, 1535 (2024).

ПРОЦЕССЫ РОСТА, ПОВЕРХНОСТЬ, ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА

УДК 548.736.442.6

Б.С. Будник (студ., 2 курс маг., БГУИР),
А.К. Тучковский (с.н.с., НИЧ БГУИР), И.А. Врублевский (к.т.н., доцент, БГУИР)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВВЕДЕНИЯ КАТИОНА ЭТИЛЕНДИАММОНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВЕТОПОГЛОЩЕНИЕ ПЕРОВСКИТА

Солнечные элементы на основе металлорганических перовскитов широко исследуются благодаря их высокой эффективности и относительно недорогому процессу изготовления. Для получения высококачественных тонких плёнок перовскита важным процессом является контролируемая кристаллизация, которая позволяет уменьшить количество структурных дефектов. Амины могут сильно координироваться с ионами свинца и поэтому имеют большие перспективы для управления ростом кристаллитов в пленке перовскита [1]. В настоящей работе представлены результаты изучения введения этилендиаммониевого катиона в металлорганический перовскит и его влияние на структуру и светопоглощение. Плёнки толщиной 0.8–1.0 мкм были получены центрифугированием (500 об/мин) с последующим отжигом при $T=100$ °C в течение 5 минут. Растворы прекурсора перовскита получали смешиванием $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ с PbI_2 (молярное соотношение 1:1) в диметилформамиде, дииодид этилендиаммония в концентрации 30 г/л добавляли в раствор при перемешивании. Оптические спектры снимались на спектрофотометре МС-122 в области длин волн (λ) 380–1000 нм. Морфология поверхности модифицированных пленок перовскита была исследована с помощью оптического микроскопа МКИ-2М (рис. 1).

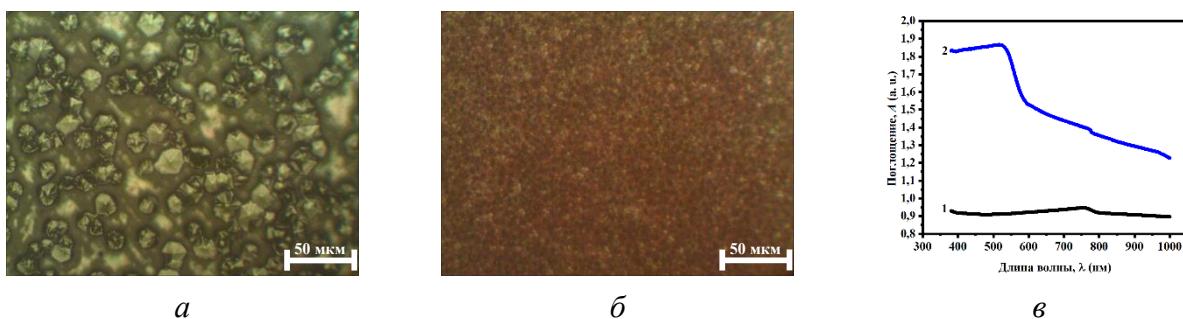


Рис. 1. Структура исходного (a) и модифицированного (б) перовскитного покрытия; спектры поглощения (в) перовскитов без добавок (1) и с введением катиона этилендиаммония (2)

Полученные результаты показали, что модификация металлоорганического перовскита при помощи высоких концентраций этилендиаммония дииода приводит к повышению качества покрытий за счёт создания сплошной зернистой структуры. Светопоглощение модифицированных перовскитных плёнок возрастает во всей области видимого спектра. Такие изменения структуры и катионного состава перовскитов благоприятно воздействуют на оптические свойства и эффективность перовскитных солнечных элементов.

1. J. Xie et al., *J. Energy Chem.*, **56**, 179–185 (2021).

А.Е. Гришин (асп., 3 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
А.Е. Маричев (к.ф.-м.н., зав. лаб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
В.В. Шамахов (н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
С.О. Слипченко (к.ф.-м.н., зав. лаб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
Н.А. Пихтин (к.ф.-м.н., зав. лаб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

**О РОЛИ ГЕОМЕТРИИ МАСКИ В ФОРМИРОВАНИИ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ РОСТА
ПРИ МОС-ГИДРИДНОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ ЭПИТАКСИИ GaAs**

Основой для создания фотонных интегральных схем служит технология монолитной интеграции активных компонентов, таких как лазеры, модуляторы и волноводы. При этом монолитная интеграция активных компонентов на общей подложке стала возможна благодаря стремительному развитию метода селективной эпитаксии, в котором характер осаждения крайне локализован и происходит лишь в окнах диэлектрической маски, что отличает данную технологию от классического планарного роста. Одним из ключевых факторов, определяющих результат осаждения, является геометрия маски/окна, которая напрямую влияет на распределение реагентов в газовой фазе. Процесс лимитируется газофазной диффузией прекурсоров к поверхности роста, в результате чего профиль скорости роста в окне маски может быть существенно неоднороден. Это явление известно как эффект повышения скорости роста (англ. Growth Rate Enhancement, GRE) и именно этой проблематике посвящена данная работа.

В рамках численного моделирования пространственного распределения скорости роста при МОС-гидридной селективной эпитаксии GaAs/GaAs на основе модели газофазной диффузии [1] исследовано влияние геометрии маски/окна на GRE. Под геометрией подразумевается форма маски/окна (квадрат, круг) и их линейных размеров (от 2 до 10 мкм). Установлено, что наименьшим перепадом GRE (между центром окна и его краем) и как следствием наибольшей однородностью обладает маска и окно в форме круга с равными длинами маски/окна 2 мкм. Обнаружилось, что для данной конфигурации изменение GRE составляет всего лишь 0.33 % и возрастает по мере увеличения длин маски и окна до 1.9 % при длинах маски/окна 10 мкм. Для случая квадратных маски и окна наблюдается явная необходимость изменения GRE в латеральном и диагональном направлениях. Так, в латеральном направлении изменение GRE составляет около 1.3%, а в диагональном – 1.9 % для конфигурации маска/окно 8 мкм. Для уменьшения этой необходимости GRE было предложено использовать маску в форме квадрата, повернутого относительно диагонали квадратного окна на 45°. Результаты такой конфигурации демонстрируют незначительное изменение GRE до 1.5 % и 1.8 % в центре и на краю прямоугольного окна соответственно для конфигурации маска/окно 10 мкм, однако наблюдалось стремительное падение GRE по величине относительно не повернутых квадратов в 1.5 раза.

1. N. Dupuis et al., *IEEE Proc.-Optoelectron.*, **153**, 276–279 (2006).

С.С. Замолоцких (студ., 2 курс маг., ИТМО, Новый Физтех),
Я.М. Бельтюков (к.ф.-м.н., зав. сектором, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
А.В. Родина (д.ф.-м.н., г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

ВЛИЯНИЕ НЕЛОКАЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ
НА ПОТЕНЦИАЛ САМОДЕЙСТВИЯ ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ
ПОЛУПРОВОДНИК/ДИЭЛЕКТРИК

Одной из давно известных, до сих пор не решенных проблем в теории твердого тела является точный учет влияния разницы диэлектрических проницаемостей ϵ_1 в полупроводнике и ϵ_2 в диэлектрике (или вакууме) на энергетический спектр, волновые функции и физически наблюдаемые величины, такие как коэффициент прохождения электрона через барьер. Потенциал $U(z)$ для электрона в гетероструктуре полупроводник/диэлектрик включает, наряду с кусочно-ступенчатым потенциалом, потенциал самодействия $U_{\text{self}}(z)$. Потенциал $U_{\text{self}}(z)$ пропорционален диэлектрическому контрасту $(\epsilon_1 - \epsilon_2)/(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ и имеет расходимость $1/z$ с обеих сторон от границы.

Однако данная расходимость не существует на масштабе отдельных атомов. Поэтому в литературе были предложены эмпирические методы регуляризации данной расходимости, заключающиеся в линейной интерполяции потенциала самодействия в интерфейсной области [1, 2] или в рассмотрении плавного изменения диэлектрической проницаемости на интерфейсе [3]. В данной работе, для изучения потенциала самодействия мы рассмотрели более реалистичную модель кристаллической решетки, где каждый атом представляет собой две распределенные по Гауссу плотности заряда с противоположными знаками $\rho_i(z) = q_i(2\pi\sigma_i^2)^{-3/2} \exp(-r^2/2\sigma_i^2)$. Учитывая их электростатическое взаимодействие друг с другом и с внесенным в систему точечным электроном, нам удалось получить потенциал самодействия в области контакта полупроводник/диэлектрик без сингулярностей.

Полученные результаты позволяют определить поверхностный параметр W обобщенных граничных условий, введенных в работе [4] для модели резкой границы двух непрерывных сред, а также рассмотреть границу сферических квантовых точек.

Работа поддержана грантом РНФ № 23-12-00300.

1. E.A. Muljarov, S.G. Tikhodeev, T. Ishihara, *Proc. SPIE*, **784**, 1985 (1993).
2. E.A. Muljarov, S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius, T. Ishihara, *Phys. Rev. B*, **51**, 14370 (1995).
3. F. Stern, *Phys. Rev. B*, **17**, 5009 (1978).

Д.А. Здоровейщев (асп., 1 год, ННГУ, лаб.-иссл., НИФТИ ННГУ),

Ю.А. Данилов (к.ф.-м.н., доцент, каф. ФПЭН ННГУ),

Ю.М. Кузнецов (к.ф.-м.н., доцент, каф. ФПЭН ННГУ, н.с., НИФТИ ННГУ)

ИОННО-ЛУЧЕВОЙ СИНТЕЗ И СВОЙСТВА СЛОЕВ GaAs:N И GaMnAs:N

В настоящее время ведутся поиски способов модификации свойств арсенида галлия, которые смогли бы расширить круг его применений в полупроводниковой электронике. Одним из таких способов может выступать легирование изовалентными мышьяку примесями, например, азотом. Введение азота в GaAs приводит к существенному изменению его свойств. Так, сообщается об уменьшении ширины запрещенной зоны при введении небольших концентраций азота [1], причем зависимость от состава сильно немонотонная, а изготовление качественных слоев GaN_xAs_{1-x} является непростой технологической задачей [2]. Также известно о влиянии азота на свойства разбавленного магнитного полупроводника GaMnAs – одного из перспективных материалов полупроводниковой спинtronики [3].

В данной работе экспериментальные структуры были получены с использованием двух методик. Первая методика включала импульсное лазерное нанесение (ИЛН) в вакууме структур GaMnAs/GaAs с последующей ионной имплантацией азота в этот слой. Вторая методика включала использование только метода ионной имплантации. Структуры GaAs:Mn, были получены путем облучения подложки i-GaAs ионами Mn. Затем образцы GaAs:Mn и i-GaAs дополнительно облучались азотом. Для устранения дефектов и электрической активации марганца структуры подвергались импульсному лазерному отжигу (ИЛО) импульсом эксимерного KrF-лазера с варьируемой плотностью энергии в импульсе. На полученных структурах исследовались магнитополевые зависимости эффекта Холла (ЭХ) и магнитосопротивления (МС) в диапазоне температур 7–300 К. Оптические свойства полученных структур исследованы с помощью спектроскопии пропускания и отражения. Проведен рентгеноструктурный анализ образцов GaAs:N.

В ходе работы было показано, что соединение GaMnAs:N, полученное обеими методиками, является ферромагнитным после ИЛО, демонстрируя аномальный ЭХ с петлей гистерезиса и отрицательное МС. Дополнительное легирование соединения GaMnAs азотом при ионной имплантации с последующей ИЛН позволяет повысить температуру Кюри этого соединения при использовании доз азота менее $(1-2)\cdot10^{15} \text{ см}^{-2}$. Метод ионной имплантации в сочетании с ИЛО позволяет формировать слои твердого раствора GaN_xAs_{1-x} , демонстрирующие высокое кристаллическое качество и низкую концентрацию остаточных дефектов, обеспечивающих слабую электронную проводимость.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 24-79-00065).

1. L. Bellaiche, S.-H. Wei, A. Zunger, *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 3558 (1997).
2. J.-D. Hecht et al., *J. Appl. Phys.*, **90**, 6066 (2001).
3. T. Manago, H. Akinaga, *Jap. J. Appl. Phys.*, **47**, 6297 (2008).

М.М. Куватов (асп., 1 год, МФТИ, МГУ им. М.В. Ломоносова),
А.Б. Логинов, Р.Р. Исмагилов, В.И. Клещ, А.Н. Чулков (МГУ им. М.В. Ломоносова),
П.А. Чижов, Е.Д. Образцова (МФТИ, ИОФ РАН им. А.М. Прохорова)

МЕХАНИЗМ РОСТА НАНОСТЕНОК И МЕЗОПОРИСТЫХ ПЛЕНОК MoS₂ И WS₂

Перспективы применения двумерных дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) в современной оптоэлектронике, катализе и сенсорике стимулируют разработку методов управляемого синтеза материалов со сложной архитектурой [1]. Особый интерес представляют мезопористые пленки, образованные наностенками, ориентированными перпендикулярно поверхности подложки. Развитая структура таких пленок приводит к значительной величине их удельной поверхности по сравнению с планарными аналогами (рис. 1). Однако механизм роста таких структур в процессе химического осаждения из газовой фазы (CVD) остается малоизученным, что затрудняет управление их морфологией и свойствами.

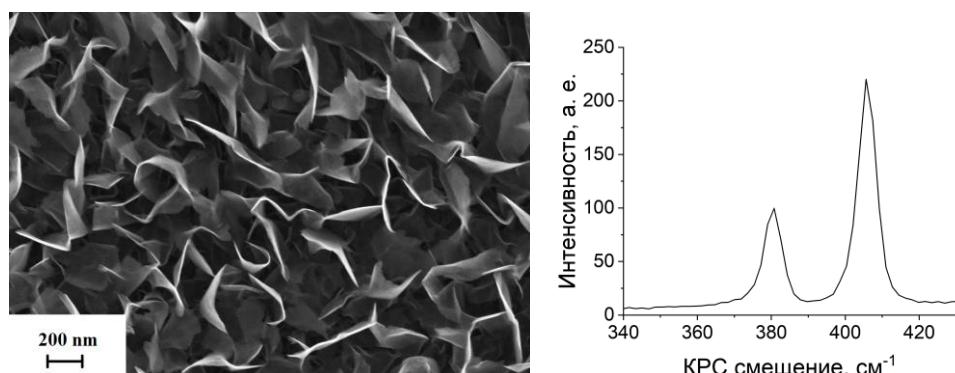


Рис. 1. (слева) РЭМ изображение вертикально ориентированных наностенок MoS₂ и (справа) их характерный КРС спектр

В настоящей работе методами сканирующей электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния света, а также измерений электрической проводимости проведено комплексное исследование роста мезопористых пленок MoS₂ и WS₂. Синтез осуществлялся в CVD-системе с использованием газообразного H₂S и термического испарения металлических нитей (Mo, W) [2].

В результате комплексного анализа экспериментальных данных выявлены основные стадии и предложен механизм формирования пленок и составляющих их наностенок. Установленные закономерности позволяют разработку практических методов для целенаправленного синтезаnanoструктурированных ДПМ-пленок с необходимыми для практических применений функциональными характеристиками.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-42-10001).

1. S. Manzeli, et al., *Nat. Rev. Mater.*, **2**, 17033 (2017).
2. А.Б. Логинов и др., *ЖЭТФ*, **165**, 3 (2024).

К.А. Легостаев (асп., 1 год, МИЭТ, ПМТ, ООО «НМ-Тех»),
М.В. Гулянов (асп., 1 год, МИЭТ, ИнЭл, ООО «НМ-Тех»),
В.В. Вороненков (к.ф.-м.н., ООО «НМ-Тех»),
Д.Г. Громов (д.т.н., проф., МИЭТ, ПМТ)

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЕЛЕКТИВНОГО ОСАЖДЕНИЯ Si

Селективной эпитаксией Si называется процесс выращивания кристаллического Si локально на предварительно заданных областях подложки. Данный процесс используется в производстве КМОП СБИС для заполнения сигма-образных областей истока/стока твердым раствором SiGe для создания сжимающих напряжений в области канала, что увеличивает подвижность дырок в канале, а также для формирования меза-структур. Известны многочисленные способы расчета распределения скорости роста в процессе селективной эпитаксии [1], однако в этих работах не приведены численные критерии оценки селективности процесса осаждения.

В настоящей работе представлена модель определения селективности в зависимости от рабочих параметров процесса осаждения: температуры, давления и состава газовой смеси. Данная модель основана на зависимости доминирующего механизма латерального транспорта от обратимости процесса адсорбции (рис. 1) [2]. В предельном случае пренебрежимо малой десорбции при столкновении прекурсора с поверхностью, атомы будут адсорбироваться необратимо, и единственным механизмом латерального транспорта атомов является поверхностная диффузия (рис. 1, а). В противоположном предельном случае потоки адсорбции и десорбции практически равны. Атом прекурсора, в этом случае, проходит несколько циклов последовательных актов адсорбции, поверхностной диффузии, десорбции и диффузии в газовой фазе, прежде чем стать частью растущего кристалла (рис. 1, б). Диффузия в газовой фазе вносит значительный вклад в латеральный транспорт, что является необходимым условием для селективного осаждения.

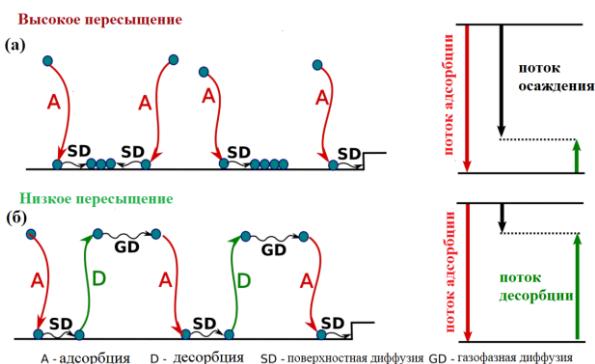


Рис. 1. Латеральный транспорт при предельно малой десорбции (а) и при равных потоках адсорбции и десорбции (б)

Анализ представленной модели был проведен на основе опубликованных экспериментальных данных по селективному эпитаксиальному росту Si для разных рабочих параметров и для разного состава химических систем. Результаты расчетов показали работоспособность представленной модели для определения селективности осаждения на основе имеющихся параметров процесса.

1. M.E. Coltrin, C.C. Mitchell, *J. Cryst. Growth*, **254**, 35–45 (2003).
2. V. Voronenkov et al., *Phys. Status Solidi*, **221**, 2300943 (2024).

Б.Е. Ремеле (асп., 1 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
М.В. Кузьмин (к.ф.-м.н., в.н.с., зав. лаб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

РОЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ В ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ Si(001) И Ge(001) С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ

Поверхности полупроводниковых кристаллов часто подвержены реконструкции, которая делает их атомную структуру отличной от объемной структуры. Для исследования многообразия поверхностных структур применяются самые разные методики, из которых одной из наиболее мощных является сканирующая тунNELьная микроскопия (СТМ), поскольку она позволяет наблюдать топографию образца с атомарным разрешением в прямом пространстве. Однако, несмотря на все потенциальные возможности СТМ, использование этого метода сопряжено с рядом проблем, одна из которых обусловлена тем, что получаемое изображение топографии поверхности определяется как геометрическими, так и электронными особенностями образца [1]. Последнее же приводит к тому, что для восстановления истинной атомной структуры поверхности необходима корректная интерпретация СТМ изображения, включая детальные сведения об электронном строении поверхностной реконструкции.

В данной работе исследовано влияние электронной структуры на вид СТМ изображений реконструкций $c(4\times 2)$ и $p(2\times 2)$ поверхностей Si(001) и Ge(001). С помощью DFT (метод функционала плотности) расчетов и моделирования были получены серии СТМ картин в зависимости от приложенного напряжения смещения. На полученных картинах было обнаружено, что положение ярких и темных пятен для одной и той же атомной конфигурации существенно зависит от приложенного напряжения. Так, при отрицательных напряжениях особенности на СТМ изображении совпадают с геометрическими особенностями поверхности: в области ярких пятен наблюдаются выступы (верхние атомы поверхностных димеров), а в области темных – углубления. При положительных же напряжениях изображения изменялись вплоть до полной инверсии, когда более темным областям СТМ изображений соответствовали выступы на поверхности (верхние атомы димеров), а более ярким – впадины (нижние атомы димеров). Полученные с помощью сканирующего тунNELьного микроскопа Scienta Omicron Fermi SPM при 12 К экспериментальные данные, а также результаты других работ [2] полностью согласуются с описанным выше. Анализ электронной структуры, полученной с помощью DFT, позволил объяснить наблюдаемое явление и связать его с особенностями плотности состояний поверхностных реконструкций.

1. J.A. Kubby, J.J. Boland, *Surf. Sci. Rep.*, **26**, 61–204 (1996).
2. M. Kuzmin et al., *Phys. Rev. B*, **98**, 155322 (2018).

ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ, СВЕРХРЕШЕТКИ, КВАНТОВЫЕ ЯМЫ

УДК 538.958

В.И. Войтович (студ., 1 курс маг., НИУ ВШЭ Санкт-Петербург),
П.Е. Копытов (асп., м.н.с., ИТМО),
И.С. Махов (к.ф.-м.н., с.н.с., НИУ ВШЭ Санкт-Петербург)

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ СВЕРХРЕШЕТОК InGaAs/InAlAs, ВЫРАЩЕННЫХ НА InP ПОДЛОЖКЕ

В настоящее время задача быстрой передачи данных на малые и сверхмалые расстояния с помощью света становится все более актуальной. Для ее решения необходима разработка миниатюрных лазеров, в частности вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) с длиной волны излучения 1.3–1.55 мкм, используемой в волоконно-оптической связи. Возможным решением, является спекание (бондинг) высококонтрастных брэгговских отражателей AlGaAs/GaAs, синтезированных на подложке GaAs, с длинноволновой активной областью на InP [1]. Короткопериодные сверхрешетки (КПСР) позволяют, по сравнению с квантовыми ямами, получить более высокое модальное усиление за счет большего значения фактора продольного оптического ограничения [2], что делает их перспективными для использования в ВИЛ.

Нами исследованы КПСР InGaAs/In(Al,Ga)As различного состава и сочетания толщин слоев, предназначенные для ВИЛ спектрального диапазона 1.3 мкм. Положение полосы фотолюминесценции (ФЛ), связанной с излучательной электрон-дырочной рекомбинацией в КПСР, хорошо согласуются с расчетными значениями и составляет около 1.2 мкм при 5 К и 1.3 мкм при 300 К. С ростом температуры наблюдается уширение линии ФЛ с ~14 до 70 нм, обусловленное размытием функции Ферми. Рост температуры также приводит к спаду интенсивности ФЛ; энергия активации оценена 31–35 мэВ и обусловлена, как мы полагаем, выбросом носителей заряда из КПСР в окружающую матрицу. Зависимость интегральной интенсивности ФЛ от уровня накачки описывается степенным коэффициентом ~1.6 при 300 К, что свидетельствует о конкуренции излучательной и безызлучательной рекомбинации. Исследование временной динамики ФЛ показали времена гашения около 1 нс. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что КПСР на основе тройных и четверных твердых растворов обладают схожими характеристиками, что позволяет использовать СР на основе только тройных твердых растворов InGaAs/InAlAs в качестве активной области ВИЛ взамен четверных, что приведет к упрощению технологического цикла.

Исследование выполнено при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ. Работа авторов из Университета ИТМО выполнена в рамках государственного задания (проект FSER-2025-0005) в части разработки конструкции и эпитаксиального роста гетероструктур.

1. A. Caliman et al., *Opt. Express*, **19**(18), 16996–17001 (2011).
2. L.Ya. Karachinsky et al., *Optics and Spectroscopy*, **127**(6), 1053–1056 (2019).

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННОГО РАССЕЯНИЯ В ПОДВЕШЕННОМ ДЭГ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ

Электрон-электронное (е-е) взаимодействие играет определяющую роль в баллистическом транспорте в двумерном электронном газе (ДЭГ), когда длина е-е рассеяния l_{ee} становится сравнимой с характерными размерами системы. Хотя е-е рассеяние не влияет на обычные измерения сопротивления, сохраняя общий импульс электронной системы, оно эффективно разрушает когерентные баллистические траектории. Это особенно важно в чистых системах, где рассеяние на примесях пренебрежимо мало. Экспериментально влияние е-е рассеяния наиболее заметно проявляется в подавлении пиков нелокального магнетосопротивления в эффекте магнитной фокусировки. Амплитуда пиков экспоненциально спадает с температурой по закону $\exp(-\alpha l/l_{ee})$ [1, 2], где l – длина резонансной траектории, α – геометрический фактор, учитывающий вероятность рассеяния на малые углы. Таким образом, анализ температурного подавления фокусировочных пиков позволяет непосредственно извлечь l_{ee} и её температурную зависимость.

Особый интерес представляют подвешенные структуры, которые создаются путем селективного травления жертвенного слоя между исследуемой структурой и подложкой. Теоретические предсказания указывают на усиление е-е взаимодействия в таких системах из-за уменьшения эффективной диэлектрической проницаемости окружающей среды [3]. Однако до настоящего времени количественные экспериментальные сравнения е-е взаимодействия в подвешенных и неподвешенных структурах отсутствовали.

В настоящей работе были изучены серии магнетополевых зависимостей нелокального сопротивления в холловских микромостиках на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs с ДЭГ, измеренные в широком температурном диапазоне. Измерения на различных образцах показывают, что вклад малоуглового рассеяния в значительной степени зависит от длины фокусировочной траектории и ширины детектирующего контакта. Мы предлагаем феноменологическую модель, параметризующую эту зависимость с учетом углового размера детектирующего контакта. Сравнительный анализ выявил заметное уменьшение эффективной диэлектрической проницаемости в 1.5 раза в результате подвешивания, что количественно подтверждает усиление е-е взаимодействия. Полученные результаты существенно уточняют модель, описывающую подавление пиков, и предоставляют прямые экспериментальные доказательства усиления е-е взаимодействия в подвешенных структурах.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 22-12-00343-П).

1. D. Egorov et al., *Appl. Phys. Lett.*, **125**, 112103 (2024).
2. D. Egorov et al., *J. Appl. Phys.*, **138**, 115701 (2025).
3. G. Giuliani et al., *Phys. Rev. B*, **26**, 4421 (1982).

А.А. Иванов (асп., 4 год, м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
В.В. Чалдышев (д.ф.-м.н., г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

ОПТИЧЕСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ ОТ РЕЗОНАНСНЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР ИЗ СДВОЕННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМ В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СВЕРХЪЯЧЕЙКЕ

В резонансных брэгговских структурах (РБС) период выбирается таким образом, чтобы условие брэгговской дифракции выполнялось на длине волны экситонов в квантовых ямах (КЯ). Это приводит к формированию сверхизлучательной экситон-поляритонной моды, сила осциллятора и радиационное затухание которой в N раз больше по сравнению с одиночной КЯ [1]. В работе [2] мы показали, что увеличение резонансных характеристик путем безграничного увеличения числа периодов РБС оказывается невозможным из-за трансформации одиночной сверхизлучающей моды в многомодовый спектр. Избежать этого нежелательного эффекта можно путем создания РБС с двумя близкорасположенными КЯ в периодической сверхъячейке. Такие РБС были теоретически рассмотрены в [3].

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование формирования сверхизлучательной оптической моды в спектрах отражения от РБС из сдвоенных КЯ InGaN, разделенных барьерами GaN, и РБС из сдвоенных КЯ GaN, разделенных барьерами AlGaN. Большая энергия связи и сила осциллятора экситонов в КЯ на основе III-N позволяют наблюдать резонансный экситонный отклик от РБС при температуре вплоть до комнатной. Образцы выращивались методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) на подложках из сапфира (0001). Численное моделирование оптических свойств РБС было выполнено с применением метода матриц переноса.

Мы показываем, что формирование сверхизлучающей моды в РБС со сдвоенными КЯ на основе III-N приводит к существенному увеличению оптического отражения при комнатной температуре. Также экспериментально подтверждаем, что применение сложной сверхъячейки в РБС с большим числом периодов (от 60 и выше) позволяет избежать переключения в многомодовый режим. Реализация структур со сдвоенными КЯ приводит к росту параметра радиационного затухания экситона до 0.30 ± 0.02 мэВ в РБС из $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}/\text{GaN}$ КЯ [4] и до 0.50 ± 0.02 мэВ в РБС из $\text{GaN}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ КЯ. Параметр нерадиационного затухания экситона составляет 40 ± 5 мэВ при комнатной температуре. Это увеличение обусловлено изменением встроенных электрических полей в периодической сверхъячейке, которое мы подтверждаем квантово-механическими расчетами.

Нами экспериментально получен рекордный резонансный оптический отклик от системы квазидвумерных экситонов в РБС при комнатной температуре.

1. Е.Л. Ивченко и др., *ФТТ*, **36**, 2118 (1994).
2. А.А. Иванов и др., *ФТП*, **58**, 594 (2024).
3. E.L. Ivchenko et al., *Phys. Rev. B*, **70**, 195106 (2004).
4. A.A. Ivanov et al., *Appl. Phys. Lett.*, **125**, 191105 (2024).

Я.Д. Кириленко (асп., 1 год, Университет ИТМО, институт ПСПД),
 К.Д. Мынбаев (Университет ИТМО, институт ПСПД),
 В.В. Романов, Н.Л. Баженов, К.Д. Моисеев (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ InAs/InAsSb/InAsSbP

Гетероструктуры (ГС) с рабочим слоем из твердого раствора $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$, изменением содержания Sb в котором можно охватить спектральный диапазон от 3.4 до 11.0 мкм, широко применяются в оптоэлектронных устройствах, работающих в инфракрасном диапазоне длин волн. Приборы на основе этих ГС используются в спектроскопии газов, системах мониторинга состояния окружающей среды и обеспечения безопасности в промышленности, а также в медицинской диагностике. Эффективная работа таких приборов при температурах, близких к комнатной ($T \approx 25^\circ\text{C}$), однако, затруднена преобладанием безызлучательной рекомбинации носителей заряда над излучательной. Потому актуальность исследования процессов рекомбинации, в частности, их влияния на спектральные свойства ГС при варьировании дизайна и состава ГС, температуры их работы и т.д., сохраняется. В целях определения этого влияния нами были проведены комплексные исследования электролюминесценции (ЭЛ) ГС $n\text{-InAs}/n\text{-InAs}_{1-y}\text{Sb}_y/p\text{-InAsSbP}$ с y от 0.06 до 0.12, выращенных методом газофазной эпитаксии с использованием металлоганических соединений. Эксперименты проводились в широком диапазоне температур (4.2–300 К) и приложенных к ГС напряжений – как в прямом, так и в обратном направлении.

Анализ спектров ЭЛ ГС при низких ($T < 150$ К) температурах и прямом смещении показал наличие двух полос излучения: высокоэнергетической (ВЭ), обусловленной примесной излучательной рекомбинацией в подложке из InAs, и низкоэнергетической (НЭ), связанной с интерфейсными излучательными переходами на гетерогранице тройного и четверного твердых растворов. С увеличением тока накачки интенсивность НЭ полосы относительно таковой ВЭ полосы падала, т.е. имела место «перекачка» носителей из одной области ГС в другую. При повышении температуры до ~ 150 К ВЭ полоса исчезала, а канал интерфейсной рекомбинации на гетерогранице InAsSb/InAsSbP сменялся каналом примесной в рабочем слое из InAsSb; при дальнейшем повышении температуры доминировала межзонная рекомбинация в этом слое. Исследования ЭЛ при обратном смещении вплоть до пробоя ГС показали, что зонная структура гетероперехода InAsSb/InAsSbP не была связана с подаваемым напряжением, а обусловлена технологией его изготовления.

Особенности ЭЛ ГС были сопоставлены с их расчетными зонными диаграммами на примере структуры с $y = 0.09$ при смещениях +0.01, +0.35 и -0.22 В; было получено хорошее согласие расчетных данных и эксперимента. Результаты работы показывают широкие возможности управления длиной волны в ГС InAs/InAsSb/InAsSbP, а наличие двух каналов излучательной рекомбинации может быть интересным с точки зрения перспектив реализации светодиодов, излучающих на опорной и рабочей длинах волн с использованием одной ГС.

О.Е. Лакунцова (асп., 2 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ЦФН),
С.В. Сорокин (к.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ЦФН)

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАМОРФНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С КТ InAs/InGaAs,
ВЫРАЩИВАЕМЫХ НА ПОДЛОЖКАХ GaAs(001)

Эффективные источники одиночных фотонов, излучающие в телекоммуникационном С-диапазоне ($\lambda \approx 1.55$ мкм) длин волн, востребованы для использования в системах квантового распределения с возможностью передачи квантовой информации на большие расстояния. Один из вариантов реализации такого источника основан на использовании метаморфных эпитаксиальных гетероструктур с квантовыми точками (КТ) InAs/InGaAs. При выборе геометрических параметров (профиль изменения состава, величина начальной ступени, максимальное содержание In) и условий роста метаморфного буферного слоя (МБС) требуется достижение компромисса между суммарной толщиной МБС, морфологией поверхности и плотностью прорастающих дислокаций в гетероструктуре с МБС. В данной работе гетероструктуры с КТ и МБС $In_xGa_{1-x}As$ были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs(001) [1]. Были исследованы гетероструктуры с линейным и корневым («convex») профилем изменения состава при вариации содержания In от $x_{\min} = 0.05$ –0.18 до $x_{\max} = 0.38$ –0.44. Для структурной характеризации применялись методы рентгеновской дифрактометрии (РД), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Анализ изображений, полученных методом ПЭМ в геометрии поперечного сечения, показал, что плотность прорастающих дислокаций в структурах с толщиной градиентного слоя $d = 0.6$ –1.1 мкм составляет $\rho_{\text{TD}} \sim 10^6 \text{ см}^{-2}$, в то время как для структуры с тонким МБС $d \sim 220$ нм ρ_{TD} по крайней мере на порядок величины больше, что согласуется с существенно большей средней скоростью изменения состава по In в последнем случае ($\sim 100\%$ In/мкм). Сетка дислокаций несоответствия в последнем случае смешена в сторону интерфейса с GaAs, что связано с более эффективной релаксацией на начальных этапах роста МБС $In_xGa_{1-x}As$. Для всех исследованных структур часть дислокаций из МБС проникает в буферный слой GaAs. При использовании метода ЭДС продемонстрировано хорошее соответствие изменения содержания In по толщине МБС $In_xGa_{1-x}As$ технологически заданному профилю. Также наблюдается хорошее согласование полученных из измеренных профилей значений x_{\min} и x_{\max} с данными измерений методами оптической спектроскопии. Методом АСМ выполнены исследования поверхности гетероструктур с МБС, характеризуемых перекрестно-штриховой («cross-hatch») морфологией. В работе также будут представлены результаты измерений структур с МБС $In_xGa_{1-x}As/GaAs(001)$ методом картирования обратного пространства в РД.

1. S.V. Sorokin et al., *JETP Lett.*, **120**, 668–674 (2024).

Т.И. Мусин (студ., 3 курс бак., СПбГУ, каф. фотоники),
 Р.С. Назаров (асп., 3 год, СПбГУ, каф. фотоники),
 Ю.В. Капитонов (д.ф.-м.н., доц., СПбГУ, каф. фотоники)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЛЕГКОДЫРОЧНЫХ
 И ТЯЖЕЛОДЫРОЧНЫХ ЭКСИТОНОВ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ GaAs/AlGaAs
 С МАЛЫМ ПРОЦЕНТОМ АЛЮМИНИЯ

Антистоксова фотолюминесценция (АСФЛ) может стать ключом к лазерному охлаждению в гетероструктурах GaAs/Al_xGa_{1-x}As: оптическое возбуждение тяжелодырочного (НН) экситона и поглощение им энергии фонона приводит к возникновению легкодырочного (LH) экситона и его излучательной рекомбинации. В широко изученных квантовых ямах с $x = 0.3$ наблюдение АСФЛ не представлялось возможным, так как для этого нужен фонон с энергией, равной расщеплению между НН и LH экситонами, а она больше энергии связи экситонов [1].

В настоящей работе был создан образец с $x = 0.03$, который был исследован методом фотолюминесценции (ФЛ) при температурах от 3.5 до 30 К. Использовался непрерывный лазер с энергией 2.3 эВ мощностью 0.5 мВт, сфокусированный в пятно размером 10 мкм. Из спектров ФЛ (рис. 1, *a*) было определено положение резонансов НН и LH экситонов, расщепление составило $\Delta E = 4.6$ мэВ. Аппроксимация температурной зависимости амплитуды резонансов НН и LH экситонов формулой Аррениуса позволила определить энергию активации экситонов, которая составила $E_a = 4.4$ мэВ (рис. 1, *б*). Полученные результаты позволяют ожидать АСФЛ в этой КЯ, что мотивирует дальнейшее исследование лазерного охлаждения.

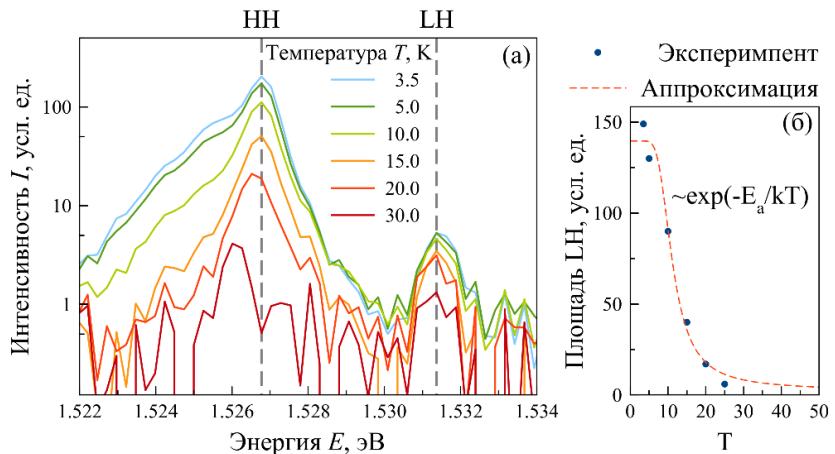


Рис. 1. (а) Спектры ФЛ при непрерывном возбуждении с энергией 2.3 эВ. (б) Площадь под резонансом LH в зависимости от температуры; красный пунктир – аппроксимация по модели Аррениуса

Работа выполнена на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ «Нанофотоника» за счет гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда № 25-12-20007.
 1. Y. Fu, K.A. Chao, *Phys. Rev. B*, **43**, 12626 (1991).

УВЕЛИЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ХРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ТЁМНЫХ ЭКСИТОНОВ, ОБНАРУЖЕННОЕ МЕТОДОМ ФОТОННОГО ЭХА

Одной из ключевых задач в области оптической обработки информации является увеличение времени хранения когерентности. Мы демонстрируем протокол спин-зависимого трёхимпульсного стимулированного фотонного эха (СФЭ), позволяющий переводить оптическую когерентность экситонов в долгоживущие тёмные состояния в одиночной InGaAs/GaAs квантовой яме при приложении слабого поперечного магнитного поля.

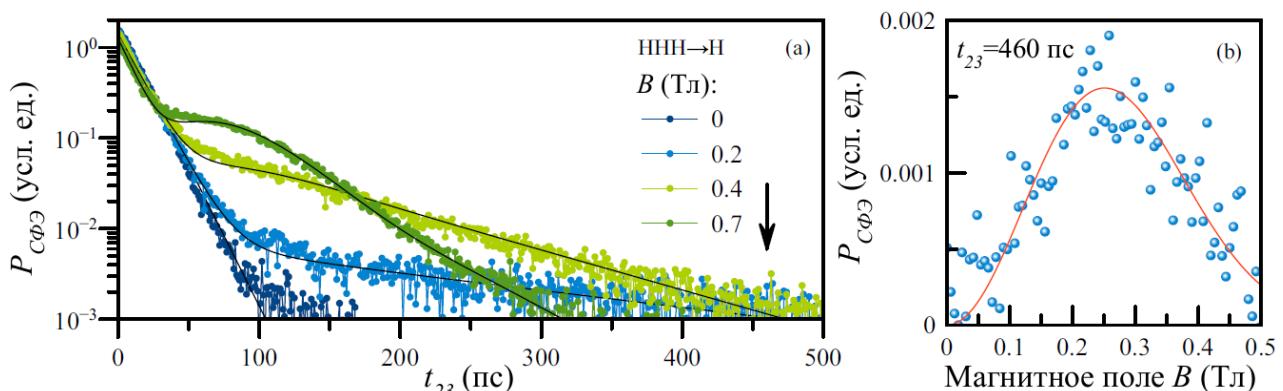


Рис. 1. (a) Кинетики амплитуды СФЭ в зависимости от задержки между возбуждающими импульсами t_{23} в магнитных полях разной величины (точки – эксперимент, линии – модель), виден длинноживущий «хвост» при $B > 0$ (полулогарифмический масштаб). (b) Амплитуда СФЭ в зависимости от поля при фиксированном $t_{23} = 460$ пс; максимум около $B \approx 0.25$ Тл соответствует оптимальному переводу когерентности в тёмные состояния

В настоящей работе с помощью времязадеяющего четырёхволнового смешения при $T \approx 1.5$ К продемонстрирован переход от экспоненциального падения амплитуды СФЭ в отсутствии поля к долгоживущему режиму и осцилляциям при приложении поля в геометрии Фойгта (рис. 1). В отсутствии поля время жизни светлого экситона составило $T_1^b \approx 15 \pm 1$ пс; в оптимальном слабом поле ($B \approx 0.25$ Тл) максимум долгоживущего отклика соответствует времени жизни тёмного экситона $T_1^d \approx 170 \pm 30$ пс, что на порядок больше T_1^b . Протокол универсален и масштабируем к системам с ещё большей T_1^d (например, квантовые точки).

Работа выполнена на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ «Нанофотоника».

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ InGaAs/GaAs ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ

В соединениях центров обработки данных широко используются модуляторы по схеме Маха–Цендера [1] (ММЦ), при этом ММЦ предназначен для модуляции как синфазной, так и квадратурной компоненты сигнала. Принцип действия этого устройства основан на вариации коэффициента преломления под воздействием электрического поля на телекоммуникационной длине волны (1.55 мкм). К преимуществам применения подобных модуляторов следует отнести высокое быстродействие (до 40 ГГц и выше), возможность компенсации уширения волнового пакета во времени, возможность реализации схем квадратурной оптической модуляции (QPSK, DP-QPSK, QAM). Принцип действия этого устройства основан на вариации коэффициента преломления под воздействием электрического поля, обусловленной квантово-размерным эффектом Штарка. Оптимальный дизайн такого прибора должен обеспечивать заметное изменение показателя преломления на телекоммуникационной длине волны при минимальном поглощении.

В настоящей работе проведено теоретическое исследование поглощения и изменения показателя преломления для нескольких различных дизайнов гетероструктур под действием внешнего электрического поля. Численным методом на основе конечных разностей было решено уравнение Шредингера, получены энергии размерного квантования и огибающие волновых функций. На основе рассчитанных энергий размерного квантования и огибающих волновых функций были получены спектры коэффициента поглощения как результат сложения межзонного и экситонного вкладов поглощения [2]. Расчет энергии связи и боровского радиуса экситона проведен вариационным методом. Используя смоделированные спектры поглощения в достаточно широком диапазоне длин волн, с помощью соотношений Крамерса–Кронига [3] вычислены спектры изменения показателя преломления под действием различных электрических полей на длине волны 1550 нм.

Заметное изменение показателя преломления в требуемом диапазоне длин волн (1.55 мкм) позволяет использовать данные гетероструктуры в качестве активной среды для оптических интегральных схем.

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023-2025».

1. J. Frigerio, et al., *AIP Advances*, **11**, 03511 (2020).
2. V.V. Zolotarev et al., *Semicond. Sci. Technol.*, **11**, 095005 (2019).
3. В.Б. Тимофеев, Оптическая спектроскопия объемных полупроводников и наноструктур: учебн. пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2014.

М.С. Ружевич (инж., Университет ИТМО, факультет ИПСПД),
К.Д. Мынбаев (Университет ИТМО, факультет ИПСПД),
Д.Д. Фирсов, И.В. Чуманов, О.С. Комков (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
В.Г. Ремесник, Н.Н. Михайлов (ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН)

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ФОТООТРАЖЕНИЕ ДЛИННОВОЛНОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР $HgTe/CdHgTe$

В последнее десятилетие гетероструктуры (ГС) с квантовыми ямами (КЯ) на основе твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) являются объектами повышенного интереса для приложений инфракрасной (ИК) оптоэлектроники. Энергия излучательных переходов в ГС зависит от ширины КЯ и составов (мольной доли CdTe) в КЯ и барьерных слоях. Оптимальные параметры ГС позволяют подавить процессы оже-рекомбинации и получить вынужденное излучение, благодаря чему на основе КРТ разрабатываются лазеры для среднего ($\lambda = 3\text{--}5 \text{ мкм}$) и дальнего ($\lambda > 8 \text{ мкм}$) ИК диапазонов. Дальнейшая оптимизация ГС требует точного знания о характеристиках составляющих их слоев, однако, до сих пор упор делался на исследовании отдельно или КЯ, или широкозонных барьеров/спейсеров. В настоящей работе представлены результаты комплексного изучения оптических характеристик длинноволновых ($\lambda \sim 10 \text{ мкм}$) излучательных ГС на основе КРТ, в том числе новым для подобных исследований методом ИК фотоотражения (ИК ФО).

ГС были выращены на подложке (013)GaAs с буферными слоями ZnTe и CdTe в ИФП СО РАН. Материал КЯ – чистый $HgTe$, барьерных и спейсерных слоёв – твердый раствор $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x \approx 0.6$. Параметры ГС контролировались *in situ* методом эллипсометрии и *ex situ* методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Исследования оптических свойств ГС проводились методами фотолюминесценции (ФЛ) и ИК ФО в интервале температур $T = 4.2\text{--}300 \text{ К}$. С использованием различных конфигураций возбуждения сигнала ФЛ была получена информация о свойствах отдельных широкозонных слоёв в ГС, для которых было обнаружено разупорядочение твердого раствора, отражающееся на полуширинах и энергиях пиков ФЛ при низких температурах, которое связано с неоптимальными условиями выращивания. Методом ФЛ был получен оптический сигнал, соответствующий переходам между уровнями в КЯ. При $T = 300 \text{ К}$ пики ФЛ с энергиями $\sim 143 \text{ мэВ}$, $\sim 169 \text{ мэВ}$ и $\sim 215 \text{ мэВ}$ хорошо согласовались с расчетными значениями энергий переходов. С помощью метода ИК ФО были получены энергии оптических переходов, не наблюдавшиеся в данных ГС иными методами: в частности, в диапазоне $T = 80\text{--}210 \text{ К}$ был обнаружен пик ИК ФО с энергией $\sim 187\text{--}199 \text{ мэВ}$. В докладе, в том числе, будет обсуждаться перспективность использования метода ИК ФО, позволяющего получать новые данные о зонной структуре образцов, недоступные при применении других методов.

Работа в Университете ИТМО выполнена в рамках государственного задания FSER-2025-0005.

Д.И. Сарыпов (асп., 2 год, НГУ, каф. Физики Полупроводников),
Д.А. Похабов (к.ф.-м.н., с.н.с., ИФП СО РАН)

ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ НА ГРАНИЦАХ GaAs МИКРОСУЖЕНИЙ

В достаточно чистых электронных системах, таких как двумерный электронный газ в графене или GaAs, частые электрон-электронные столкновения могут привести к эффектам, имеющим прямые аналоги в классических жидкостях и газах. В таких условиях гидродинамическое описание электронного транспорта становится продуктивным, поскольку позволяет предсказать и наблюдать необычные многочастичные явления, например, эффект Гуржи, электронные вихри и сверхбаллистический транспорт [1].

Гидродинамическое поведение электронов в твердых телах определяется граничными условиями. Литографические границы образцов традиционно считаются шероховатыми, то есть нет проскальзывания электронов на границе. Это позволяет объяснить наблюдаемое течение Пуазёйля в графеновых каналах [2]. Однако вопрос о том, возможно ли идеальное проскальзывание электронной жидкости на литографической границе, остается открытым.

Кроме того, для полноты гидродинамической аналогии необходимо установить связь между гидродинамическими величинами и общепринятыми параметрами электронного транспорта, например, между вязкостью электронов v и длиной электрон-электронного рассеяния l_{ee} . Кинетическая теория газов предсказывает, что эти величины пропорциональны друг другу, однако недавние измерения электронной вязкости в GaAs [3] расходятся с данным предсказанием. Это ставит под сомнение устоявшуюся теоретическую модель и требует систематической экспериментальной проверки.

Настоящая работа посвящена независимому измерению вязкости v и длины l_{ee} на одном образце, созданном на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом. Такой экспериментальный подход позволяет непосредственно сравнить v и l_{ee} и установить связь между этими величинами. Проведенные измерения не только подтвердили предсказание кинетической теории при низких температурах, но и выявили идеальное проскальзывание электронов на литографических границах. Это проскальзывание отличает GaAs наноструктуры от графеновых образцов, где шероховатые стенки приводят к Пуазёйлевскому профилю скоростей электронов. Результаты эксперимента согласуются с теорией вязкого течения электронов для случая идеально гладких границ образца [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWGW-2025-0023).

1. L. Fritz, T. Scaffidi, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, **15**, 17–44 (2024).
2. J.A. Sulpizio et al., *Nature*, **576**, 75–79 (2019).
3. D.I. Saryarov et al., *Phys. Rev. Lett.*, **134**, 026302 (2025).
4. S.S. Pershoguba, A.F. Young, L.I. Glazman, *Phys. Rev. B*, **102**, 125404 (2020).

М.К. Сотничук (студ., 5 курс спец., МГУ им. М.В. Ломоносова, каф. ОФиФКС),
А. В. Иконников (к.ф.-м.н., с.н.с., МГУ им. М.В. Ломоносова, каф. ОФиФКС)

ОСТАТОЧНАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ InAs/GaInSb

Гетероструктуры InAs/Ga(In)Sb с квантовыми ямами (КЯ) являются двумерными топологическими изоляторами (2D ТИ). Одним из способов управления топологическими состояниями в них может быть эффект остаточной фотопроводимости (ОФП) [1], который заключается в изменении проводимости образца под действием света, причём установленное значение сохраняется после выключения подсветки. Недавние работы [1, 2] показали возможность перехода КЯ InAs/Ga(In)Sb в состояние 2D ТИ под действием подсветки, однако использовалась только подсветка с фиксированными длинами волн, что не даёт полной информации о механизмах эффекта ОФП в таких структурах.

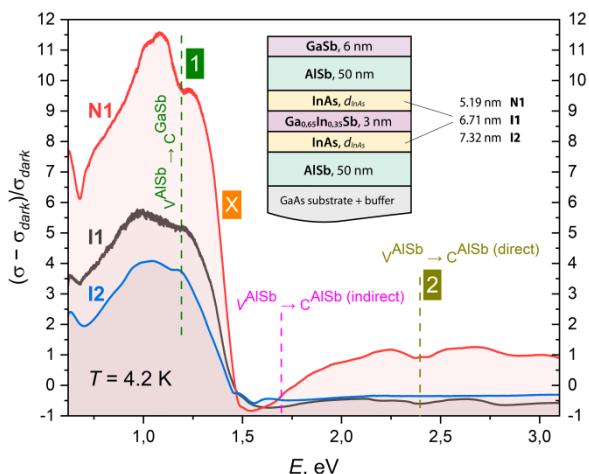


Рис. 1. Относительные изменения проводимости образцов в зависимости от энергии подсветки.

На вставке: ростовая схема структур

образцов совпадают. При энергиях, меньших 1.5 эВ, структуры имеют электронный тип проводимости, при энергиях, больших 1.7 эВ – дырочный. Основная особенность X – сильный спад проводимости при энергии около 1.35–1.45 эВ – связывается с генерацией электрон-дырочных пар в покровном слое GaSb и последующим увлечением дырок встроенным электрическим полем в КЯ. Хотя расчёты показывают, что такой процесс должен начинаться при энергии 1.65 эВ (дырки должны иметь энергию, достаточную для преодоления разрыва зон на гетерогранице GaSb – AlSb), возможно, имеет место аналог эффекта Франца-Келдыша или же используемые в расчёте параметры требуют уточнения.

Локальные минимумы при энергиях 1.19 и 2.39 эВ (особенности 1 и 2) связаны с переходами из валентной зоны барьера слоя AlSb либо в зону проводимости покровного слоя GaSb (1), либо в зону проводимости AlSb (2) с последующим разделением носителей встроенным электрическим полем.

1. B. Tong et al., *Phys. Rev. B*, **98**, 041301(R) (2018).
2. M. Meyer et al., *Phys. Rev. B*, **109**, L121303 (2024).

В настоящей работе с помощью монохроматора при температурах 77 К и 4.2 К были измерены спектры ОФП в диапазоне длин волн 400–2000 нм в структурах с различными ростовыми параметрами и типом зонного спектра (образец N1 – нормальный спектр, I1, I2 – инвертированный).

Энергетические положения характерных особенностей спектров ОФП (рис. 1) были соотнесены с энергиями соответствующих переходов на зонных диаграммах структур. Как видно из рис. 1, характерные особенности для всех

образцов совпадают. При энергиях, меньших 1.5 эВ, структуры имеют электронный тип

проводимости, при энергиях, больших 1.7 эВ – дырочный. Основная особенность X – сильный

спад проводимости при энергии около 1.35–1.45 эВ – связывается с генерацией электрон-

дырочных пар в покровном слое GaSb и последующим увлечением дырок встроенным

электрическим полем в КЯ. Хотя расчёты показывают, что такой процесс должен начинаться

при энергии 1.65 эВ (дырки должны иметь энергию, достаточную для преодоления разрыва

зон на гетерогранице GaSb – AlSb), возможно, имеет место аналог эффекта Франца-Келдыша

или же используемые в расчёте параметры требуют уточнения.

МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСИТОН-ЭКСИТОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ШИРОКИХ КВАНТОВЫХ ЯМАХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

В отсутствие электрического поля основным механизмом взаимодействия экситонов является их обменное взаимодействие [1]. Приложение электрического поля приводит к появлению дипольного момента экситонов [2]. Диполь-дипольное взаимодействие быстро нарастает с ростом поля и может превзойти величину обменного взаимодействия. Однако, обменное взаимодействие тоже может изменяться в электрическом поле, и характер этих изменений заранее не очевиден. В данной работе проведено моделирование экситон-экситонного взаимодействия в электрическом поле в квантовых ямах (КЯ) GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As.

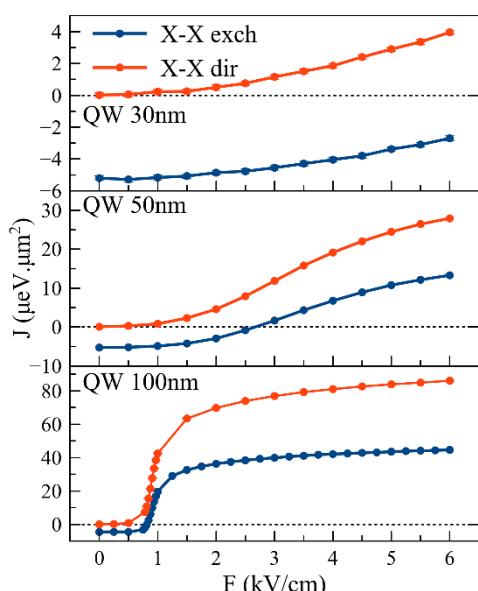


Рис. 1. Зависимость константы экситон-экситонного взаимодействия J в случае обменного (синие кривые) и прямого (красные кривые) в КЯ с шириной 30 нм, 50 нм и 100 нм (сверху вниз) с увеличением электрического поля F

Мы рассматриваем экситоны, находящиеся в одинаковых спиновых состояниях с нулевым волновым вектором движения вдоль слоя КЯ. Ранее мы вычислили экситонные волновые функции путем решения уравнения Шредингера методом конечных разностей [2, 3]. Найденные функции использованы для вычисления констант прямого (J_{dir}) и обменного (J_{exch}) взаимодействия, используя формализм работы [4].

В электрическом поле происходит сильное изменение величины как обменного, так и прямого экситон-экситонного взаимодействия (рис. 1). Мы связываем увеличение J_{dir} с ростом поля с увеличением дипольного момента [2]. Изменение знака J_{exch} в КЯ 50 и 100 нм с ростом поля обусловлено перераспределением электронной и дырочной плотностей в электрическом поле. Детальный механизм, ответственный за такое поведение J_{exch} , будет обсуждаться в докладе.

Авторы благодарят проект РНФ № 19-72-20039. Чжэн Шимин благодарит China Scholarship Council.

1. B.F. Gribakin et al., *Phys. Rev. B*, **104**, 205302 (2021).
2. S. Zheng et al., *Physica E*, **174**, 116333 (2025).
3. E.S. Khramtsov et al., *J. Appl. Phys.*, **119**, 184301 (2016).
4. C. Ciuti et al., *Phys. Rev. B*, **58**, 7926 (1998).

Д.В. Коляда (м.н.с., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
Д.Д. Фирсов (к.ф.-м.н., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
И.В. Чуманов (асп., 2 год, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
О.С. Комков (д.ф.-м.н., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),
В.А. Тимофеев (к.ф.-м.н., с.н.с., ИФП СО РАН),
И.В. Скворцов (асп., 4 год, м.н.с., ИФП СО РАН)

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАТОНКИХ КВАНТОВЫХ ЯМ GeSn/Si

Гетероструктуры на основе твердого раствора $Ge_{1-x}Sn_x$ привлекают внимание благодаря совместимости с кремниевой технологией и возможности работы в ближнем и среднем ИК-диапазонах (1.5–8 мкм) [1]. Основные ограничения их формирования – низкая растворимость Sn в Ge и сильное рассогласование решёток Ge и Sn, затрудняющие получение слоёв с высоким содержанием Sn. Одним из путей преодоления этих трудностей является формирование низкоразмерных структур – квантовых ям (КЯ) и сверхрешёток, где упругие напряжения стабилизируют слои GeSn с высокой долей Sn [2]. Наше исследование посвящено изучению структурных и оптических свойств множественных квантовых ям (МКЯ) GeSn/Si с ультратонкими упругонапряжёнными слоями GeSn.

МКЯ GeSn/Si были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках Si(100). Каждая структура содержала 10 периодов, состоящих из слоя GeSn толщиной 0.17–0.5 нм и слоя Si толщиной 6 нм. Рост GeSn осуществлялся при температурах от комнатной до 150 °C. Постройкой отжиг проводился при 600–675 °C в атмосфере аргона. Состав и напряжённое состояние слоёв исследовались методами рентгеновской дифрактометрии, а оптические свойства – методом фотолюминесценции (ФЛ) в диапазоне температур 11–300 K на установке с ИК Фурье-спектрометром Vertex 80.

Продемонстрировано формирование упругонапряжённых слоёв GeSn с содержанием олова до 47%. Сигнал ФЛ МКЯ GeSn/Si наблюдался в диапазоне длин волн 1.46–1.57 мкм. Анализ зонных диаграмм гетероструктуры GeSn/Si, а также результаты измерения мощностной зависимости ФЛ МКЯ $Ge_{0.53}Sn_{0.47}/Si$, подтвердили формирование гетероперехода 2 рода. Обнаружено, что уменьшение температуры осаждения и толщины слоёв GeSn приводит к увеличению сигнала ФЛ, связанной с межзонными оптическими переходами. Кроме того, наблюдается значительное уменьшение сигнала ФЛ, связанного с вакансационными комплексами, по отношению к сигналу от межзонных переходов. Продемонстрировано, что самый интенсивный сигнал наблюдается от структур с наименьшей шириной КЯ $Ge_{0.53}Sn_{0.47}/Si$. Уменьшение интенсивности сигнала ФЛ при увеличении толщины слоёв GeSn может быть связано с уменьшением перекрытия волновых функций дырок и электронов, локализованных в потенциальных ямах, образующихся вблизи гетерограницы GeSn/Si.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-19-00742.

1. V. Reboud, *Photonics Nanostructures*, **58**, 101233 (2024).
2. B. Schwartz, *Opt. Lett.*, **40**, 3209 (2015).

КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ, КВАНТОВЫЕ НИТИ И ДРУГИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 538.9

М.Н. Батаев (асп., 4 год, СПбГУ, SOLAB),
М.С. Кузнецова (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ, SOLAB),
И.В. Игнатьев (д.ф.-м.н., проф., СПбГУ, SOLAB)

ДВУХФОТОННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НАНОКРИСТАЛЛОВ CsPbX_3 ВО ФТОРФОСФАТНОМ СТЕКЛЕ

Нанокристаллы (НК) свинцово-галогенидных перовскитов являются перспективным классом материалов для создания светоизлучающих диодов [1]. Синтез перовскитных НК внутри фторфосфатной стеклянной матрицы [2] позволяет защитить нанокристаллы от внешнего физического и химического воздействия, что позволяет обеспечить стабильность их оптических свойств. Изучение нелинейных оптических свойств [3] перспективно для создания лазерных источников излучения.

В работе исследованы спектры фотолюминесценции (ФЛ) при двухфотонном возбуждении НК CsPbX_3 ($X = (\text{Br}, \text{Cl})$, Br, I). На рис. 1 приведены спектры возбуждения ФЛ при однофотонном (1P-PLE) и двухфотонном (2P-PLE) возбуждении для НК CsPbBr_3 . 2P-PLE спектр показывает спектральный ход коэффициента двухфотонного поглощения. С использованием методики z-скан был измерен коэффициент двухфотонного поглощения при возбуждении фотонами с энергией 1.55 eV (вставка на рис. 1). Полученное значение в несколько раз больше, чем для коллоидных аналогов [3].

Также были проведены измерения зависимости интенсивности излучения от мощности накачки при двухфотонном возбуждении для НК перовскита в стекле и продемонстрировано ее нелинейное поведение. Обнаружены особенности в спектре возбуждения НК CsPbI_3 , которые мы связываем с резонансным возбуждением в спин-отщепленное состояние в зоне проводимости. Был проведен расчет зонной структуры в рамках теории функционала плотности. Теоретический расчет хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

1. H. Cho et al., *Science*, **350**, 1222–1225 (2015).
2. E. Kolobkova et al., *J. Non-Cryst. Solids*, **563**, 120811 (2021).
3. Y. Wang et al., *Nano Lett.*, **16**, 448–453 (2016).

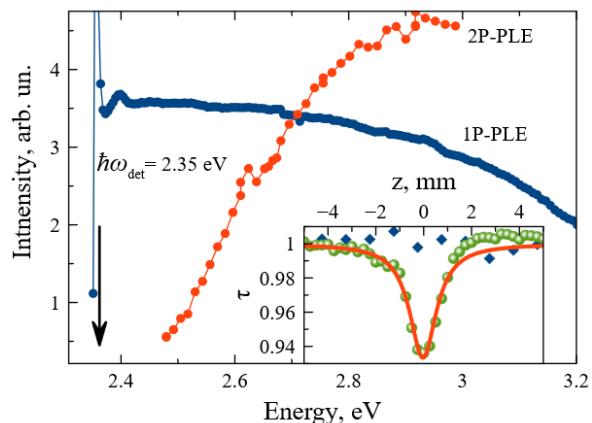


Рис. 1. Спектры возбуждения ФЛ НК CsPbBr_3 при однофотонном (1P-PLE) и двухфотонном (2P-PLE) возбуждении. На вставке приведен z-скан стекла без нанокристаллов (ромбы) и стекло с НК (кружки)

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕН ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ОСТРОВКАХ
 НАНОПРОВОДОВ AL-INAS

Измерение кондактанса с высоким разрешением по времени является востребованной задачей в области физики твёрдого тела. Оно позволяет наблюдать переходные и релаксационные процессы, а также измерять скорость реакции транзисторов и других элементов электрических схем. В настоящей работе исследуется время задержки перехода Al островков в нанопроводе Al-InAs из сверхпроводящего состояния в нормальное при приложении к нему транспортного тока. В работе [1] показано, что разрушение сверхпроводимости в Al островках происходит при достижении определённого значения транспортного тока (ток переключения) и сделана оценка времени релаксации параметра порядка (около микросекунды). В рамках данной работы была непосредственно измерена длительность этой задержки.

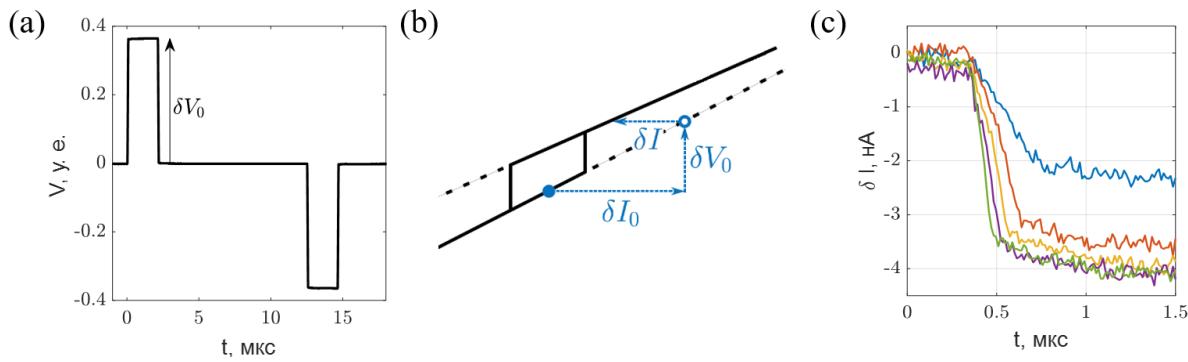


Рис. 1

Для этого была собрана схема измерения ВАХ в импульсном режиме в условиях задаваемого извне постоянного напряжения. Постоянная составляющая тока в образце выбиралась близкой к току переключения. Для изменения состояния образца, прикладывался импульс напряжения δV_0 (рис. 1, a), вызывающий мгновенное увеличение тока на δI_0 (рис. 1, b), до величины, превышающей ток переключения. Само переключение происходит с задержкой во времени и сопровождается уменьшением тока на δI . Изменение тока образца с временным разрешением около 100 нсек производилось с помощью низкотемпературного усилителя в 25 дБ с полосой пропускания около 1 ГГц. В результате измерений, удалось зафиксировать скачок δI с временной задержкой, составляющей около $t \approx 0.5$ мкс (рис. 1, c). Разные кривые на рисунке соответствуют разным значениям δI_0 (использовано усреднение по 65000 кривых) и показывают, что дисперсия времени переключения уменьшается с ростом δI_0 . Эти наблюдения проясняют динамику релаксации параметра порядка в мезоскопических сверхпроводящих островках структур Al/InAs.

Г.П. Вейшорт (студ., 1 курс маг., ИТМО, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
А.И. Веретенников, Ю.М. Серов, А.И. Галимов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

КВАЗИРЕЗОНАСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК InAs/InGaAs

Прогресс в области квантовых технологий обуславливает актуальность создания источников одиночных фотонов (ИОФ), среди которых выделяют источники на основе оптически возбуждаемых эпитаксиальных квантовых точек (КТ). Одним из ключевых параметров ИОФ является степень однофотонной чистоты, определяемая вероятностью испускания более чем одного фотона за один акт возбуждения. При определенных энергиях фотонов возбуждающего излучения, лежащих между энергией экситона в КТ и шириной запрещенной зоны матрицы, наблюдается резонансное возрастание интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) КТ. Этот режим возбуждения, называемый квазирезонансным, позволяет достичь высоких значений степени однофотонной чистоты и потому широко применяется, зачастую без детального исследования природы таких резонансов [1].

В данной работе исследуется квазирезонансное возбуждение КТ InAs/InGaAs в составе ИОФ телекоммуникационного С-диапазона [2], с одной рабочей линией ФЛ одиночной КТ, а также в модельных структурах – низкодобротных микрорезонаторах, содержащих несколько КТ. Для изучения механизмов возбуждения была проведена PLE спектроскопия модельных структур, спектры ФЛ которых демонстрировали несколько близкорасположенных узких линий. Полученные зависимости интенсивности ФЛ таких линий от энергии возбуждающих фотонов свидетельствуют о наличии резонансов двух типов. Резонанс I типа отвечает одновременному возбуждению нескольких линий в спектре ФЛ. Это явление может объясняться наличием особенностей в плотности состояний в смачивающем слое, образующемся при самоорганизованном росте КТ. Поглощение фотонов в смачивающем слое приводит к появлению носителей заряда, релаксирующих в различные КТ. Резонанс II типа отвечает возбуждению только одной линии в спектре ФЛ и соответствует поглощению фотона непосредственно в излучающей КТ через возбужденный уровень, без прямого участия смачивающего слоя в релаксации носителей заряда.

Для структуры ИОФ, содержащей КТ, полученные в том же ростовом процессе, была измерена автокорреляционная функция второго порядка при квазирезонанском возбуждении на нескольких длинах волн. Различие в получаемой при этом степени однофотонной чистоты может быть объяснено в рамках описанной модели, в предположении что резонансы, обеспечивающие более высокое значение степени однофотонной чистоты, относятся ко II типу, обеспечивающему большую избирательность возбуждения в структуре ИОФ.

1. N. Hauser et al., arXiv preprint arXiv:2505.09695 (2025).
2. A.I. Veretennikov et al., *JETP Letters*, **121**, 170–174 (2025).

Д.Г. Геворгян (асп., 2 год, РАУ, КОФКН),
С.П. Гаваладжян (асп., 2 год, РАУ, КОФКН),
М.Я. Винниченко (к.ф.-м.н, СПбПУ),
Э.М. Казарян, (д.ф.-м.н, РАУ)

МЕЖЗОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ЛИНЗООБРАЗНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ: АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

В работе представлен аналитико-численный подход к описанию носителей заряда и экситонов в линзообразных (полуэллипсоидальных) квантовых точках в рамках приближений эффективной массы и огибающей, при предположении жестких стенок и без учета деформации, диэлектрического несоответствия и перемешивания зон. Используя геометрическое соотношение сильной анизотропии, выполняется адиабатическое разделение быстрого (продольного) и медленного (плоскостного) движения и получается аналитическое выражение для одиночественных состояний и энергий; собственные функции определяются исключительно геометрией (не зависят от эффективной массы), тогда как энергии масштабируются обратно пропорционально эффективной массе. Энергия экситонного перехода складывается из ширины запрещенной зоны, вкладов конфайнмента электрона и дырки, а также кулоновского притяжения. Энергия взаимодействия вычисляется численно в первом порядке теории возмущений, используя аналитические огибающие. Межзонное поглощение определяется правилами отбора для «ярких» состояний, а фотолюминесценция получается из поглощения по соотношению ван Роосброка–Шокли с лоренцевым уширением. Для типичных параметров, характерных для GaAs, одиночественные энергии значительно чувствительнее к высоте точки, чем к боковой полуоси; состояния с более высоким продольным квантовым числом располагаются существенно выше основной ветви; кулоновская связность убывает с увеличением размера, проявляя сопоставимую относительную чувствительность к изменениям обеих полуосей и формируя группировки преимущественно по радиальному квантовому числу. Предложенный подход дает компактные формулы, прозрачные правила масштабирования и физически интерпретируемые спектры и времена жизни, полезные для проектирования и анализа линзообразных квантовых точек.

Е.И. Дерибина (асп., 3 год, СПбГУ, каф. Фотоники),
 Н.И. Шевага (студ., 3 курс бак., СПбГУ, каф. Фотоники),
 Ю.В. Капитонов (д.ф.-м.н., доцент, СПбГУ, каф. Фотоники)

КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ GaAs/AlGaAs

Ненапряжённые квантовые точки (КТ) GaAs/AlGaAs, выращенные методом наполнения отверстий, полученных при травлении подложки каплями галлия (*nanohole-filling droplet epitaxy, NFDE*), представляют значительный интерес для информационной фотоники благодаря высокой неразличимости фотонов и подавленному тонкому расщеплению. Однако механизмы возбуждения и излучения таких КТ до сих пор изучены меньше, чем у напряжённых КТ, сформированных по механизму Странски–Крастанова. Часто наблюдаемое излучение GaAs/AlGaAs NFDE-КТ в виде нескольких пиков интерпретируется либо как признак двух различных ансамблей КТ, либо как следствие различных состояний в одной КТ.

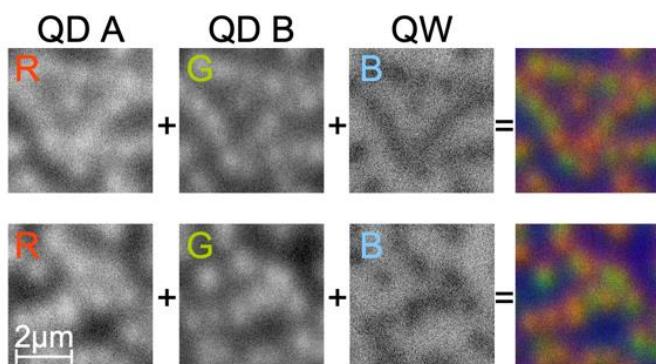


Рис. 1. CL-карты: излучение QD A (красный), QD B (зеленый) и КЯ (синий). Желтый цвет указывает на пространственное совпадение QD A и QD B

В работе с помощью катодолюминесценции (КЛ) при 80 К в сканирующем электронном микроскопе и фотолюминесценции (ФЛ) при 4 К исследовалась структура с NFDE КТ GaAs/AlGaA. В спектрах ФЛ и КЛ наблюдались две полосы излучения (QD A и QD B). Анализ спектрально разрешённых КЛ-карт показал, что пространственное распределение сигналов QD A и QD B полностью

совпадает (рис. 1). Это указывает на их одинаковое пространственное положение. В отличие от этого, излучение квантовой ямы (КЯ) распределено равномерно и не коррелирует с КТ. Кроме того, при регистрации последовательности КЛ-изображений при одинаковых условиях было обнаружено мигание (blinking) отдельных КТ: некоторые точки поочерёдно переходили из «включённого» (яркого) состояния в «выключенное» (тёмное). Этот эффект не может быть объяснён смещением излучения по энергии, поскольку мигание наблюдалось как при съёмке в фиксированном спектральном окне, так и при гиперспектральном картировании. Для ФЛ такого поведения замечено не было. Полученные результаты важны для понимания динамики возбуждения и применения NFDE-КТ в качестве стабильных источников одиночных фотонов.

Работа была выполнена на оборудовании Ресурсных центров СПбГУ «Нанофотоника» и «Нанотехнологии».

Е.С. Завьялова (студ., 2 курс маг., ИТМО, ФиФ),

М.И. Петров (к.ф.-м.н., с.н.с., ИТМО, ФиФ),

А.Д. Большаков (д.ф.-м.н., зав. лаб., МФТИ, лаб. ФНМ)

СВЕТОИЗЛУЧАЮЩАЯ НАНОАНТЕННА НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ $\text{GaP}/\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$

Нанофотонные структуры играют ключевую роль в развитии технологий управления светом на наномасштабе. Особый интерес представляют полупроводниковые нитевидные нанокристаллы (ННК), позволяющие варьировать состав и кристаллическую структуру как вдоль оси роста, так и по сечению. Такая архитектура открывает возможность точного управления спектральными и пространственными характеристиками излучения. На основе подобных систем уже реализованы наноразмерные источники света, лазеры и одиночные квантовые эмиттеры.

Материал фосфид галлия (GaP) характеризуется высокой оптической плотностью и малыми потерями в широком спектральном диапазоне [1], что делает его перспективным для создания резонаторов и волноводов. Легирование мышьяком ($\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$) позволяет формировать активные области с прямой запрещенной зоной и усиливать излучательную способность [2].

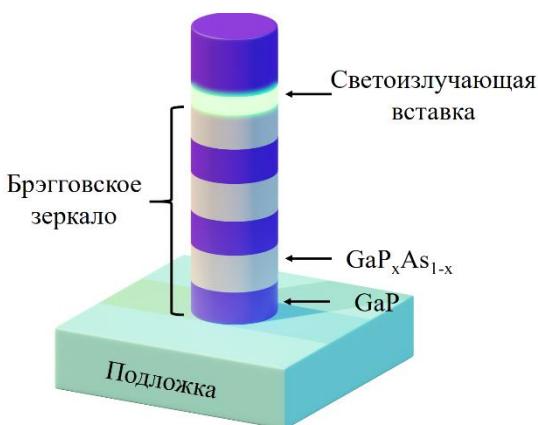


Рис. 1. Геометрия исследуемой системы

анализ влияния геометрических параметров на спектральные и направленные характеристики излучения.

Полученные результаты демонстрируют потенциал гетероструктурных ННК $\text{GaP}/\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ для создания компактных наноантенн и направленных светоизлучающих элементов нанофотоники.

1. D.E. Aspnes, A.A. Studna, *Phys. Rev. B*, **27**, 985 (1983).
2. A. Kuznetsov et al., *Nanomaterials*, **12**, 241 (2022).

СПЕКТРЫ ЭКСИТОННОГО ОТРАЖЕНИЯ В ТОНКИХ СЛОЯХ WS₂

Мультислойные дихалькогениды переходных металлов характеризуются уникальными физическими свойствами благодаря своей двумерной структуре с слабым ван-дер-ваальсовым взаимодействием между слоями. Толщина материала значительно влияет на его электронные и оптические характеристики, что делает эти вещества перспективными для использования в наноэлектронике и оптоэлектронике. Муаровые структуры, формирующиеся при взаимном повороте слоев, могут включать квантовые точки и демонстрировать явления двулучепреломления, открывая путь к разработке оптоэлектронных устройств, таких как фотодетекторы и лазеры.

В исследовании изучались спектры отражения тонких слоев WS₂ различной толщины (от 1 до 10 монослоев), приготовленных методом механической эксфолиации и нанесенных на подложку Si/SiO₂. Эксперименты проводились при температуре 10 K, с регистрацией спектральных зависимостей параметров Стокса для отраженного излучения.

Спектры отражения от WS₂ и Si/SiO₂ демонстрируют интерференционные структуры в диапазонах 1.89–1.975 эВ, 1.975–2.10 эВ и модуляцию. Сопоставление спектров отражения образца и подложки выявило различия. Линии в интервале 1.89–1.975 эВ связаны с интерференцией в слое SiO₂/Si (толщина около 300 нм), а в интервале 1.975–2.10 эВ – с интерференцией в WS₂ толщиной примерно 0.34 мкм [1]. Особенности, специфичные для WS₂, ассоциируются с экситонным резонансом. Ранее эти линии интерпретировались как основное и возбужденные экситонные состояния в монослоях WS₂. Однако их поведение и отсутствие значительного поглощения указывают на интерференционную природу, а не на экситонное поглощение. Кроме того, установлено, что при падении линейно поляризованного света на образец отраженный сигнал приобретает круговую поляризацию, что указывает на двулучепреломление. Степень поляризации варьируется в зависимости от ориентации поляризации падающего света, достигая максимума в определенном направлении и обнуляясь при повороте на 45° [2].

Особенности спектров трактуются как проявление размерного квантования экситонных поляритонов в тонких пластинках. Оптическая анизотропия связана с муаровым узором, формирующимся вследствие поворота слоев при эксфолиации. Исследование подтверждает, что особенности спектров отражения в диапазоне 1.9–2.1 эВ обусловлены квантованием поляритонов в тонких слоях WS₂. Выявлена оптическая анизотропия, ассоциированная с муаровыми структурами, что углубляет понимание свойств мультислойных TMD и их потенциала в оптоэлектронике.

1. Д.Д. Белова и др., *Письма в ЖТФ*, **51**(13), 44–48 (2025).
2. Л.В. Котова, Т.Э. Зедоми, В.П. Кочерешко, *ФТТ*, **67**(5), 904–907 (2025).

УДК 538.9

А.Л. Зибинский (студ., 2 курс маг., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, кафедра ФКС),
Д.С. Смирнов (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

СПИНОВАЯ ДИНАМИКА АНСАМБЛЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В УСЛОВИЯХ КВАНТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Огромный интерес для физиков по всему миру представляет изучение проявлений квантовой физики на макроскопическом уровне. Одним из них является квантовый эффект Зенона, описывающий подавление динамики в любой системе под действием непрерывных квантовых измерений (см., например, обзор [1]). Хотя динамика спинов электронов в полупроводниках и наноструктурах уже весьма глубоко изучена, но надёжных наблюдений квантового эффекта Зенона для электронных спинов в них до сих пор нет [2].

Наиболее простым и распространённым методом экспериментального изучения спиновой динамики является оптическое измерение кривых Ханле и восстановления спиновой поляризации [3]. Мы развили теорию этих эффектов для ансамбля локализованных электронов в условиях конкуренции трёх экспериментально важных факторов: сверхтонкого взаимодействия, прыжков электронов между центрами локализации (квантовыми точками) и квантового обратного действия. Последнее заключается в подавлении поперечных компонент спина электрона под действием линейно поляризованного света, измеряющего продольную компоненту спиновой поляризации по углу фарадеевского вращения.

Разработанная модель позволила нам получить точные решения системы блоховских уравнений в геометриях Фохта и Фарадея в общем случае для произвольного соотношения между темпом прыжков электронов по квантовым точкам, силой сверхтонкого взаимодействия и силой квантового измерения. Зависимость времён продольной и поперечной спиновой релаксации от мощности зондирующего лазера имеет яркие особенности в режимах эффекта Зенона и анти-Зенона и может быть использована экспериментально для детектирования этих эффектов.

Также наша теория параметрически расширяет множество допустимых соотношений между амплитудой и полуширинами кривых Ханле и PR, что может позволить описать ранее не объяснённые эксперименты и выявить в них роль квантового обратного действия. Помимо описания магнитополевых зависимостей, разработанный подход также применим для изучения формы спектров спинового шума в зависимости от мощности зондирующего лазера.

1. P. Facchi, S. Pascazio, *J. Phys. A: Math. Theor.*, **41**, 493001 (2008).
2. V. Nedelea et al., *Phys. Rev. Research*, **5**, L032032 (2023).
3. M.M. Glazov, *Electron and Nuclear Spin Dynamics in Semiconductor Nanostructures*. – Oxford University Press, 2018.

Д.С. Зографян (асп., 1 год, МФТИ, каф. ПТФ),
М.М. Глазов (д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

НЕЧЕТНАЯ ВЯЗКОСТЬ И АНОМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ДВУМЕРНОМ ЭЛЕКТРОННОМ ГАЗЕ С ПЛАВНЫМ БЕСПОРЯДКОМ

В последние годы технологический прогресс дает возможность экспериментальной реализации сверхчистых систем, где длины импульсной релаксации обусловленной рассеянием на примесях превышает характерные размеры системы. Это дает возможность реализации новых видов транспорта, в частности, гидродинамического [1], где возникают различные эффекты, которые не присущи обычному, диффузному транспорту. В таком режиме транспорта могут также возникать новые явления, связанные со спиновыми степенями свободы.

В нашей работе мы изучаем влияние спин-орбитального взаимодействия в электронном газе с ненулевой спиновой поляризацией [2]. Рассматривается случай плавного статического потенциала, который приводит к квазигидродинамическому типу транспорта, когда время релаксации второй гармоники функции распределения становится сильно меньше времени импульсной релаксации, даже без учета электрон-электронных столкновений. Дальнодействующий потенциал примесей создает добавочный вклад в нечетную (недиагональную) вязкость электронного газа, пропорциональному степени спиновой поляризации электронной системы. Такая вязкость, возникающая в следствии спин-орбитального взаимодействия, дает добавочный вклад в аномальный эффект Холла.

1. L. Levitov, G. Falkovich, *Nat. Phys.*, **12**, 672–676 (2016).
2. N. Nagaosa et al., *Rev. Mod. Phys.*, **82**, 1539–1592 (2010).

Д.А. Кучинов (студ., 4 курс бак., СПбГУ, ФТТ),

М.Н. Батаев (асп., 4 год, СПбГУ, ФТТ),

М.С. Кузнецова (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ, ФТТ)

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ CsPbX_3 ВО ФТОРФОСФАТНОМ СТЕКЛЕ

Металл-галогенидные перовскиты и низкоразмерные структуры на их основе, в частности, нанокристаллы (НК) обладают богатыми оптическими свойствами. В последние годы они активно исследуются ввиду перспективы их применения для оптоэлектронных устройств. Перовскитные НК, выращенные во фторфосфатном стекле [1], имеют высокий квантовый выход и обладают высокой стабильностью оптических свойств. Важное влияние на оптические свойства перовскитных НК оказывает изменение температуры [2].

В данной работе представлено исследование спектров фотолюминесценции (ФЛ) образцов с НК CsPbX_3 ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$), выращенных во фторфосфатном стекле, в широком температурном диапазоне (15–500 К). На рис. 1 представлена температурная зависимость спектров ФЛ для НК CsPbBr_3 . Как видно, по мере увеличения температуры полоса ФЛ сдвигается в область больших энергий и уширяется. На вставке на рис. 1 представлена зависимость положения полосы ФЛ от температуры. Сдвиг полосы ФЛ обусловлен электрон-фононным взаимодействием [2], вклад в которое дают акустические и оптические фононы. Данное поведение полосы ФЛ НК в диапазоне температур 10–300 К можно описать теоретически согласно выражению (1) (чёрная кривая на вставке на рис. 1):

$$E(T) = E_0 + A_{TE}T + A_{EP} \left(\frac{2}{\exp\left(\frac{E_{ph}}{k_B T}\right) - 1} + 1 \right). \quad (1)$$

Данная модель показывает хорошее согласие с экспериментом до 300 К. Далее наблюдается резкий излом зависимости, который объясняется фазовым переходом в кубическую фазу. Дальнейший линейный рост энергии полосы ФЛ связан с упругими напряжениями, создаваемыми матрицей стекла. Проведен анализ интенсивности ФЛ в зависимости от температуры и моделирование влияния электрон-фононного взаимодействия на уширение спектров ФЛ. Во всех случаях получено хорошее согласие с экспериментом.

1. E. Kolobkova et al., *J. Non-Cryst. Solids*, **563**, 120811 (2021).
2. M. Gramlich et al., *J. Phys. Chem. Lett.*, **12**(46), 11371–11377 (2021).

М.А. Малыш (студ., 1 курс маг., СПбАУ им. Ж.И. Алферова),

В.А. Шаров (к.ф.-м.н., СПбАУ им. Ж.И. Алферова)

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА ННК InAs/Si НА СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНОГО ИНТЕРФЕЙСА

XXI век ставит перед полупроводниковой индустрией задачи, связанные с ограничениями классических планарных технологий, особенно в интеграции материалов с разными параметрами кристаллической решетки. В этом нитевидные нанокристаллы (ННК) демонстрируют уникальные преимущества: они позволяют выращивать соединения типа A_3B_5 (например, GaAs, InAs) напрямую на кремниевых подложках [1], преодолевая решеточное рассогласование, что затруднительно для планарных гетероструктур. Интересом для изучения ННК InAs служит создание на их основе инфракрасных светодиодов и фотодиодов [2]. Однако, несмотря на более чем 20-летние активные исследования, эффективность устройств на основе ННК до сих пор уступает классическим аналогам. Одной из причин может являться высокая дефектность ростового интерфейса ННК-подложка, несмотря на хорошее кристаллическое качество самих ННК.

Было исследовано три массива ННК InAs, выращенных при разных условиях, при помощи атомно-силовой микроскопии. ННК из первого массива были выращены непосредственно на кремниевой подложке. Они характеризуются полным удалением при умеренной механической нагрузке и оставляют после себя атомарно-гладкую поверхность, что объясняется высоким решеточным рассогласованием и, как следствие, высокой дефектностью и низкой прочностью интерфейса. ННК из двух других массивов были синтезированы на двумерном слое InAs и отличались средним диаметром. Данные образцы демонстрируют более высокую, коррелирующую с диаметром прочность ростового интерфейса, а также неполный характер удаления ННК с частичным сохранением их основания.

Полученные результаты демонстрируют прямую взаимосвязь между материалом подложки и структурными свойствами эпитаксиального интерфейса ННК, что должно приниматься во внимание при разработке устройств на их основе.

Исследование выполнено при поддержке министерства науки и высшего образования, грант № FSEG-2024-0017.

1. L. Aurélie et al., *ACS omega*, **7**, 5836 (2022).
2. H. Chen et al., *Infrared Phys. Technol.*, **133**, 104785 (2023).

К.В. Машинский (м.н.с., СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),
 В.В. Попов (д.ф.-м.н., г.н.с., СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),
 Д.В. Фатеев (к.ф.-м.н., зам. дир. по научной работе, СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

ГИБРИДИЗАЦИЯ ПЛАЗМОННЫХ МОД КВАДРАТНОГО ЛИСТА ГРАФЕНА,
 ЭКРАНИРОВАННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЗАТВОРОМ, С ФАБРИ-ПЕРО
 РЕЗОНАНСАМИ В БАРЬЕРНОМ СЛОЕ

Исследование терагерцевых (ТГц) плазмонов в графене актуально [1] благодаря уникальным свойствам однослойного графена и классическим свойствам двумерных (2D) плазмонов в ТГц диапазоне частот. В данной работе представлены результаты исследования возбуждения 2D плазмонов в графеновом квадрате, экранированном металлическим нижним затвором. Исследования проведены в рамках разработанного нами строгого электродинамического подхода, основанного на методе интегрального уравнения [2].

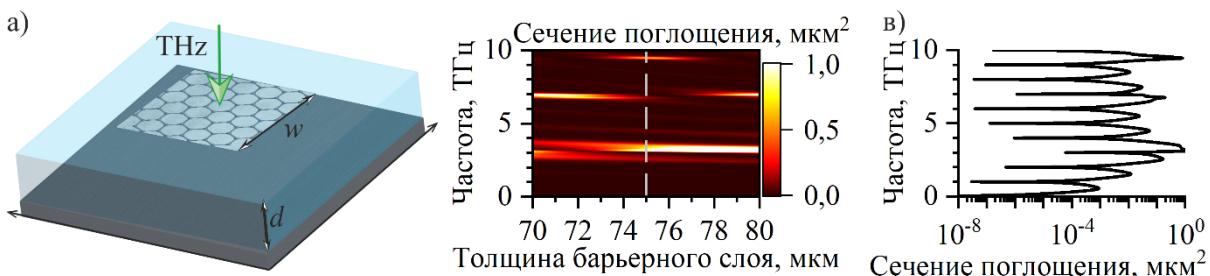


Рис. 1. Исследуемая структура (а). Зависимость спектра сечения поглощения от толщины барьера слоя (б). Спектр сечения поглощения при толщине барьера слоя 75 мкм (в)

Структура состоит из квадратного листа графена, отделенного от металлического нижнего затвора диэлектрическим барьерным слоем нитрида бора hBN толщиной d (рис. 1, а). На структуру нормально падает плоская монохроматическая ТГц волна, поляризованная вдоль одной из сторон листа графена, и возбуждает плазмоны. При толщине барьера слоя, сравнимой с длиной падающей волны в среде λ , происходит гибридизация плазмонных резонансов и резонансов Фабри-Перо (рис. 1, б, в) в барьере слое. В режиме негативной интерференции при ослаблении суммарной отраженной волны вся падающая на графен мощность переходит в энергию плазмонов в графене, увеличивая сечение поглощения ТГц излучения плазмонами на три порядка по сравнению со структурой с тонким барьерным слоем ($d \ll \lambda$). Этот эффект подкачки плазмонных резонансов значительно повышает эффективность взаимодействия излучения с дипольными плазмонными резонансами. Эффект антипересечения плазмонных и Фабри-Перо резонансов позволяет создавать структуры для усиления любого плазмонного резонанса, в том числе и высшего порядка.

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект № 22-19-00611-П).

1. J.W. Han, *Curr. Appl. Phys.*, **74**, 44 (2025).
2. K.V. Mashinsky et al., *Sci. Rep.*, **14**(1), 7546 (2024).

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ ДЛЯ ЧАСТИЧНО ЭКРАНИРОВАННОЙ ДВУМЕРНОЙ СИСТЕМЫ С ЭЛЕКТРОННЫМ ДРЕЙФОМ

В настоящее время активно исследуются возможности создания компактных тегерцовых (ТГц) приборов. В частности, исследуются структуры на основе двумерных электронных систем (ДЭС), в том числе, графена, для ТГц детектирования [1]. Для усиления ТГц излучения перспективными являются структуры на основе ДЭС с электронным дрейфом [2]. Чтобы ТГц приборы были эффективны, необходимо исследование отклика структур с ДЭС на внешнее излучение, рассеянное на затворных электродах различной конфигурации (одиночные и периодические решетки), расположенных вблизи ДЭС [3, 4].

В настоящей работе теоретически исследовано рассеяние плоской ТГц электромагнитной волны на металлическом электроде, частично экранирующем ДЭС с постоянным током. Свойства ДЭС определяются её динамической нелокальной проводимостью. Исследованы Фурье-спектры электрического поля в ДЭС с постоянным током. Для этого было решено волновое уравнение методом Винера-Хопфа (выполнена факторизация уравнения с целью его разделения на функции, аналитические в верхней и нижней комплексной полуплоскости, затем получено аналитическое решение факторизованного уравнения) [5, 6]. Показано, что в исследуемой структуре от края затвора в обе стороны распространяются плазмоны, дисперсия которых отличается при сильном экранировании ДЭС. Показана возможность увеличения амплитуды электрического поля плазмонов в подзатворной и открытой области ДЭС за счет постоянного тока в зависимости от его величины и направления. Показано, что эффективность конверсии падающей волны в плазмоны на ТГц частотах может возрастать в несколько раз при реально достижимой скорости дрейфа. Полученные результаты могут быть использованы для создания плазмонных усилителей ТГц излучения на основе ДЭС.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 24-79-00094).

1. D.A. Bandurin et al., *Nat. Commun.*, **9**, 5392 (2018).
2. S. Boubanga-Tombet et al., *Phys. Rev. X*, **10**, 031004 (2020).
3. O. Sydoruk, K. Choonee, G.C. Dyer, *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **5**, 486 (2015).
4. V.V. Popov et al., *Phys. Rev. B*, **86**, 195437 (2012).
5. B. Noble, Methods Based on the Wiener-Hopf Technique for the Solution of Partial Differential Equations. – Pergamon Press, London & New York, 1959. – 246 p.
6. I. Moiseenko et al., *Phys. Rev. Appl.*, **24**, 014059 (2025).

ОПТИЧЕСКОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ЯДЕРНОЙ СПИНОВОЙ СИСТЕМЫ В НЕНАПРЯЖЕННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As

Сверхтонкое взаимодействие локализованного электрона в квантовой точке (КТ) с ядерными спинами создает сильно связанную электронно-ядерную спиновую систему [1]. Эта система считается перспективной для реализации устройств квантовой обработки информации [2]. Реализация спиновых кубитов предполагает некоторую стабильность спиновой системы, необходимую для хранения и обработки квантовой информации. Одним из процессов разрушения спиновой поляризации, является квадрупольные расщепления ядерной спиновой системы, возникающие из-за механических напряжений в структуре. Таким образом, изучение свойств электронно-ядерной спиновой системы в ненапряженных квантовых точках представляет интерес для развития спинtronики.

В настоящей работе представлено экспериментальное исследование динамики электронно-ядерной спиновой системы в ненапряженных квантовых точках GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As. Был обнаружен эффект резонансного охлаждения ядерной спиновой системы (ЯСС), а также определена величина поля Оверхаузера.

Для определения времени жизни спина электрона измерена зависимость деполяризации ФЛ в поперечном магнитном поле (эффект Ханле) при быстрой модуляции знака циркулярной поляризации накачки. Кривая была смоделирована лоренцеподобным контуром, по величине полуширины на полувысоте кривой $B_{1/2}$ можно оценить время жизни спина T_s [1]. В данном образце величина T_s составила порядка 76 пс.

Для изучения свойств поляризованной ЯСС получены кривые изменения степени поляризации ФЛ при адиабатическом размагничивании. На первом этапе происходило оптическое охлаждение ЯСС в продольном магнитном поле 5 мТл, создавалось некоторое ядерное магнитное поле (поле Оверхаузера). На втором этапе продольное магнитное поле выключалось и включалось поперечное магнитное поле 4.7 мТл. При переключении полей наблюдается провал электронной поляризации в суммарном магнитном поле (внешнее и ядерное магнитные поля), которая затем восстанавливается до некоторого стационарного уровня по мере релаксации ЯСС.

Полученные кривые были смоделированы аналогично работе [3]. Оцениваемая величина поля Оверхаузера достигает 380 мТл, что значительно превышает внешнее магнитное поле.

1. V.G. Fleisher, I.A. Merkulov, in Optical Orientation, edited by B.P. Zakharchenya and F. Meier. – North-Holland, Amsterdam, 1984. – Chap. 5.
2. B.E. Kan, *Nature*, **393**, 133 (1998).
3. V.M. Litvyak et al., *Phys. Rev. B*, **104**, 235201 (2021).

А.А. Наапетян (асп., 2 год, ИППФ НАН РА, Ереван, Армения),
М.А. Мкртчян, А.А. Саркисян (РАУ, Ереван, Армения),
М.Я. Винниченко, Н.Ю. Харин (СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия)

ВЛИЯНИЕ АКСИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОГЛОЩЕНИЕ ТЕРАГЕЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ Ge/Si

Квантовые точки (КТ) являются уникальным объектом современной физики полупроводников, так как физическое ограничение движения носителей заряда в трёх направлениях приводит к полностью дискретному энергетическому спектру, который можно изменять, варьируя геометрическую форму и размеры КТ, а также внешние воздействия. Важную роль в физике КТ играет обобщенная теорема Кона. Она утверждает, что в системе взаимодействующих частиц, находящихся в параболической потенциальной яме, резонансные частоты длинноволнового (терагерцового) внутризонного поглощения в дипольном приближении не зависят от числа частиц и степени их взаимодействия. Данная работа посвящена исследованию реализации этой теоремы в сильно сплюснутых асимметричных эллипсоидальных КТ Ge/Si, содержащих газ тяжелых дырок в условиях аксиального магнитного поля.

Использовалось адиабатическое приближение для разделения дырочного газа во внешнем магнитном поле в асимметричной эллипсоидальной КТ на быструю и медленную подсистемы. Для медленной составляющей задача сводится к решению уравнения Шредингера в эффективном анизотропном параболическом потенциале, зависящим от геометрии КТ и магнитного поля. Доказана коммутативность оператора Гамильтона, которая приводит к тому, что энергия перехода между основным и первым возбужденным состоянием не зависит от числа частиц и потенциала их парного взаимодействия, что и подтверждает утверждение обобщенной теоремы Кона о том, что резонансные частоты терагерцовых внутризонных переходов не зависят от числа частиц и их взаимодействия. Таким образом, рассматриваемая система ведет себя так, как если бы частицы не взаимодействовали друг с другом, несмотря на наличие парного взаимодействия.

Для частного случая КТ в виде симметричного эллипса с круговым поперечным сечением существует точное аналитическое решение в рамках модели атома Мошинского. В работе приведен полученный спектр энергетических состояний в магнитном поле, что является оригинальным результатом для физики многочастичного взаимодействия.

Показано, что варьирование геометрии квантовых точек и магнитного поля позволяет точно настраивать резонансную частоту оптического терагерцового перехода. Доказано, что выполнение обобщенной теоремы Кона позволяет прогнозировать оптический отклик КТ без учета сложных многочастичных эффектов.

Л.В. Нечеухина (асп., 1 год, Университет ИТМО, ФизФ),
Д.С. Гец (к.ф.-м.н., в.н.с., Университет ИТМО, ФизФ)

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА СМЕШАННЫХ ГАЛОГЕНИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ

Смешанные галогенидные перовскиты обладают ограниченным применение в оптоэлектронике из-за галогенидной сегрегации. При освещении в таких материалах происходит пространственное разделение галогенидных ионов (I^- и Br^-), что приводит к образованию доменных областей с различными ширинами запрещённой зоны [1]. Эти домены динамически формируются и исчезают в зависимости от внешнего воздействия, что существенно усложняет измерение и интерпретацию люминесцентных характеристик. В частности, фотолюминесценция смешанных перовскитов демонстрирует двойную или смещающуюся линию фотолюминесценции, отражающую гетерогенность локального состава.

Наличие гетерогенности структуры смешанных галогенидных перовскитов приводит к усложнению исследования динамики носителей заряда в таких системах. Под действием света запускается обратимая фазовая сегрегация, в результате которой формируются I-домены с узкой запрещённой зоной и Br-домены области с широкой запрещённой зоной, и остаточная матрица с промежуточным составом. Процессы генерации и рекомбинации носителей заряда идут во всех трёх областях одновременно, поскольку энергия фотонов достаточна для возбуждения электронов из валентной в зону проводимости в каждой из фаз.

Согласно литературным данным, домены обладают характерным размером на уровне 10 нм [2], что соответствует размерным характеристикам синтетических перовскитных квантовых точек. Это позволяет рассматривать сегрегированную структуру не как дефектную неоднородность, а как самоорганизующуюся систему встроенных квантовых точек, распределённых в объёмной перовскитной матрице.

В работе была исследована динамика носителей заряда в смешанно-галогенидном перовските $APbX$ ($A = FA, MA$; $X = I_yBr_{3(1-y)}$) с сформированными доменами. Для характеристики структурных изменений использована рентгеновская дифракция, так же измерялось время жизни неравновесных носителей заряда и квантовый выход фотолюминесценции для изучения динамики. Полученные данные согласуются с представлением о сегрегированных доменах как о квантово-ограниченных включениях.

1. E.T. Hoke et al., *Chem. Sci.*, **6**, 613–617 (2015).
2. M.C. Brennan et al., *Trends Chem.*, **2**(4), 282–301 (2020).

А.В. Николаева (асп., 2 год, СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова),
М.А. Аникина (асп., 2 год, СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова),
А.Д. Большаков (д.ф.-м.н., доц., с.н.с., зав. лаб., МФТИ, Физтех)

УПРАВЛЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЕЙ МОНОСЛОЕВ WSe₂, ИНТЕГРИРОВАННЫХ С ПЛАЗМОННЫМИ НАНОБАМПАМИ, МЕТОДОМ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ИНЖЕНЕРИИ

Двумерные материалы, в частности дихалькогениды переходных металлов (TMDC), такие как MoS₂, WS₂, MoSe₂ и WSe₂, демонстрируют исключительные оптические и электронные характеристики, включая сильное взаимодействие света с веществом, прямозонность и настраиваемые экситонные свойства [1]. Среди них двумерный диселенид вольфрама (WSe₂) демонстрирует выдающиеся люминесцентные свойства, что делает его перспективным материалом для нанофотоники. Однако люминесцентные свойства двумерных материалов часто ограничены низкой эффективностью излучательной рекомбинации. Это ограничение можно преодолеть за счёт гибридизации сnanostructuredированными поверхностями, которые позволяют не только усилить, но и целенаправленно модифицировать оптический отклик такой системы.

В данной работе мы исследуем гибридную систему, состоящую из монослоя WSe₂, интегрированного с массивом плазмонных золотых нанобампов, для усиления и управления его фотолюминесценцией. Монослой WSe₂ был получен методом механической эксфолиации с дальнейшим сухим переносом на подложку с золотыми нанобампами. Нанобампы были получены с помощью метода прямой фемтосекундной лазерной печати на золотой пленке, толщиной 50 нм. Оптические свойства данной структуры исследовались с помощью микроспектроскопии фотолюминесценции (ФЛ) на спектрометре Horiba LabRAM HR 800. Источником возбуждающего излучения служил твердотельный лазер с диодной накачкой на длине волны 532 нм. Картирование ФЛ показало, что в области нанобампа интенсивность фотолюминесценции монослоя WSe₂ возрастает в 3 раза, а пик испытывает красное смещение. Важным результатом является наблюдение при возбуждении на длине волны 473 нм новой спектральной особенности в области ~780 нм, которая проявляется исключительно в деформированных областях нанобампов. Данное состояние может быть связано с «осветлением» темного экситона или образованием локализованного трионного состояния, индуцированного комбинацией плазмонного поля и деформации.

Показано, что метод комбинации плазмонных нанобампов и деформации монослоя WSe₂ позволяет гибко контролировать фотолюминесцентные свойства такой гибридной системы, варьируя параметры оптической накачки для селективного возбуждения экситонных состояний. Предложенный подход, сочетающий простую и масштабируемую лазерную печать nanostructured с последующим сухим переносом двумерных материалов, открывает путь для создания эффективных гибридных оптоэлектронных устройств.

1. A. Kuznetsov et al., *Small Struct.*, **6**, 2400476 (2025).

МОДЕЛЬ НЕЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ КИНЕТИКИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НАНОКРИСТАЛЛОВ CsPbBr₃ В СТЕКЛЯННОЙ МАТРИЦЕ

Полупроводники на основе перовскитов из галогенидов свинца перспективны для создания светоизлучающих устройств и поэтому их фундаментальные свойства активно изучаются. В работе [1] изучена кинетика фотолюминесценции (ФЛ) нанокристаллов (НК) CsPbBr₃ во фторфосфатном стекле при температурах T от 4 до 300 К. Обнаружена долгоживущая компонента ФЛ, время жизни которой быстро сокращается с ростом температуры образца. Нами предложена теоретическая модель, описывающая этот эффект. Предполагается, что медленная компонента ФЛ обусловлена рекомбинацией электронов, захваченных ловушками на поверхности НК, с дырками, локализованными внутри НК. С ростом температуры происходит переброс электронов через полярный барьер в НК и их быстрая рекомбинация с дырками. Этот процесс описывается формулой:

$$I_s(t) = a_2 \int_{E_s}^{\infty} \exp \left[-\frac{E}{a_U} - \frac{E}{kT} - \left(\frac{e^{-\frac{E}{kT}}}{\tau_2} \right) t \right] dE. \quad (1)$$

Здесь E_s – минимальная энергия локализации электронов ловушками, a_U характеризует энергетическое распределение ловушек («хвост» Урбаха), τ_2 – характерное время переброса

электронов через полярный барьер. Пример кинетики ФЛ и ее моделирования показан на рис. 1. Видно, что теоретическая кривая хорошо описывает очень быстрое (неэкспоненциальное) затухание ФЛ. Установлено, что два параметра могут быть фиксированы: $a_U = 9.6$ мэВ, $\tau_2 = 0.17$ нс. Зависимость E_s от температуры (см. вставку на рис. 1) хорошо подгоняется прямой с наклоном $a_1 = 0.16$ мэВ/К. Этот наклон вдвое меньше, чем скорость сдвига полосы ФЛ с ростом температуры. Полученный результат позволяет предположить, что поверхностные ловушки привязаны к матрице стекла и не сдвигаются по энергиям с ростом температуры.

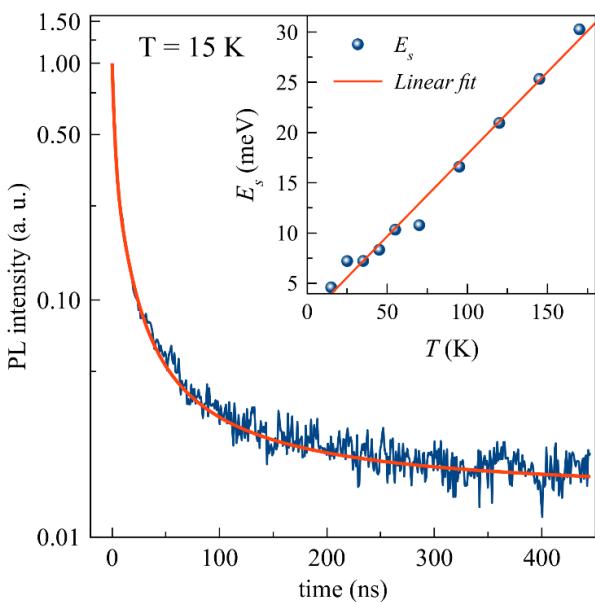


Рис. 1. Пример кинетики ФЛ и ее моделирования

1. E.V. Kulebyakina et al., *Phys. Rev. B*, **109**, 235301 (2024).

Н.А. Петухов (студ., 4 курс бак., СПбГУ, каф. ФТТ(SOLAB)),
 М.Н. Батаев (асп., 4 год, СПбГУ, каф. ФТТ(SOLAB)),
 М.С. Кузнецова (к.ф.-м.н., доц., СПбГУ, каф. ФТТ(SOLAB))

КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ CsPbBr_3 И CsPbI_3 , СФОРМИРОВАННЫХ ВО ФТОРФОСФАТНОМ СТЕКЛЕ

Нанокристаллы (НК) метал-галлогенидных перовскитов обладают богатыми оптическими свойствами [1–3] и активно исследуются в последние годы. НК, инкапсулированные во фторфосфатную (ФФ) стеклянную матрицу, обладают повышенной устойчивостью к внешнему физическому и химическому воздействию, в отличие от их коллоидных аналогов. Для изучения оптических свойств НК важно определять их размер. Сравнение теоретических значений квантово-размерных уровней в рамках простейшей модели с экспериментально наблюдаемыми в спектрах возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) позволяет решить эту задачу.

В данной работе представлено исследование спектров возбуждения ФЛ НК CsPbBr_3 , CsPbI_3 выращенных в ФФ стекле, при температуре $T = 12$ К. На рис. 1 приведен спектр ФЛ (сплошная линия) и возбуждения ФЛ (пунктир) НК CsPbI_3 . На вставке точками изображены энергии уровней размерного квантования, полученные из эксперимента, в зависимости от размера НК. Сплошными линиями показаны кривые, соответствующие энергиям переходов между квантово-размерными уровнями электрона и дырки в сферической квантовой точке с бесконечными стенками.

Также было проведено моделирование контура спектра ФЛ. В результате средние размеры НК CsPbI_3 , CsPbBr_3 равные 14.5 нм и 13.2 нм соответственно, что хорошо согласуется с результатами, полученными с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

1. X. Li et al., *Adv. Funct. Mater.*, **26**, 2435 (2016).
2. S. Yakunin et al., *Nature*, **6**, 8056 (2015).
3. P. Ramasamy et al., *Chem. Commun.*, **52**, 2067–2070 (2016).

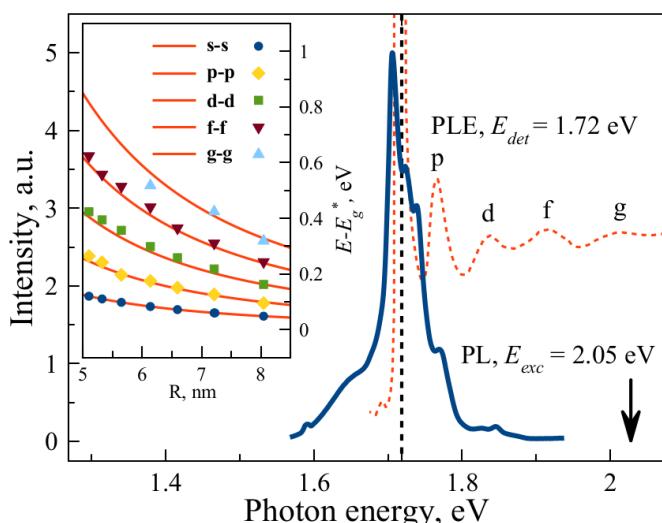


Рис. 1. Спектры ФЛ (сплошная линия) и возбуждения ФЛ (пунктир) НК CsPbI_3 . На вставке показана зависимость энергии состояний от радиуса R НК. Маркеры – эксперимент, сплошные линии – расчет

БРЭГГОВСКИЙ РЕЗОНАНС В УПОРЯДОЧЕННОМ НАНОКОМПОЗИТЕ Bi/GaAs

Локализованный поверхностный плазмонный резонанс позволяет сконцентрировать электромагнитное поле на субволновых масштабах и усилить взаимодействие света с веществом. В полупроводниках это явление можно реализовать, если создать систему плазмонных наночастиц в полупроводниковой матрице. Для дополнительного усиления эффекта систему можно сделать периодической так, чтобы в области плазмонного резонанса реализовывался еще и брэгговский резонанс.

Исследованные образцы получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

На рис. 1 представлены полученные спектры оптического отражения образца в окне прозрачности GaAs при углах падения света от 27.5° до 80° с шагом 2.5° при Р-поляризации. Максимум отражения демонстрирует спектральный сдвиг в область коротких длин волн при увеличении угла падения света. Такое поведение свойственно брэгговскому максимуму отражения.

Спектры отражения демонстрируют брэгговский пик в области 870–880 нм.

Для описания диэлектрической функции материала матрицы GaAs использовалась известная модель Адачи [1]. Данные о диэлектрических свойствах металлических нановключений Bi были взяты из работы Ушанова и др. [2]. Отклик двумерного слоя, состоящего из таких частиц, рассчитывался с помощью модели Перссона-Либша [3]. Моделирование спектров отражения было выполнено с помощью метода матриц переноса.

Показана принципиальная возможность реализации брэгговского резонанса в гибридной системе наночастиц Bi/GaAs в спектральной области, близкой к краю прозрачности полупроводника. Это открывает перспективы создания интегральных плазмонных устройств на основе висмута – материала, полностью совместимого с существующей полупроводниковой технологией.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда № 24-22-20012, <https://rscf.ru/project/24-22-20012/>.

1. S. Adachi, *J. Appl. Phys.*, **58**, R1–R29 (1985).
2. V.I. Ushanov et al., *Nanomaterials*, **14**, 109 (2024).
3. B.N.J. Persson, A. Liebsch, *Phys. Rev. B*, **28**(8), 4247 (1983).

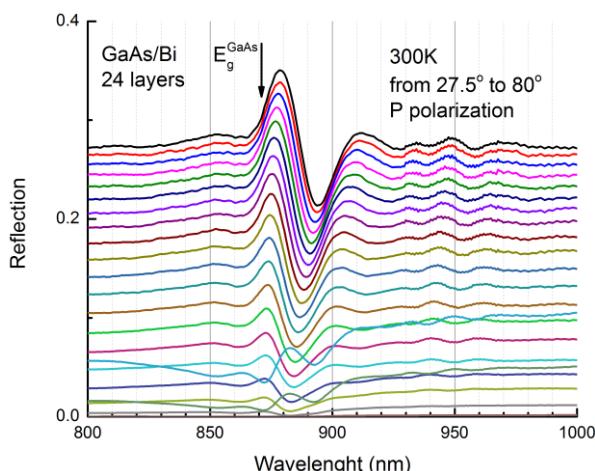


Рис. 1. Экспериментальные спектры отражения света от 24 слоёв наночастиц висмута в матрице арсенида галлия при Р-поляризации и температуре 300 К

А.Д. Родиончикова (студ., 1 курс маг., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. БОЭ),
М.С. Дунаевский (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ СЛОЁВ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ (MoTe₂, WSe₂) МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Двумерные материалы (2D), такие как дихалькогениды переходных металлов, обладают уникальными свойствами, которые значительно отличаются от свойств объёмных материалов и зависят от количества слоёв [1]. Эти особенности открывают большие перспективы для создания оптоэлектронных устройств и ван-дер-ваальсовых гетероструктур, позволяющих комбинировать различные материалы, что расширяет функционал устройств. Важным параметром, определяющим электронные свойства таких структур, является работа выхода, которая может зависеть как от толщины материала, так и от приложенной деформации.

В настоящей работе методами сканирующей зондовой микроскопии, в том числе с использованием метода Кельвин-зонд микроскопии, проведено исследование зависимости работы выхода от количества слоёв в тонких чешуйках MoTe₂ и WSe₂ на подложке Graphene/SiC. Показано, что работа выхода в тонких слоях MoTe₂ и WSe₂ изменяется с толщиной на 40–50 мэВ. По мере увеличения толщины это значение выходит на насыщение, приближаясь к работе выхода объёмного материала. Качественно эти результаты согласуются с данными DFT-расчётов, приведёнными в литературе.

Кроме того, для ряда перенесённых чешуек MoTe₂ наблюдалась области сильных изгибов. Обнаружено, что значения поверхностного потенциала в деформированных областях существенно отличаются от потенциала на недеформированных участках. Величина деформационного потенциала составила ~40 мВ на 1% деформации, что согласуется с результатами других исследований.

Таким образом, результаты проделанной работы показывают, что путём варьирования числа слоёв дихалькогенидов переходных металлов и внесения деформаций можно управлять электронными свойствами материала. Полученные данные важны для разработки оптоэлектронных устройств на основе ван-дер-ваальсовых гетероструктур.

1. K.S. Novoselov et al., *Science*, **353**, aac9439 (2016).

Ш.Р. Сайтов (к.ф.-м.н., н.с., МГУ им. М.В. Ломоносова),
Г.О. Снигирев (студ., 5 курс спец., МГУ им. М.В. Ломоносова),
А.М. Смирнов (д.ф.-м.н., доцент, МГУ им. М.В. Ломоносова)

ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛОВУШКИ В ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЕ ПЛЕНКИ НАНОПЛАСТИНОК CdSe/CdS

Двумерные полупроводниковыеnanoструктуры, нанопластины (НП) – одни из наиболее перспективных типов материалов для оптоэлектронных устройств. Среди них НП на основе халькогенидов кадмия с гетероструктурой типа ядро-оболочка имеют особое значение благодаря их оптическим и фотоэлектрическим свойствам. Благодаря методу атомно-слоевого роста в коллоидном растворе [1] толщина ядер и оболочек гетероструктурных НП могут контролироваться с точностью до одного атомного слоя. Эта особенность позволяет, например, получить гетероструктурные НП с различным положением пиков люминесценции во всём видимом диапазоне излучения. НП CdSe/CdS типа ядро-оболочка обладают такими свойствами, как большое сечение поглощения, узкая ширина линии люминесценции (менее 65 мэВ), короткое время люминесценции (меньше 1 нс), высокий квантовый выход излучения и низкий темп Оже-рекомбинации, что делает их перспективным материалом для изготовления лазеров, светодиодов и фотодетекторов [2]. В свою очередь, проводимость пленок НП определяется их латеральными размерами и свойствами используемых при синтезе молекул лигандов, в частности длиной молекул-лигандов. Для повышения проводимости пленки НП используют лиганды с наименьшей длиной молекул.

В данной работе представлено исследование пленки НП с гетероструктурой типа ядро-оболочки CdSe/CdS. Пленка была получена из коллоидного раствора НП, стабилизованных молекулами олеиновой кислоты (ОК). После нанесения пленки молекулы ОК были удалены с помощью отжига в вакууме. Это привело к увеличению фоточувствительности материала вплоть до 4 порядков величины на всем видимом диапазоне излучения [2]. В то же время, удаление молекул-лигандов приводит к появлению ловушек для носителей заряда в запрещенной зоне. Измерения температурных зависимостей проводимости и термостимулированных токов позволили оценить свойства этих ловушек. Анализ данных зависимостей показал, что частота высвобождения носителей заряда с соответствующими состояниями порядка $v_0 \approx 1.5 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$, а распределение уровней ловушек может быть описано гауссовым пиком с максимумом в области $E_t \approx -0.35 \text{ эВ}$ относительно дна зоны проводимости и шириной пика не более $\omega = 34 \text{ мэВ}$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-72-10008.

1. B.M. Saidzhonov et al., *J. Lumin.*, **209**, 170–178 (2019).
2. S.R. Saitov et. al., *ACS Photonics*, **12**, 2088–2096 (2025).

СВЕРХБЫСТРЫЕ ПРОЦЕССЫ РЕКОМБИНАЦИИ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ
НАНОКРИСТАЛЛОВ CsPbBr_3 РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРОВ

Неорганические галогеднидные перовскиты представляют практический интерес благодаря их уникальным оптическим и электронным свойствам. Высокий квантовый выход излучения, низкие пороги лазерной генерации и возможность прецизионного изменения длины волн фотоэмиссии посредством вариации состава делают эти материалы очень перспективными для разработки эффективных светоизлучающих устройств и лазеров. Механизм возникновения инверсной населенности в нанокристаллах перовскита до сих пор остается плохо изученным в силу большого количества рекомбинационных процессов, протекающих с разными скоростями, зависящих от размера нанокристаллов и количества дефектов на их поверхности.

Целью данной работы является изучение сверхбыстрых процессов рекомбинации в тонких пленках нанокристаллов CsPbBr_3 различных размеров. Для всестороннего исследования этих процессов был реализован метод спектроскопии переходного поглощения (Transient Absorption Spectroscopy – TAS). В отличие от более часто используемого TRPL (Time-Resolved Photoluminescence), разрешение которого составляет десятки наносекунд, данный метод позволяет получить временное разрешение порядка единиц пикосекунд, что открывает возможности детального изучения процессов Оже-рекомбинации и лазерной генерации.

В ходе работы были синтезированы образцы тонких пленок нанокристаллов CsPbBr_3 различного размера, содержащие различное количество поверхностных дефектов. Для всех образцов пик фотолюминесценции приходится на спектральную область 500–505 нм, обусловленный межзонным переходом, который определяется составом нанокристаллов, но не их размером. При этом, в образцах с большим количеством дефектов предварительные данные TAS свидетельствуют о наличии экситонного просветления в спектральном диапазоне 440–460 нм. Такие нанокристаллы также демонстрируют меньшее время затухания фотолюминесценции и, соответственно, меньший квантовый выход. Однако, лазирование и проявление усиленной спонтанной люминесценции происходит именно в образцах, в которых наблюдается эффект экситонного просветления. Также были получены характерные кинетики затухания фотолюминесценции в масштабе десятков пикосекунд. Эти данные являются заделом для дальнейшего исследования Оже и других рекомбинационных процессов в нанокристаллах перовскита.

НЕПАРАБОЛИЧЕСКАЯ ДИСПЕРСИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В НАНОКРИСТАЛЛАХ ПЕРОВСКИТОВ

В настоящее время ведутся активные исследования оптических свойств нанокристаллов (НК) свинцово-галоидных перовскитов CsPbX_3 (см., например, [1–3]). Эти НК представляют собой перспективный материал для реализации фотоэлектрических элементов и других видов полупроводниковых устройств. При этом до сих пор не существует полноценной модели, описывающей зонную структуру этих перовскитных НК. Это, в свою очередь, не позволяет полноценно описывать их оптические свойства.

В данной работе построена модель, описывающая энергетические спектры электрона и дырки в НК CsPbI_3 диаметром от 5 нм до 10 нм в фторфосфатном стекле. Продемонстрирована сильная непараболичность дисперсионных зависимостей и анизотропия эффективной массы носителей заряда. Дисперсионные зависимости энергии от волнового вектора вычислены методами теории функционала плотности (DFT). На рис. 1 точками обозначены результаты этого вычисления для дырки (верхние панели) и электрона (нижние панели). Они

аппроксимированы аналитическими выражениями с использованием модели эффективной массы (сплошные кривые). При этом эффективные массы параметрически зависят от волнового вектора \mathbf{k} . Это обусловлено сильной непараболичностью дисперсии носителей заряда в НК CsPbI_3 . Таким образом, удается получить аналитическое описание непараболических дисперсионных зависимостей (левая часть рисунка) и

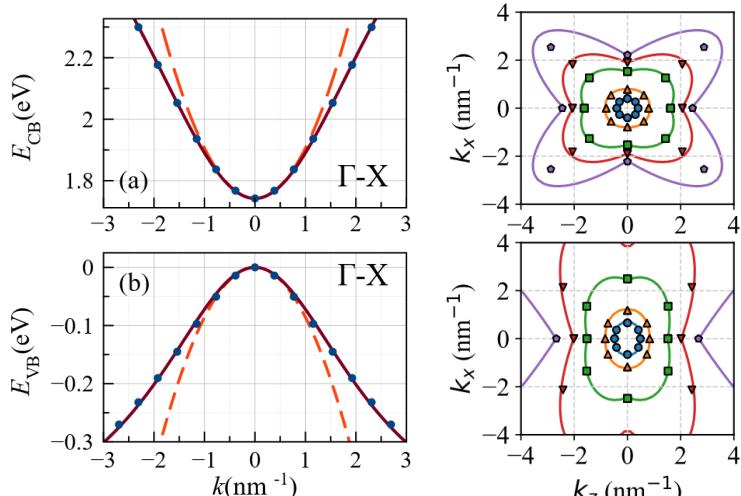


Рис. 1. Результаты расчетов и их аппроксимация

анизотропии эффективных массы, которая выражается в анизотропии поверхностей постоянной энергии (правая часть рисунка). Это описание позволяет построить гамильтониан, для носителей заряда в CsPbI_3 . Полученный гамильтониан будет использован для нахождения квантово-размерных уровней для различных размеров НК и дальнейшего сравнения с экспериментальными данными.

1. S. Pathak et al., *Chem. Mater.*, **27**, 8066 (2015).
2. D. Wang et al., *Nanoscale*, **8**, 11565 (2016).
3. F.O. Saouma et al., *Nature Commun.*, **8**, 742 (2017).

Д.А. Татаринов (м.н.с., ИТМО, Сколтех),
Е.В. Сапожникова (асп., 4 год, ИТМО, Сколтех),
А.П. Пушкарев (к.х.н., в.н.с., Сколтех)

ПЕРОВСКИТНЫЕ НИТЕВИДНЫЕ МИКРОКРИСТАЛЛЫ,
ГЕНЕРИРУЮЩИЕ ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В КРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

Перовскитные кристаллы обладают рядом выдающихся свойств, такие как низкая концентрация дефектов решетки, высокий коэффициент оптического поглощения и высокий квантовый выход люминесценции при комнатной температуре [1]. Также они могут быть созданы в виде резонансных микроструктур различной формы, которые способны генерировать лазерное излучение [2]. Для неорганических перовскитных кристаллов состава CsPbBr_3 настройка спектра излучения проще всего осуществляется путем частичной замены галогена. Так, введение ионов Cl^- или I^- вместо Br^- приводит к сдвигу спектра люминесценции в синюю или красную область, соответственно. Однако в связи с высокой подвижностью ионов иода смешанные кристаллы такого состава очень нестабильны и при продолжительной оптической накачке спектр люминесценции может сдвигаться на десятки нм [3].

В настоящей работе были получены перовскитные нитевидные микрокристаллы (НМК) состава $\text{CsPb}(\text{Br},\text{I})_3$, излучающие в диапазоне 605–620 нм. НМК были созданы методом сублимации путем переосаждения перовскитных кристаллов с подложки-источника на слюдяную подложку при температуре 520°C и дополнительного напыления на сформированные структуры иодида свинца. В результате были получены структуры типа ядро-оболочка, (перовскит-иодид свинца) что позволило минимизировать миграцию ионов иода внутри кристалла. Наличие оболочки было подтверждено на изображениях сканирующей электронной микроскопии, а также косвенно присутствием дополнительного пика люминесценции на длине волны 680 нм. При накачке одиночного НМК фемтосекундным лазерным излучением были получены спектры лазерной генерации, а также изучена стабильность спектров люминесценции во времени.

Для перовскитных НМК $\text{CsPb}(\text{Br},\text{I})_3$ впервые полученных методом сублимации была продемонстрирована лазерная генерация с порогом порядка 1 мВт/см². Длина волны пика люминесценции при этом оставалась неизменной в течение часа при накачке выше 1.5 порога, что является важным результатом для создания стабильных перовскитных кристаллов излучающих в красном диапазоне.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 24-73-10072).

1. A. Dey et al., *ACS nano*, **15**, 10775–10981 (2021).
2. Y. Shi et al., *Adv. Mater.*, 2413559 (2025).
3. M. Brennan et al., *ACS Energy Lett.*, **1**, 204–213 (2017).

Д.Н. Тонков (ст. преп., СПбПУ, кафедра физики),
В.Э. Гасумянц (д.ф.-м.н., проф., СПбПУ, ВИФШ),
И.Д. Веневцев (к.ф.-м.н., доц., СПбПУ, кафедра физики),
Н.А. Грозова (инж., СПбПУ, Лаборатория ПКМ, ПИШ ЦИ),
И.А. Кобыхно (к.т.н., зав. лаб., СПбПУ, Лаборатория ПКМ, ПИШ ЦИ)

ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ И СПЕКТРЫ ПРОПУСКАНИЯ
В ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК
И ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИУРЕТАНА

Полимерные композиты применяются в качестве альтернативы традиционным материалам с середины прошлого века, однако только в последнее время композиционные материалы стали интересны в качестве материалов для наноэлектроники [1]. Особый интерес представляют композиты с углеродными нанотрубками (УНТ) в качестве наполнителя, поскольку УНТ улучшают не только проводящие, но и механические свойства полимерной матрицы [2]. Помимо этого, полимерные композиты проявляют свойства некристаллических твердых тел: проводимость в них при низких содержаниях наполнителя осуществляется по прыжковому механизму. При этом в различных температурных диапазонах прыжковая проводимость может реализовываться по различным механизмам (по ближайшим соседям, моттовский механизм, механизм Эфроса-Шкловского) [3].

В настоящей работе проведено исследование проводящих и оптических свойств полимерных нанокомпозитов на основе матрицы из термопластичного полиуретана (ТПУ) и одностенных УНТ при их различном содержании. Из анализа концентрационных и температурных зависимостей удельного сопротивления определен порог переколяции (0.04 масс. % УНТ) и размерность сформированной в композите проводящей сетки, а также сделан вывод о реализации в температурном диапазоне 77–250 К моттовского механизма прыжковой проводимости, при этом температурный параметр Мотта уменьшается с ростом содержания УНТ в композите. По построенным из данных по пропусканию спектрам поглощения определена оптическая ширина запрещенной зоны с учетом возможного наличия прямых и непрямых оптических переходов, которая уменьшается от ~3.4 эВ для чистого ТПУ до ~1 эВ для композита, содержащего с 0.75 масс. % УНТ. Кроме того, обнаружено, что при содержании УНТ, большем 0.05 масс. % появляется дополнительный пик поглощения, соответствующий переходам в область локализованных состояний [4], положение и форма которого зависит от содержания УНТ. Проведен совместный анализ результатов, полученных из исследований оптических и проводящих свойств.

1. S.S. Godara et al., *Mat. Today: Proceedings*, **44**, 2674 (2021).
2. S.K. Soni et al., *Mat. Today Comm.*, **37**, 107358 (2023).
3. R.M. Rudenko et al., *Mat. Lett.*, **350**, 134976 (2023).
4. B. Zaidi et al., *Polymers*, **14**, 1093 (2022).

Е.А. Чепуров, А.С. Маракулин (студ., 4 курс бак., МФТИ),
М.И. Пауков, Н.В. Пак (студ., МФТИ),
А.Р. Иштеев, О.В. Шаповалова (к.ф.-м.н., ФИЦ ХФ РАН),
Г.А. Командин (д.ф.-м.н., ИОФ РАН),
А.А. Арсенин (к.ф.-м.н., МФТИ),
М.Г. Бурданова (к.ф.-м.н., МФТИ, ИФТТ РАН)

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРА УПОРЯДОЧЕННОСТИ В МНОГОСЛОЙНЫХ ВЫРОВНЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРАГЕРЦОВОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Пленки из выровненных углеродных нанотрубок (УНТ) обладают уникальными анизотропными оптическими свойствами, что делает их весьма перспективными для применения в фотонике и оптоэлектронике [1]. Электромагнитный отклик этих пленок сильно зависит от поляризации в широком спектральном диапазоне, от терагерцового до видимого диапазона длин волн. Легирование таких плёнок ионной жидкостью позволяет регулировать плотность и подвижность носителей заряда [2], что напрямую влияет на оптоэлектронные свойства. Основываясь на правилах отбора поглощения экситонов и эффекте деполяризации, были обнаружены значительные различия в коэффициенте пропускания для падающих пучков, поляризованных параллельно и перпендикулярно направлению нанотрубок. Для количественной оценки качества выравнивания был рассчитан параметр упорядоченности в диапазоне от 0.6 до 0.8 в зависимости от толщины образца. На выбранных длинах волн (510 нм, 580 нм, 650 нм и 720 нм) был проведен детальный анализ затухания, зависящего от угла поляризации, измеренный как функция угла между поляризацией терагерцового луча и направлением нанотрубок. Результаты показывают выраженные изменения пропускания, зависящие от поляризации, что подчеркивает потенциал разработки специализированных оптических фильтрующих и чувствительных устройств – поляризаторов. Разработка настраиваемых, широкополосных и экономичных ТГц-устройств остается серьезной проблемой, представляющей собой ключевое место в полном использовании ТГц-спектра.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 24-72-10039).

1. J. Kyoung et al., *Nano Lett.*, **11**(10), 4227–4231 (2011).
2. J. Jung et al., *Chem Eng. J.*, **438**, 135526 (2022).

И.А. Чуприн (студ., 1 курс маг., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, фак. ВШОПФ; ИФМ РАН),
М.В. Степихова (к.ф.-м.н., с.н.с., ИФМ РАН)

ОСОБЕННОСТИ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ И ТРИВИАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ В ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ С РЕШЕТКОЙ ТИПА “ПЧЕЛИНЫЕ СОТЫ”

Фотонные кристаллы (ФК) – это пространственно-периодические структуры, диэлектрическая проницаемость которых модулирована с периодом, сравнимым с длиной волны излучения [1]. Это приводит, по аналогии с электронами в полупроводниках, к формированию зонной структуры и, в том числе, фотонной запрещенной зоны, т.е. диапазона частот, в котором излучение не может распространяться в фотонном кристалле. До настоящего времени интерес к ФК был преимущественно обусловлен возможностями создания на их основе низкоразмерных резонаторов, обеспечивающих высокую степень локализации электромагнитного поля [2]. Резонаторами выступали дефекты ФК, представленные пропуском и/или сдвигом элементов ФК, формирующие уровни в запрещенной зоне [3].

В данной работе рассмотрен новый тип дефектов ФК, а именно – топологические дефекты (ТД). ТД представляют собой деформации решетки, характеризующиеся топологией реального пространства, которые не могут быть удалены посредством локальных непрерывных преобразований [4].

В работе рассматриваются фотонные кристаллы с решеткой отверстий типа «пчелиные соты», формируемые на кремниевых структурах сnanoостровками Ge(Si). Анализируемые топологические дефекты представлены поворотом сегмента решетки фотонного кристалла на 90° вокруг своей оси. Как показали авторы [5], такие дефекты устойчивы к неточностям изготовления. В данной работе представлены результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований такого типа дефектов в сравнении с тривиальными дефектами, формируемыми пропуском отверстий ФК. Расчеты выполнялись методом конечных элементов в частотной области с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics. Показано, что в рассматриваемых нами ТД возможно формирование высокодобротных мод ($Q_{\max} \sim 5000$) с высокой степенью локализации электромагнитного поля в области дефекта. Такие моды проявляются в спектрах микро-фотолюминесценции в виде узких резонансных линий, интенсивность которых существенно (в 6 и более раз) превышает интенсивность сигнала, измеряемого в самом фотонном кристалле.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант 25-22-00386).

1. J.D. Joannopoulos et al., *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. – Princeton University Press, 2007. – 304 p.
2. O. Painter et al., *Science*, **284**, 1819 (1999).
3. M. El Kudri et al., *Opt. Express*, **16**, 8780 (2008).
4. Z.-K. Lin et al., *Nat. Rev. Phys.*, 2023, **6**, 149 (2023).
5. E.O. Smolina, M.V. Stepikhova, *Phys. Status Solidi (RRL)*, 2400247 (2024).

А.М. Шенцев (студ., 2 курс маг., МФТИ, ПТФ),
М.М. Глазов (д.ф.-м.н., г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

КОНВЕРСИЯ МЕЖДУ ЭКСИТОНАМИ И ТРИОНАМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТОМАРНО-ТОНКИХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

В монослоях дихалькогенидов переходных металлов ярко проявляются многочастичные кулоновские комплексы с большими энергиями связи [1]. В частности, в оптических спектрах таких систем наблюдаются как нейтральный экситон (X), представляющий собой связное состояние электрона и дырки, так и заряженные экситоны – трионы: трехчастичные комплексы, где к экситону присоединяется электрон из зоны проводимости (X^- -трион) или дырка из валентной зоны (X^+ -трион) [2]. Энергия связи триона составляет в таких системах 20–30 мэВ и находится в терагерцовом (ТГц) диапазоне излучения. В недавней экспериментальной работе [3] была продемонстрирована конверсия X^- -трионов в экситоны под действием коротких ТГц импульсов в монослое MoSe_2 .

Цель данной работы – предложить теоретическое описание эффекта, учитывающее корреляции между экситонами, трионами и морем Ферми резидентных носителей заряда. Эти корреляции учитываются в рамках подхода, предложенного Р.А. Сурисом [4]. Показано наличие двух механизмов конверсии. Первый из них – прямой процесс поглощения ТГц фотона с соответствующим «отрывом» электрона от триона. Темп таких переходов вблизи порога описывается законом $(\hbar\omega - |E_{FP}|)^{3/2}$, где E_{FP} – энергия триона с учетом его взаимодействия с морем Ферми. Учет спектрального уширения, вызванного беспорядком и рассеянием на фононах, сглаживает порог поглощения и замывает эффект от корреляций. Второй механизм – косвенный, он обусловлен разогревом электронного газа за счёт друде-поглощения терагерцового импульса, что приводит к диссоциации трионов в результате их столкновений с горячими электронами. Темп косвенного процесса экспоненциально зависит от температуры и становится сопоставимым с темпом прямой конверсии при разогреве носителей заряда до температур выше 50 К [5].

Работа частично поддержана грантом РНФ 23-12-00142.

1. М.В. Дурнев, М.М. Глазов, *УФН*, **188**, 913–934 (2018).
2. М.А. Семина, Р.А. Сурис, *УФН*, **192**, 121–142 (2022).
3. T. Venanzi et al., *Nature Photonics*, **18**, 1344 (2024).
4. R.A. Suris et al., *Phys. Status Solidi (b)*, **227**, 343–352 (2001).
5. A.M. Shentsev, M.M. Glazov, arXiv:2509.15708 (2025).

ПРИБОРЫ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.315.592

Д.С. Артееев (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, НТЦ микроэлектроники РАН),
А.В. Сахаров, А.Е. Николаев, Е.Е. Заварин, С.Н. Родин (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, НТЦ
Микроэлектроники РАН),
А.Ф. Цацульников (д.ф.-м.н., НТЦ Микроэлектроники РАН)

ОПТИМИЗАЦИЯ AlGaN/GaN ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ ТРАНЗИСТОРОВ С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ

Транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе III-N гетероструктур активно внедряются в современную электронику. Нитрид галлия существенно превосходит кремний и традиционные III-V соединения по напряжению пробоя и термостабильности, что обеспечивает работу при высоких мощностях. Ключевым элементом гетероструктуры с GaN каналом является барьерный слой AlGaN. В стандартных структурах его толщина и содержание алюминия составляют ~20–30 нм и ~20–30%, что обеспечивает хорошее качество и воспроизводимость при производстве. Однако развитие электронной компонентной базы приводит к необходимости создания новых типов структур. Например, переход к более высоким частотам требует структур с тонкими барьерными слоями. Для одних применений важно низкое сопротивление транзистора, для других – высокий рабочий ток, что делает необходимой оптимизацию толщины и состава барьерного слоя с учётом реальных технологических ограничений.

Зависимость концентрации двумерного газа N_{2D} от толщины и состава AlGaN барьера в структуре AlGaN/AlN/GaN была рассчитана путём самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шрёдингера [1]. Номинально бинарный слой AlN задавался как $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ для учёта непреднамеренного встраивания атомов галлия. Зависимость подвижности электронов от N_{2D} была аппроксимирована на основе [2]. В результате расчётов найдены оптимальные с точки зрения минимального R_s значения толщины барьераного слоя в широком диапазоне составов (рис. 1). Для расчёта насыщенного тока стока была использована простейшая оценка $I_D = e \cdot N_{2D} \cdot V_S$, где зависимость насыщенной скорости электронов V_S (N_{2D}) была взята из работы [3]. I_D , в отличие от R_s не имеет оптимума по толщине или составу барьера («чем больше – тем лучше»), и ограничен механическими напряжениями в слое AlGaN.

1. D.S. Arteev et al., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2103**, 012202 (2021).
2. D.S. Arteev et al., *St. Petersb. Polytech. Univ. J.: Phys. Math.*, **18**, 46 (2025).
3. S. Bajaj et al., *Appl. Phys. Lett.*, **107**(15), 153505 (2015).

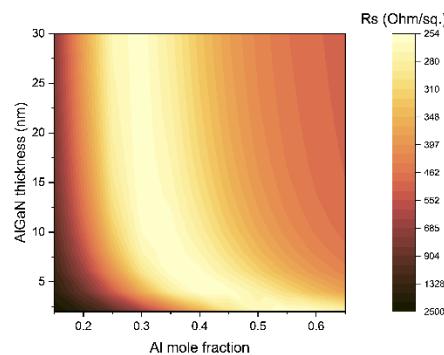


Рис. 1. Зависимость слоевого сопротивления от толщины и состава барьерного слоя AlGaN

УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЛН В КЛИНОВИДНОМ ВОЛНОВОДЕ С ДИФФУЗИОННО НАКАЧИВАЕМЫМ ГРАФЕНОМ

Управление скоростью электромагнитных и плазменных волн является важным при разработке и оптимизации сложных приборов терагерцовой (ТГц) плазмоники, например, модуляторов и фазовращателей [1]. Графен – двумерный материал с нулевой шириной запрещённой зоны и линейным спектром носителей заряда [2]. Терагерцевая графеновая плазмоника является интенсивно развивающимся направлением [3], вследствие более сильного взаимодействия плазмонов с графеном в сравнении с электромагнитными волнами [4].

В работе теоретически изучено управление фазовой скоростью ТГц плазменных волн в клиновидном волноводе с диффузионно накачиваемым графеном. Собственный (нелегированный) графен помещен на клиновидную полупроводниковую подложку, экранированную металлом. Рассмотрено распространение ТГц плазмонов в сторону вершины клиновидного волновода. Металл обеспечивает сильную локализацию плазмонного поля вблизи графена. Амбиполярная диффузия фотовозбужденных в клиновидной подложке электрон-дырочных пар создает градиент концентрации носителей заряда в графене.

Показано, что скорость ТГц плазменных волн во входном сечении клиновидного волновода может быть точно согласована со скоростью достаточно быстрых (с фазовой скоростью 0.07 от скорости электромагнитной волны на той же частоте) ТГц плазмонов, которые могут быть возбуждены вблизи входного сечения клиновидного волновода призмой в режиме полного внутреннего отражения. Быстрые плазмоны эффективно замедляются (фазовая скорость уменьшается приблизительно на порядок величины) при распространении в сторону вершины клиновидного волновода. Замедление ТГц плазмонов в рассматриваемой клиновидной структуре обусловлено двумя причинами: во-первых, увеличением экранирования плазмонов металлом вблизи вершины клиновидного волновода, аналогично [5], а во-вторых, созданием в графене градиента концентрации носителей заряда (концентрация электрон-дырочных пар в графене уменьшается в сторону вершины структуры). Создание такого градиента концентрации в рассматриваемом клиновидном волноводе приводит к дополнительному замедлению ТГц плазмонов, аналогично [6].

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 24-22-00114.

1. H. Su et al., *Nanomaterials*, **13**, 795 (2023).
2. K.S. Novoselov et al., *Science*, **306**, 666 (2004).
3. A.N. Grigorenko et al., *Nature Photon.*, **6**, 749 (2012).
4. F.H. L. Koppens et al., *Nano Lett.*, **11**, 3370 (2011).
5. M.Yu. Morozov, V.V. Popov, *J. Phys. Condens. Matter*, **31**, 34LT02 (2019).
6. М.Ю. Морозов и др., *ФТП*, **55**, 518 (2021).

ДИФРАКЦИЯ НА ЭКСИТОННОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКЕ НА ОСНОВЕ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ MAPbI₃

В работе исследуются дифракционные оптические элементы (ДОЭ) на основе материального резонанса экситонов (Х) в полупроводниках, объединяющие в себе возможности традиционных ДОЭ с возможностью выделения узкого спектра излучения, резонансного Х в исследуемом материале. Объектом исследований являются дифракционные решетки (ДР) с периодом 4.4 мкм размером 250×250 мкм, созданные путем облучения сфокусированным электронным пучком с энергией 10 кэВ. Полупроводниковым материалом для ДОЭ является тонкая поликристаллическая пленка галогенидного перовскита MAPbI₃ ($MA^+ = CH_3NH_3^+$). Спектроскопическое исследование такой тонкой пленки показывает наличие резонанса Х в диапазоне 1.64–1.60 эВ [1].

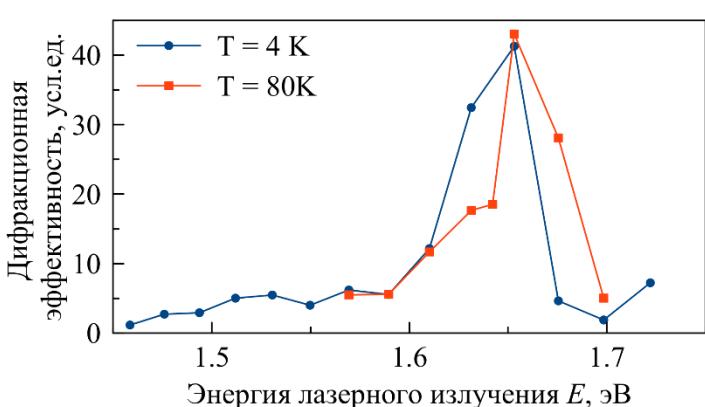


Рис. 1. Зависимость эффективности дифракции от энергии лазерного излучения

1.644 эВ ($T = 4$ К) ее эффективность достигает максимума, и падает практически до нуля при отстройке от резонанса более чем на 0.02 эВ. При $T = 80$ К максимум сдвигается в 1.653 эВ.

Резонансная дифракция связана с периодической пространственной модуляцией резонанса Х в пленке MAPbI₃, что подтверждается совпадением положения максимума дифракционной эффективности с положением резонанса Х в материале, и синим сдвигом при росте температуры. При этом, электронное облучение не приводит к изменению рельефа образца, поэтому обычной (нерезонансной) дифракции не возникает.

Работа выполнена на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Нанофотоника» за счет гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда № 25-12-20007. Благодарим Университет ИТМО за предоставленный образец.

1. I.A. Solovev et al., *Adv. Optical Mater.*, **12**, 2303049 (2024).

Исследования дифракции непрерывного лазерного излучения на решетке проводились в гелиевом криостате замкнутого цикла. При освещении ДР параллельным пучком наблюдалась отражение, первый и второй порядки дифракции. При изменении энергии излучения наблюдалось изменение эффективности дифракции (рис. 1). При энергии

М.А. Бобров (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
С.А. Блохин (зав. лаб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
Я.Н. Ковач (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
А.А. Блохин (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
Н.А. Малеев (с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
А.Г. Кузьменков (н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
М.Н. Марчий (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
А.П. Васильев (инж., НТЦ Микроэлектроники и субмикронных гетероструктур)

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ШУМЫ ОДНОМОДОВЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ ДИАПАЗОНА 89Х НМ

Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) являются перспективным типом инжекционных лазеров для применения в компактных атомных сенсорах на основе щелочных металлов (квантовые стандарты частоты, квантовые магнетометры и гироскопы) [1]. К таким лазерам предъявляется специфический перечень жестких требований. В подавляющем большинстве работ, посвященных ВИЛ спектральных диапазонов 78Х/79Х нм и 85Х/89Х нм, внимание преимущественно сосредоточено на проблемах стабилизации состояния поляризации излучения, обеспечения требуемой оптической мощности в одномодовом режиме и/или быстродействию лазера при заданной температуре, в то время как вопросу анализа амплитудного шума или относительной интенсивности шума (англ. relative intensity noise, RIN) лазера в низкочастотной области уделено крайне мало внимания.

В настоящей работе приведены результаты исследования амплитудных шумов одномодовых ВИЛ спектрального диапазона 89Х нм на основе гибридного вертикального микрорезонатора с вертикальным выводом излучения вверх и инжекцией носителей заряда через внутрирезонаторные контактные слои и композиционные брэгговские решетки. Приборная конструкция описана в работе [2]. Поведение амплитудных шумов лазера в низкочастотной области при 20°С имеет вид, характерный для 1/f-шума, с переходом в белый шум при частотах выше 10 кГц. При увеличении температуры лазера до 80°С наблюдается аддитивный рост амплитудных шумов как при фиксированном рабочем токе, так и сравнимой оптической мощности. Зависимость амплитудных шумов от оптической мощности лазера имеет W-образный вид, что обусловлено ростом внутренней температуры лазера из-за саморазогрева. Тем не менее, уровень амплитудных шумов ВИЛ при выходной мощности более 0.2 мВт не превышает -120 дБ/Гц в диапазоне частот 1–100 кГц, что открывает широкие перспективы по применению разработанных ВИЛ в компактных квантовых сенсорах на основе атомов ¹³³Cs различного типа.

Исследования выполнены при частичной поддержке Минобрнауки (FFUG-2025-0006).

1. J. Kitching, *Appl. Phys. Rev.*, **5**(3), 031302 (2018).
2. S.A. Blokhin et al., *St. Petersburg. Polytech. Univ. J. – Phys. Math.*, **16**(3), 16–22 (2023).

УПРАВЛЕНИЕ МАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ СПИНОВЫХ СВЕТОДИОДОВ С ДЕЛЬТА-СЛОЕМ Mn ПУТЕМ ДЕЛЬТА-ЛЕГИРОВАНИЯ АКЦЕПТОРНОЙ ПРИМЕСЬЮ

Разбавленные магнитные полупроводники (РМП), в частности $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$, давно рассматриваются в качестве перспективных материалов для создания устройств на основе спин-зависимых эффектов [1]. Более сложным типом РМП является гибридная система, содержащая сверхтонкий слой $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ (дельта-слой Mn) и квантовую яму (КЯ) InGaAs/GaAs, разделенные тонким спейсерным слоем. Высокое кристаллическое качество квантовых ям, свободных от магнитной примеси, в сочетании с наличием спин-поляризованных носителей обеспечило регистрацию ряда спин-зависимых явлений, в частности, циркулярно-поляризованного излучения [2]. В данной работе проведено экспериментальное исследование взаимосвязи магнитных свойств дельта-слоя Mn и концентрации свободных носителей, локализованных вблизи него. Тип носителей заряда задавался введением дельта-слоя углерода (δ -C), являющегося акцепторной примесью для GaAs. Исследование магнитных свойств δ -Mn проводилось путем измерения циркулярно-поляризованной люминесценции в зависимости от конфигурации структур.

Исследованные образцы представляют собой спиновые светоизлучающие диоды (ССИД) на основе гетероструктур с КЯ InGaAs/GaAs, дельта-слоем C и дельта-слоем Mn. Положение δ -C относительно слоев структуры различалось для всех трех образцов: для образца 1 слой δ -C формировался в буферном слое GaAs на расстоянии 3 нм от КЯ; для образца 2 – непосредственно в центре КЯ, для образца 3 – в спейсерном слое GaAs на расстоянии 3 нм над КЯ.

Было исследовано влияние положения δ -C на магнитные свойства и циркулярно-поляризованную электролюминесценцию в исследуемых ССИД. Показано, что магнитные характеристики системы «КЯ InGaAs/GaAs – δ -Mn» и степень циркулярной поляризации электролюминесценции зависят от конкретного расположения углерода относительно δ -Mn и КЯ, что обусловлено образованием гибридной магнитной системы « δ -Mn + дырки», эффективность обменного взаимодействия в которой зависит от ее конкретной конфигурации. С точки зрения практических приложений представляет интерес локализация углеродного дельта-слоя в области КЯ, поскольку это обеспечивает увеличение степени поляризации излучения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-72-00047).

1. A.V. Kudrin et al., *Semicond. Sci. Technol.*, **35**(12), 125032 (2020).
2. M.V. Dorokhin et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**(24), 245110 (2008).

Е.А. Ермакова (асп., 1 год, БГУ, каф. ФПиНЭ),
Н.М. Горбачук (к.ф.-м.н., доц., БГУ, каф. ФПиНЭ),
Н.А. Поклонский (д.ф.-м.н., проф., БГУ, каф. ФПиНЭ),
С.В. Шпаковский (к.ф.-м.н., ОАО «ИНТЕГРАЛ»),
В.А. Скуратов (д.ф.-м.н., проф., ОИЯИ, ЛЯР)

ИНДУКТИВНЫЙ ИМПЕДАНС ДИОДОВ, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ВИСМУТА

Элементы с индуктивным импедансом применяются при создании генераторов, усилителей, фильтров электрических сигналов радиочастотного диапазона [1]. В интегральной схемотехнике в качестве элемента цепи с индуктивным импедансом используются пленочные металлические индуктивности [2], либо гираторы [3]. Из-за ограничения размеров микросхем индуктивность спиральных катушек редко превышает десятки мкГн/см². Имитация индуктивностей схемотехническими методами приводит к нерациональному использованию площади кристалла. Возможным направлением создания элементов интегральных и гибридных схем с индуктивным импедансом является использование эффектов отрицательной емкости, наблюдающихся, в частности, в облученных электронами и ионами диодах [4]. Это позволит в перспективе существенно повысить эффективность использования площади кристаллов в интегральной схемотехнике.

В работе проведено экспериментальное исследование частотных зависимостей импеданса кремниевых с p^+ - n -переходом, облученных высокоэнергетическими ионами висмута. Диоды изготавливались (ОАО «Интеграл», г. Минск) на пластинах КОФ-90. Диоды облучались ионами висмута с энергией 700 МэВ (ОИЯИ, г. Дубна). Флюенс облучения варьировался от 10^8 до 10^{10} см⁻². Для определения возможностей управления параметрами индуктивного импеданса одновременно с измерениями на переменном токе на диоды подавался постоянный ток смещения. Величина постоянного тока смещения варьировалась в диапазоне от 0 до 3 мА. Зарегистрированные зависимости действительной Z' и мнимой Z'' части импеданса от частоты использовались для построения эквивалентных схем замещения.

Установлено, что для облученных диодов наблюдается смена знака мнимой части импеданса с положительного на отрицательный и наоборот. Смена знака соответствует резонансу токов (или напряжений). Варьирование флюенса облучения позволяет изменять величину индуктивности и количество резонансов. Изменение величины постоянного тока позволяет управлять количеством резонансов и значением резонансных частот. Показано, что для адекватного описания частотной зависимости импеданса диодов, облученных ионами висмута флюенсом 10^9 см⁻², необходимо введение более двух элементов с реактивным импедансом и элемента постоянной фазы (СРЕ).

1. А.Г. Атабеков. Основы теории цепей. – СПб.: Лань, 2006. – 432 с.
2. J.N. Burghartz et al., Патент 5884990 США, МПК6 H01F 5/00; опубл. 23.03.1999.
3. B.D. Tellegen, *Philips Res. Rep.*, **3**, 81 (1948).
4. Н.А. Поклонский и др., *ФТП*, **40**, 824 (2006).

Е.П. Карасева (студ., 1 курс маг., СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова),
В.М. Кондратьев (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова),
М.В. Мишин (д.ф.-м.н., проф., СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова),
А.Д. Большаков (д.ф.-м.н., проф., СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, каф. ВМиФ)

АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ С КРЕМНИЕВЫХ МИКРООСТРИЙ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Явление автоэлектронной (полевой) эмиссии (АЭ) было открыто в 1897 году. С тех пор оно нашло свое применение во многих приборах. Однако все приборы, работающие на явлении АЭ, требуют высокого вакуума. В 2000-х годах, в свете активного развития полупроводниковых технологий, были разработаны методы уменьшения расстояния между катодом и анодом до длины свободного пробега электрона в среде и меньше. Таким образом, появилась возможность добиться практически полного отсутствия взаимодействия между молекулами среды и эмиттированными электронами, что привело к возможности применения этого эффекта при атмосферном давлении. Одновременно с этим, напряжение, необходимое для получения полевой эмиссии, снизилось с десятков киловольт в высоковакуумных системах до десятков вольт в микроструктурах. Сказанное делает актуальными исследования, направленные на разработку приборов, использующих явление автоэлектронной эмиссии в стандартных условиях [1].

В настоящей работе рассматривается структура, состоящая из массива кремниевых микроострий, созданного между хромовыми разделительными площадками методом плазмохимического травления. В качестве контакта-анода был использован золотой полосок, нанесенный на предметное стекло и размещаемый между хромовыми разделительными площадками. В созданной структуре наблюдалось явление АЭ при комнатной температуре и атмосферном давлении. Были исследованы характерные параметры, такие как площадь эмиссии, динамические изменения протекания эмиссионного тока. С целью объяснения обнаруженных явлений проведено моделирование с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. Определены параметры, при которых температура кремниевых микроострий достигает температуры плавления объемного кремния. По результатам моделирования обнаружено, что момент достижения этой температуры совпадает с возникновением на вольт-амперной характеристике области отрицательного дифференциального сопротивления.

На автоэлектронный ток влияет работа выхода электронов из материала, на которую, в свою очередь, влияют адсорбаты [2]. В настоящей работе также наблюдалось и было описано влияние адсорбции аммиака на автоэлектронные эффекты. Таким образом, была создана основа чувствительного элемента нового эмиссионного типа газовых сенсоров.

1. Г.А. Месяц, М.И. Яландин, УФН, **189**, 747–751 (2019).

Я.Н. Ковач (асп., 3 год, Университет ИТМО, м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
С.А. Блохин (к.ф.-м.н., зав. лаб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
А.В. Бабичев (к.ф.-м.н., н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

МИКРОЛАЗЕРЫ С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ НА ОСНОВЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО МИКРОРЕЗОНАТОРА

Массив дифракционно-связанных (ДС) поверхностно-излучающих лазеров является одной из концепций оптических резервуарных вычислений (РВ). В качестве источников излучения, обеспечивающих ДС, могут выступать вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) [1] и микролазеры на основе вертикального микрорезонатора [2]. Массив ВИЛ обеспечивает возможность реализации ДС при комнатной температуре, однако максимальный размер элементов в массиве не превышает 24 [1], что обусловлено значительным шагом расположения лазеров на подложке (≥ 80 мкм [2]). Микролазеры с оптической накачкой обеспечивают малый шаг расположения элементов (≤ 10 мкм), но не обеспечивают генерации при комнатной температуре (пределная рабочая температура – 220 К [3]).

В настоящей работе представлены первые экспериментальные результаты по исследованию микролазеров с оптической накачкой на основе вертикального микрорезонатора, работающих при температуре 300 К. Формирование гетероструктуры вертикального микрорезонатора осуществлено методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Расчетная добротность микрорезонатора увеличена в 2.3 раза в сравнении с [3] за счет применения зеркал с числом пар слоев $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ равным 37 и 31. Микрорезонатор с оптической длиной λ/n сформирован на основе GaAs. Три слоя квантовых точек, выращенных по механизму Странского–Крастанова, обеспечили повышенный коэффициент усиления активной области. Схема накачки с оптической апертурой, в центральную область диаметром 4 мкм, позволила обеспечить латеральный теплоотвод.

В эксперименте продемонстрирован сверхлинейный рост мощностной характеристики (в двойном логарифмическом масштабе), что наряду с заужением линии люминесценции подтверждает переход к генерации в микролазерах диаметром 15 мкм. Одночастотная генерации соответствует длине волны 957 нм. Порог генерации определен на основе решения скоростных уравнений, аналогично ранее обсуждаемому [2]. Величина полуширины линии люминесценции (ζ) на пороге генерации оценена с помощью аппроксимации мощностной зависимости величины ζ , описываемой уравнением Шавлова–Таунса [2]. По результатам аппроксимации мощностной характеристики, с учетом величины ζ , фактор спонтанного излучения в лазерной mode (β -фактор) и порог генерации составил 0.12 % и 31.9 мВт. Продемонстрирована высокая добротность микрорезонатора, которая составила 19200 при двукратном превышении порога генерации.

1. M. Pflüger et al., *Opt. Lett.*, **49**, 2285 (2024).
2. T. Heuser et al., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **26**, 1 (2020).
3. A. Babichev et al., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **31**, 1 (2025).

П.Д. Корниенко (студ., 1 курс маг., ИТМО, Физический факультет),
М.А. Минтаиры (н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
М.В. Нахимович (н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
М.З. Шварц (к.ф.-м.н., в.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

ЗАВИСИМОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В КАСКАДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ОТ ОСВЕЩЕННОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Основной причиной, ограничивающей эффективность однопереходного солнечного элемента (СЭ), являются спектральные потери, определяемые шириной запрещенной зоны полупроводникового материала. Создание каскадных СЭ на основе соединений А3В5 расширило спектральный диапазон эффективно принимаемого излучения (современные архитектуры СЭ включают до 6 субэлементов с р-п-переходами) с одновременным повышением КПД приборов [1].

Развитие ростовых технологий позволило получать полупроводниковые гетероструктуры высокого кристаллографического совершенства, в которых доминирующим является излучательный механизм рекомбинации носителей заряда. В таких структурах наблюдаются оптоэлектронные взаимодействия между находящимися в непосредственном оптическом контакте субэлементами. Здесь выделяется люминесцентное взаимодействие (ЛВ), которое определяется излучательной рекомбинацией в широкозонном р-п-переходе и поглощением этого излучения в слоях субэлементов на основе узкозонных материалов с генерацией дополнительного фототока.

Эффективность ЛВ γ устанавливается выражением $\gamma = \Delta J_N(J_{pn})/J_{pn}$, где J_{pn} – величина тока через излучающий (широкозонный) р-п-переход, ΔJ_N – наведенный в узкозонном субэлементе фототок. Согласно [2], ток J_{pn} определяется суммой диффузационной (коэффициент идеальности диода $A = 1$) и рекомбинационной ($A = 2$) составляющих. Ключевыми параметрами, характеризующими ЛВ, является токовая граница между этими составляющими J_{rd} , а также предельная эффективность ЛВ γ_s , которая достигается при высоких плотностях тока через излучающий р-п-переход, когда преобладает диффузионный механизм протекания тока.

В данной работе предложена методика экспериментального определения параметров γ_s и J_{rd} , обсуждается связь полученных значений со свойствами полупроводниковой структуры, определены температурные коэффициенты. Опора на получаемые данные позволяет проводить углубленную диагностику гетероструктур, оценивая качество р-п-переходов и вклад безызлучательной рекомбинации в итоговый баланс оптических взаимодействий между субэлементами.

1. M.A. Green et al., *Progress in Photovoltaics: R&Appl.*, **32**, 425–441 (2024)
2. M. Wolf, H. Rauschenbach, *Adv. Energy Conversion.*, **3**(2), 455–479 (1963).

А.С. Кравченко (студ., 2 курс маг., ННГУ),
Ю.А. Данилов, В.П. Лесников (НИФТИ ННГУ),
Р.Н. Крюков, А.В. Нежданов (ННГУ)

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДИОДНЫХ СТРУКТУР «УГЛЕРОДНАЯ ПЛЕНКА/n-Ge»

При создании фотодиодных структур "металл/полупроводник" на основе Ge сталкиваются с проблемой высоких темновых токов из-за низкого потенциального барьера на границе раздела. Одно из перспективных решений – использование графена или графеноподобных углеродных слоев в качестве промежуточного слоя. На основе графена формируются выпрямляющие переходы с полупроводниками и создаются эффективные диоды Шоттки [1]. В диодных структурах используются, как правило, слои графена, полученные методом химического осаждения из газовой фазы. В данной работе изучаются структуры с углеродным слоем (С-слой), изготовленные на подложках n-Ge(111) (удельное сопротивление $\sim 8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) методом импульсного лазерного нанесения в вакууме при температуре подложки 500°C . Варьирование времени осаждения от 20 до 60 секунд позволило получить С-слои толщиной от ~ 4 до ~ 12 нм. Исследовались состав, структурные и электрические характеристики полученных образцов. Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) показала наличие двух областей. Первая демонстрирует одиночный пик при 300.6 см^{-1} , соответствующий LO-фонону Ge. Вторая область спектра КРС содержит линии, свойственные углеродным материалам. Наблюдается линия G при 1589 см^{-1} , указывающая наряду с результатами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на преобладание sp^2 -связей между атомами углерода, что характерно для графитоподобных материалов. Линия D при 1384 см^{-1} свидетельствует о наличии дефектов в графеновой плоскости. Пики 2D и D+D' объединяются в широкую полосу в диапазоне $2700\text{--}3000 \text{ см}^{-1}$. Общий вид спектра подобен спектрам КРС многослойного графена. Анализ параметров С-слоя по методике, описанной в [2], позволил оценить количество графеновых слоев (от 6 до 8) и средний размер графеновых зерен ~ 5 нм. Для изучения вольт-амперных характеристик (ВАХ) были сформированы меза-диоды Au/C-слой/n-Ge(111) диаметром 450 мкм с использованием электронно-лучевого испарения для нанесения Au, фотолитографии в сочетании с химическим травлением и травлением в кислородной плазме. Обнаружено, что темновые токи зависят от толщины С-слоя и варьируются от $\sim 10^{-6}$ до $\sim 10^{-5}$ А при обратном напряжении -2 В, а рассчитанная по ВАХ высота барьера составляет $\sim 0.5\text{--}0.56$ В.

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства “Приоритет 2030” Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

1. Y.-N. Wei et al., *Small*, **18**, 2201840 (2022).
2. A.C. Ferrari, *Solid State Commun.*, **143**, 47 (2007).

А.Д. Малевская (студ., 1 курс маг., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова,
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),

М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Д.А. Малевский (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
Н.А. Калюжный, А.В. Малевская, С.А. Минтаиров (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
И ОПТИМИЗАЦИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
С ТОЧЕЧНЫМ ТЫЛЬНЫМ КОНТАКТОМ**

Разработка высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) требует поиска компромисса между минимизацией оптических потерь и снижением электрических сопротивлений. Перспективным направлением является использование точечных тыльных контактов, которые позволяют значительной части света отражаться от светоотражателя, расположенного на тыльной стороне ФЭП, и повторно поглощаться, увеличивая фототок. Однако переход к точечной контактной структуре приводит к увеличению последовательного сопротивления, связанного с растеканием тока к отдельным контактам.

Целью данной работы является разработка методики оптимизации конструкции тыльного точечного контакта. Методика основана на последовательном применении модифицированной трубковой модели [1, 2]. На первом этапе проводится оценка оптических параметров. Использование точечного контакта изменяет ток насыщения и спектральную чувствительность. Расчёт изменения указанных параметров выполняется на основе линейной интерполяции между экспериментальными данными, полученными для образцов с различной конструкцией точечного контакта.

На основе скорректированных параметров рассчитывается генераторная вольт-амперная характеристика (ВАХ), описывающая поведение р-п-перехода. Далее эта ВАХ используется для моделирования полной ВАХ ФЭП. Далее последовательно моделируются потери на фронтальной контактной сетке и радиальное стекание тока к тыльным контактам.

Для оптимизации геометрии контакта предложенная методика реализуется в итерационном режиме. Проводится серия расчетов для массива значений диаметра точечного контакта. Для каждого варианта определяется эффективность преобразования. Анализ полученной зависимости эффективности от диаметра и расстояния между контактами позволяет выявить оптимальное значение, при котором достигается баланс между оптическими и электрическими потерями. Таким образом, представленная методика предоставляет инструмент для комплексного проектирования высокоэффективных ФЭП с точечным тыльным контактом.

1. М.А. Минтаиров и др., *ФТП*, **50**, 987 (2016).
2. А.Д. Малевская и др., *ФТП*, **58**, 573 (2024).

И.А. Мельниченко (асп., 4 год, НИУ ВШЭ, межд. лаб. квантовой оптоэлектроники),
Т.М. Шугабаев (асп., 4 год, СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, лаб. эп. нанотехнологий),
Н.В. Крыжановская (д.ф.-м.н., НИУ ВШЭ, зав. межд. лаб. квантовой оптоэлектроники)

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОДИСКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ПРИ ПАССИВАЦИИ ИХ ПОВЕРХНОСТИ SiO_2 СЛОЕМ С ПОМОЩЬЮ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ

Наличие дефектов на поверхности существенно влияет на оптические и электрические характеристики полупроводниковых светоизлучающих приборов. Особенно заметным влияние поверхности становится при уменьшении размеров устройств до величин, сопоставимых с длиной диффузии носителей заряда, как, например, в микролазерах, созданных на основе полупроводников АЗВ5. Для снижения влияния поверхностной безызлучательной рекомбинации в литературе предложены различные методы пассивации, включая осаждение тонких плёнок методом атомно-слоевого осаждения, плазменную обработку и нитридирование поверхности [1]. В последние годы показано, что золь-гель синтез также может служить низкотемпературным и экономичным методом формирования пассивирующих SiO_2 слоёв для светоизлучающих микроструктур [2]. В данной работе исследовалось влияние обработки с помощью золь-гель технологии поверхности полупроводниковых дисковых микролазеров, поддерживающих моды шепчущей галереи, с активной областью, состоящей из трех InGaAsN/GaAs квантовых ям (КЯ), на их характеристики. Использование в микролазерах активной области на основе КЯ привлекательно из-за высокого достижимого усиления, но так как движение носителей заряда не ограничено в плоскости КЯ, дефекты поверхности вносят существенный вклад в безызлучательную рекомбинацию и ухудшают такие характеристики микролазеров как порог генерации, спектральная ширина линии и дифференциальная эффективность. В нашей работе исследовалось нанесение SiO_2 слоя толщиной около 10 нм на микролазеры с InGaAsN/GaAs КЯ методом золь-гель технологии. Формирование слоя SiO_2 привело к значительному улучшению характеристик микролазеров, работающих при оптической накачке. После пассивации впервые получена генерация при комнатной температуре в непрерывном режиме с пороговой плотностью накачки 77 кВт/см², тогда как для микролазеров без пассивации переход в режим лазерной генерации при комнатной температуре не происходил вовсе. Для микролазеров диаметром 15 мкм, работающих при импульсной электрической накачке, получено уменьшение пороговой плотности тока лазерной генерации с 45.8 кА/см² до 20.1 кА/см² при комнатной температуре. Полученные результаты демонстрируют перспективность пассивирующих SiO_2 слоёв для улучшения характеристик микролазеров на основе полупроводников АЗВ5. Оптические исследования были выполнены в рамках программы фундаментальных исследований Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».

1. R.J. Theeuwes, W.M.M. Kessels, B. Macco, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **42**, 060801 (2024).
2. M. Sheen et al., *Nature*, **608**, 56 (2022).

Д.А. Михайлов (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ЦФН),
 Г.С. Соколовский (д.ф.-м.н., профессор РАН, г.н.с.,
 зав. лаб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ЦФН)

ОДНОЧАСТОТНЫЙ КВАНТОВО-КАСКАДНЫЙ ЛАЗЕР СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА

Одночастотные перестраиваемые квантово-каскадные лазеры (ККЛ) с высокой выходной мощностью в среднем инфракрасном диапазоне являются крайне востребованными в оптической связи, спектроскопии, для систем удалённого мониторинга химических веществ и промышленных систем безопасности [1]. В связи с этим ведутся разработки новых конструкций для повышения выходной мощности и эффективности. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования по определению концентрации метана с использованием одночастотного перестраиваемого ККЛ в схеме Литтрова методом дифференциальной абсорбционной спектроскопии. Оптическая линия длиной 5.8 м включала линзу, коллимирующую излучение ККЛ, систему зеркал с общим поворотом на 270° , газовую кювету длиной 10 см с окнами из КВг и измеритель мощности. Измерение мощности проводилось перестройкой ККЛ на длинах волн поглощения метана λ_{abs} (около 7658 нм) и пропускания λ_{trans} (около 7639 нм), отмеченных пунктирными линиями на рис. 1.

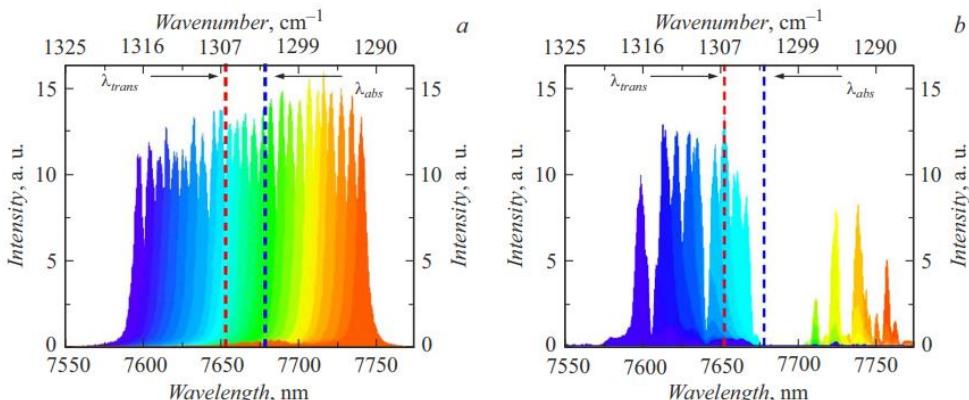


Рис. 1. Спектр перестройки ККЛ, зарегистрированный фурье-спектрометром Bruker Vertex 70v:
 а – через кювету с воздухом, б – через кювету с метаном

Средняя концентрация метана C в оптической линии рассчитывалась как равномерное распределение концентрации в кювете на всем оптическом пути по формуле $C = (c \cdot l)/L$, где c – концентрация в кювете, l – длина кюветы, L – общая длина оптической линии. Концентрация метана в кювете контролировалась откачкой 100 % метана до давления 100 и 10 mbar с последующим напусканием воздуха до атмосферного давления. Минимальная зарегистрированная концентрация метана в оптической линии составила 165 ppm, что более чем в 250 раз ниже минимальной взрывоопасной концентрации [2].

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант №21-72-30020-П).

1. K.K. Schwarm et al., *Appl. Phys. B*, **126**(1), 9 (2020).
2. ГОСТ Р 52136-2003.

А.О. Мурзин (асп., 4 год, СПбГУ, каф. фотоники),
И. Пасхос (PhD, Research Assistant Prof., Westlake University),
Ю.В. Капитонов (д.ф.-м.н., доц., СПбГУ, каф. фотоники),
П. Саввидис (PhD, Prof., Westlake University)

ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В 2D ПЕРОВСКИТЕ РАДДЛЕСДЕНА–ПОППЕРА $\text{BA}_2\text{MA}_2\text{Pb}_3\text{I}_{10}$

Поляритонная лазерная генерация является перспективным направлением в области разработки когерентных источников излучения с ультранизким порогом генерации [1]. В связи с этим особый интерес вызывают двумерные галогенидные перовскиты благодаря большой силе осциллятора и возможности перестройки ширины запрещённой зоны в широком спектральном диапазоне. В настоящей работе исследована поляритонная и фотонная лазерная генерация в двумерных галогенидных перовскитах Раддлесдена–Поппера $\text{BA}_2\text{MA}_2\text{Pb}_3\text{I}_{10}$ при криогенных температурах и импульсном лазерном возбуждении с частотой повторения 1 кГц.

В случае поляритонной лазерной генерации резонатор формировался путём высокотемпературного прессования в вакууме пары диэлектрических зеркал (10.5 пар слоёв $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ на каждом сапфировом стекле), на края которых были нанесены медные полоски; итоговый межзеркальный зазор составил порядка 500 нм. Далее в резонатор вводился исходный раствор методом капиллярного всасывания, после чего при медленном охлаждении происходил рост микрокристаллов $\text{BA}_2\text{MA}_2\text{Pb}_3\text{I}_{10}$. В случае фотонной лазерной генерации использовались сапфировые стёкла без диэлектрических слоёв; остальная технологическая последовательность оставалась аналогичной.

При охлаждении структуры с диэлектрическими зеркалами до температуры $T = 7$ К и при непрерывном лазерном возбуждении наблюдался режим сильной экситон–фотонной связи. При переходе к импульсному возбуждению с частотой повторения 1 кГц и при плотности энергии накачки $I_{\text{ex}} > I_{\text{ex}}^0 \approx 20$ мкДж/см² (за импульс) была зарегистрирована поляритонная лазерная генерация с интенсивностью излучения пропорциональной $\sim I_{\text{ex}}^{17}$. Для структуры без диэлектрических слоёв в аналогичных условиях порог генерации был как минимум в пять раз выше, а интенсивность была пропорциональна $\sim I_{\text{ex}}^5$. В обоих случаях излучение демонстрировало пороговый характер зависимости интенсивности от плотности энергии накачки с последующим насыщением, высокую степень линейной поляризации и периодический характер углового распределения излучения.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 125022002745-6.

1. L. Zhang et al., *Prog. Quantum Electron.*, **83**, 100399 (2022).

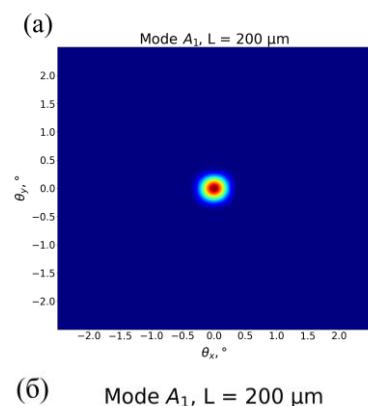
А.С. Некрасов (студ., 2 курс маг., СПбПУ, лаб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
В.В. Золотарев, И.В. Орешко, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

РАСХОДИМОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩЕГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА С РЕЗОНАТОРОМ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Одной из главных проблем мощных торцевых полупроводниковых лазеров является сильно асимметричная широкая диаграмма направленности выходного излучения, что существенно усложняет их применение. Эта проблема может быть решена выводом излучения через поверхность лазерного чипа, при этом можно симметрично увеличивать апертуру для уменьшения расходимости пучка без потери одномодового режима работы. Двумерный фотонный кристалл, сформированный в слоях гетероструктуры лазера, позволяет получить выходной пучок, перпендикулярных поверхностей чипа, при этом формируя распределенную обратную связь в плоскости слоев гетероструктуры. Управляя параметрами фотонного кристалла, можно добиться узкой расходимости лазерного луча при максимально достижимой выходной оптической мощности.

В настоящей работе проведено теоретическое исследование влияния на картину дальнего поля параметров двумерного фотонного кристалла квадратной симметрии конечного размера. Фотонный кристалл сформирован воздушными отверстиями в слоях гетероструктуры GaAs/AlGaAs/InGaAs, излучающий на длину волны порядка 980 нм. В результате расчетов были получены картины ближнего и дальнего поля (рис. 1), а также зависимости оптических потерь на выход для различных резонаторных мод лазера в зависимости от геометрических параметров фотонного кристалла и от размеров излучающей апертуры. Также были получены зависимости выходной оптической мощности от тех же параметров для оптимизации эффективности вывода излучения через поверхность чипа.

Анализ зависимостей расходимости выходного пучка и оптических потерь позволяет определить размер апертуры, обеспечивающей минимальную расходимость лазерного излучения при достаточной модовой дискриминации, позволяющей сохранить одномодовый состав и симметричный выходной пучок.



(б) Mode A_1 , $L = 200 \mu\text{m}$

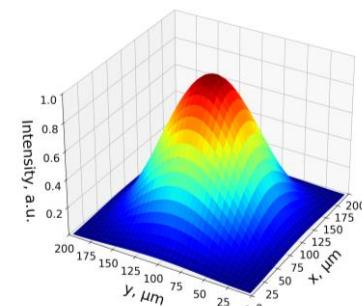


Рис. 1. Распределение интенсивности лазерного излучения полупроводникового лазера с резонатором на основе двумерного фотонного кристалла (а) в дальней зоне и (б) в ближней зоне в излучающей апертуре 200–200 мкм: фундаментальная мода

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ ДИНАМИКИ В КВАНТОВЫХ КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРАХ

Интерес к квантово-каскадным лазерам (ККЛ) связан с уникальными свойствами среднего ИК-диапазона, содержащего в себе множество интенсивных линий поглощения, а также окон прозрачности атмосферы. ККЛ, концепция которых была предложена в 1971 г. Р. Сурисом и Р. Казариновым [1], являются униполярными приборами, с оптическими переходами в зоне проводимости между уровнями размерного квантования.

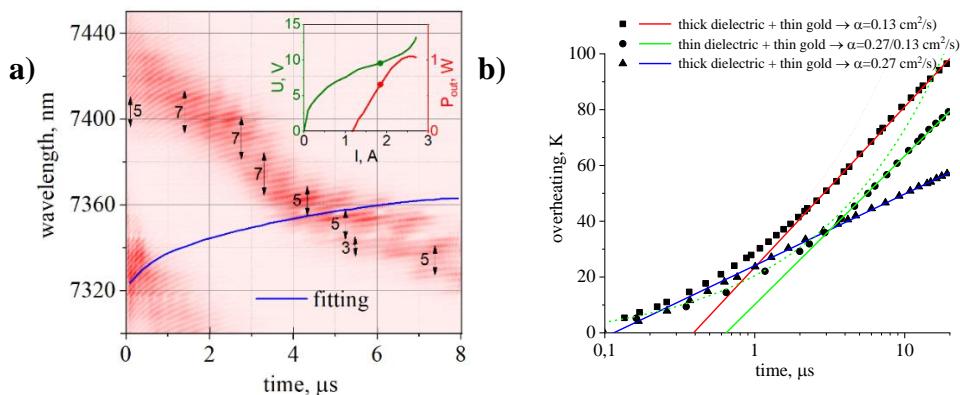


Рис. 1. a) Измеренная нелинейная частотная модуляция (НЛЧМ) спектра ККЛ и
 б) её аппроксимация одномерными и двумерными моделями тепловыделения
 с константами тепловой диффузии для ККЛ с различными конструкциями

Концепция ККЛ позволяет избежать Оже-рекомбинации, рост которой с уменьшением ширины запрещённой зоны в полупроводниках препятствует созданию лазерных диодов с длиной волны больше 4 мкм. Однако наличие десятков квантовых каскадов в активной области приводит к работе на повышенных электрических мощностях. Поэтому отвод тепла от активной области квантово-каскадного лазера (ККЛ) является ключевой задачей для получения непрерывного режима генерации. Её решение напрямую связано с оптимизацией всех стадий постростовой обработки гетроструктур и монтажа чипов ККЛ. В настоящей работе представлена модель распространения тепла по чипу ККЛ. Мерой эффективности отвода тепла от активной области ККЛ является эффективная константа тепловой диффузии. Показано, что экспериментально константу диффузии можно определить при измерении НЛЧМ моды резонатора Фабри-Перо (рис. 1, a). Проведённые экспериментальные исследования (рис. 1, b) серии образцов ККЛ, имеющие отличия только в постростовом процессе, показали, что предлагаемая модель и экспериментальная методика измерения НЛЧМ позволяют определить оптимальные подходы к постростовой обработке для эффективного отвода тепла от активной области.

Проект поддержан РНФ (проект 21-72-30020-П).

1. R.F. Kazarinov, R.A. Suris, Sov. Phys. Semicond., 5, 707–709 (1971).

В.В. Подопригора (студ., 2 курс маг., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ФЭТ),
 В.В. Дюделев (к. ф.-м. н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 8 μm

Наличие окон прозрачности атмосферы в среднем инфракрасном диапазоне открывает перспективы для создания систем беспроводной оптической связи, для реализации которых необходимо создание быстродействующих фотоприёмников. Одним из таких направлений является разработка квантово-каскадных детекторов (ККД) [1]. В основе принципа работы ККД лежит применение дизайна активной области схожей, с квантово-каскадным лазером (ККЛ). Принцип работы ККД показан на рис. 1, *a*.

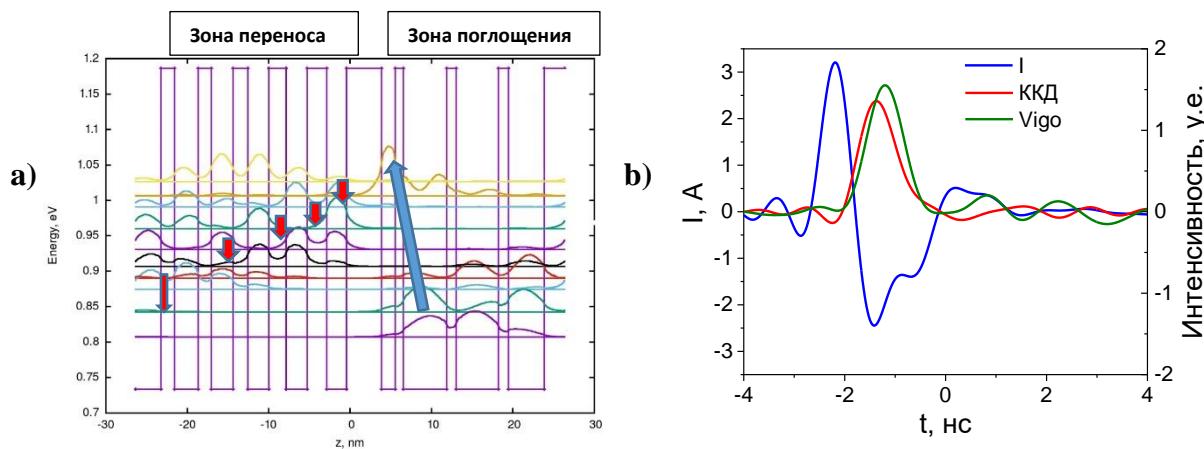


Рис. 1. *a*) Зонная диаграмма ККД. *b*) Результаты регистрации излучения ККЛ, накачиваемого субнаносекундными импульсами тока

В настоящей работе проведены исследования ККД для спектрального диапазона 8 мкм. Активная область ККД состоит из 50 каскадов и аналогична активной области ККЛ, описанной в работе [2]. Зонная диаграмма ККД показана на рис. 1, *a*. Исследованы зависимости чувствительности детекторов от длины чипа и мощности излучения. Максимальная чувствительность составила $\sim 30 \text{ mA/Vt}$ для чипов с длиной $\sim 0.7 \text{ mm}$. Исследования быстродействия ККД при регистрации излучения ККЛ, накачиваемого субнаносекундными импульсами тока, показали, что ККД имеет полосу пропускания $>1 \text{ ГГц}$. Результаты исследования представлены на рис. 1, *b*. Для сравнения приведены результаты регистрации того же лазерного импульса быстродействующим детектором Vigo PVI-4TE-10.6-1x1 с полосой пропускания $\sim 1 \text{ ГГц}$. Дальнейшее повышение быстродействие ККД требует оптимизации конструкции чипа и его монтажа, для снижения емкости и индуктивности.

Проект поддержан РНФ (проект 21-72-30020-П).

1. T. Dougakiuchi, N. Akikusa, *Sensors*, **21**, 5706 (2021).
2. В.В. Дюделев и др., УФН, **194**, 98–105 (2024).

К.К. Прудченко (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, отд. ЦФН),
Е.В. Контрош, И.А. Толкачев, В.С. Калиновский (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, отд. ЦФН),
Е.И. Теруков, С.Н. Аболмасов (ООО «НТЦ ТПТ»)

ПЕРСПЕКТИВЫ ДВУХСТОРОННЕГО 4-Х ПЕРЕХОДНОГО ГИБРИДНОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ КОНЦЕНТРАТОРНОЙ ФОТОВОЛЬТАИКИ

Создание космических солнечных батарей на основе концентраторных фотоэлектрических модулей (КФМ) с гибридными солнечными элементами (ГСЭ) [1] позволило повысить удельную электрическую мощность и эффективность, расширить диапазон угловой разориентации и уменьшить тепловые потери. Для дальнейшего усовершенствования КФМ необходимо увеличивать эффективность в условиях космической радиации, а также уменьшать стоимость и массогабаритные параметры. Этим критериям соответствует КФМ с линейными линзовыми концентраторами и двухсторонним ГСЭ, представляющим собой монолитный 4-х переходный СЭ на основе электрогенерирующих линеек (ЭГЛ) из GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ и кремниевого гетероструктурного (silicon hetero junction – SHJ) $n\text{-}\alpha\text{-Si:H}/(p)\text{c-Si:}(Ga)/p\text{-a-Si:H}$ фотоактивного теплоотводящего основания (ФТО) с двухсторонней фоточувствительностью. Впервые подобное решение было разработано и изложено в [2] и обусловлено высокими достигнутыми значениями КПД SHJ ФТО на p -подложке, легированной Ga (более 26 % при 1000 Вт/м², AM1.5) [3] и радиационной деградацией КПД $\leq 30\%$ (1367 Вт/м², AM0) при облучении 1 МэВ электронами флюенсом $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ [4]. Двухстороннее SHJ ФТО обеспечивает увеличение вырабатываемой электроэнергии за счёт пассивирующих слоёв аморфного/микро-кристаллического Si [3] и альбедо Земли [5].

Исследования характеристик осуществлялись при кратности концентрации солнечного излучения < 10 Солнц, (AM0, 1367 Вт/м²). Аналогично [1], в КФМ с ГСЭ сохранялись высокие энергетические характеристики в диапазоне угловой разориентации $\pm 25^\circ$. С учётом альбедо Земли интенсивностью $0.24 \times (\text{AM0})$ [5] удельная мощность ГСЭ составила ~ 490 Вт/м² в начале срока службы. Исходя из оценки изменения эффективного значения диффузионных длин, для SHJ СЭ был определён коэффициент деградации – K_L при облучении 1 МэВ электронами в диапазоне флюенсов $F_e = (2.5 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15}) \text{ см}^{-2}$. Оказалось, что значение K_L снижается с повышением флюенса электронов с $6 \cdot 10^{-12}$ до $2.4 \cdot 10^{-12}$. Можно полагать, что срок службы солнечной батареи на основе КФМ с ГСЭ с SHJ ФТО составит не менее 10 лет.

1. V.S. Kalinovskii et al., *AIP Conf. Proc.*, **2550** (2021).
2. V.M. Andreev et al., RU Patent No. 199356, issued May 19, 2020.
3. X. Ru et al., in 2023 IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), San Juan, PR, USA, 2023, pp. 1–3.
4. V.S. Kalinovskii et al., *Appl. Sol. Energy*, **59**, 5 (2023).
5. A.M. Delleur et al., in IECEC '02. 2002 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington, DC, USA, 2002, pp. 39–44.

ЛАЗЕР С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ
НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ HGCDTE

Компактные источники излучения среднего инфракрасного диапазона востребованы в решении ряда исследовательских и прикладных задач, связанных со спектроскопией различных веществ. Одними из них могут быть межзонные лазеры на основе гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) HgCdTe/CdHgTe. Несомненным преимуществом данных структур является квазигиперболический закон дисперсии, который частично или полностью подавляет пороговую оже-рекомбинацию. Однако из-за фундаментальных проблем с получение *p*-типа легирования реализация HgCdTe-лазеров с токовой накачкой затруднена. С другой стороны, недавно была получена лазерная генерация при оптической накачке в микрорезонаторах различной геометрической формы (диск, полосок, кольцо), изготовленных из структур с HgCdTe КЯ [1]. Однако, в таких лазерах сложно добиться стабильности линии генерации на определённой длине волны. В таком случае, привлекательным является создание так называемых лазеров с распределённой обратной связью (РОСЛ), работающих при оптической диодной накачке. Концепция РОСЛ на основе квантовых ям HgCdTe/CdHgTe предполагает создание на поверхности структуры решетки с периодом, связанным с длиной волны излучения таким образом, что генерируемое лазерное излучение выходит с поверхности структуры под определённым углом [2]. Для реализации такого дизайна в данной работе были использованы отработанные ранее в ИФМ РАН на HgCdTe микрорезонаторах методики ионного травления (ИТ) и фотолитографии (ФЛ) [1, 3].

Все структуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на GaAs (013) подложке с буферами из ZnTe и CdTe. На поверхности структур методами ФЛ и ИТ была сформирована одномерная диэлектрическая брэгговская решётка с периодом 7.5 мкм, обеспечивающая РОС и вывод излучения под углом 21° к поверхности на длине волны 13.5 мкм. Спектры излучения исследовались с помощью фурье-спектрометра в режиме пошагового сканирования при температуре 9–300 К, обеспечиваемой криостатом замкнутого цикла. При накачке как квазинепрерывными источниками оптического возбуждения (с длиной волны 1.9 и 10.6 мкм), так и 8 мкм квантовым каскадным лазером впервые была получена стабилизированная по частоте, направленная одномодовая генерация на 13.5 мкм с шириной линии около 0.15 см⁻¹ в РОСЛ на основе гетероструктур с КЯ HgCdTe/CdHgTe. Пороговая плотность мощности накачки не превышала 50 Вт/см².

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 22-12-00310-П).

1. А.А. Разова и др., *Письма в ЖТФ*, **51**(19), 7–10 (2025).
2. В.Р. Барышев и др., *ФТП*, **57**(5), 362–368 (2023).
3. A.A. Razova et al., *Appl. Phys. Lett.*, **126**, 121102 (2025).

А.Э. Ризаев (асп., 3 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, отд. ЦФН),
А.А. Подоскин, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, отд. ЦФН)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЧИПА НА МЕХАНИЗМЫ ПОТЕРЬ И МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО INGAASP/INP-ЛАЗЕРА

В настоящее время мощные импульсные полупроводниковые лазеры на основе InGaAsP/InP с длиной волны излучения 1.55 мкм находят активное применение в ЛИДАРных системах, дальномерах, а также в системах оптической связи благодаря малым потерям в кварцевом волокне на данной длине волны. Для повышения эффективности работы лазерных диодов и устройств на их основе необходимо изучать механизмы, ограничивающие максимальную мощность излучения и роль параметров полупроводникового лазера в этих процессах. В настоящей работе исследуется влияние ключевых параметров лазерного кристалла (длины резонатора, коэффициента отражения выходного зеркала) на основные механизмы потерь InGaAsP/InP-лазеров, и определение оптимальных параметров, позволяющих повысить оптическую мощность излучения.

Исследование проводилось в рамках численной двумерной модели лазерного диода, в которой учитывается дрейф-диффузионный транспорт носителей заряда и неравномерное распределение фотонов и носителей вдоль оси резонатора. По результатам численных расчетов установлено сильное влияние эффекта пространственного продольного выжигания носителей (LSHB) на мощность излучения и, как следствие, на выбор оптимальных параметров кристалла. При высоких коэффициентах отражения эффект LSHB снижает мощность излучения посредством уменьшения «полезных» потерь на выход, которые в двумерной модели пропорциональны энергиям, выходящим из резонатора и запасенным в нем. Уменьшение коэффициента отражения увеличивает потери на выход и оптическую мощность, однако снижение R меньше 0.5% приводит к насыщению усиления и сильному накоплению избыточных носителей в резонаторе близи глухого зеркала. Следствием является падение мощности от роста вклада традиционных механизмов насыщения ватт-амперной характеристики – тока утечки и внутренних потерь от поглощения на свободных носителях заряда. При варьировании длины резонатора эффект LSHB проявляется только в уменьшении потерь на выход. Оптимальная длина резонатора выбирается с учетом баланса высокого вклада тока утечки и потерь на свободных носителях в коротких лазерах при повышенной плотности тока против снижения выходных потерь при удлинении резонатора.

Е.В. Сапожникова (асп., 4 год, ИТМО, Сколтех),
Д.А. Семенов (студ., 3 курс бак., ИТМО),
А.П. Пушкарев (к.х.н., в.н.с., Сколтех)

СМЕШАННОГАЛОГЕНИДНЫЕ ПЕРОВСКИТНЫЕ МИКРОЛАЗЕРЫ С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Перовскитные микроразмерные структуры в виде пластинчатых или нитевидных кристаллов сочетают в себе одновременно активную среду с высоким оптическим усилением и резонатор, тем самым такие структуры способны стать источником низкопорогового и высокодобротного лазерного излучения [1]. Типичная кристаллическая структура для неорганических перовскитов выглядит как ABX_3 , где А и В являются катионами металлов ($A = Cs^+$, $B = Pb^{2+}$), а X является галогенидным анионом ($X = Br^-$, Cl^- , I^-). Наиболее широко используемым методом синтеза нанокристаллов перовскита является коллоидный метод горячей инжекции, главным достоинством которого является большой выход конечного продукта и возможность наносить кристаллы на любые подложки и электроды [2]. Кроме того, метод горячей инжекции дает возможность изменять состав кристаллов и настраивать спектр излучения во всем видимом диапазоне либо путем частичного замещения катионов (например, Cd^{2+} , Zn^{2+}), либо путем анионного обмена [3]. Однако на данный момент синтез микроразмерных резонансных коллоидных кристаллов все еще остается сложной задачей.

В данной работе перовскитные микрокристаллы $CsPbBr_3$ впервые были синтезированы новым модифицированным коллоидным методом при высокой температуре в атмосфере азота, а форма и размер кристаллов контролировалась концентрацией прекурсоров. Процесс роста микроразмерных структур происходил путем объединения перовскитных нанокристаллов между собой в процессе длительного перемешивания раствора при температуре 140°C. Длина волны излучения регулировалась путем частичного замещения ионов Br^- в кристаллической решетке на ионы I^- и Cl^- с использованием растворов YI_3 и YCl_3 в дифениловом эфире. Спектры лазерной генерации синтезированных кристаллов были получены при их накачке фемтосекундным лазером с частотой повторений импульсов 10кГц, а также была изучена динамика спектров фотолюминесценции во времени.

Синтезированные структуры продемонстрировали высокодобротное лазерное излучение при возбуждении фемтосекундным ультрафиолетовым лазером. Кристаллы смешанного хлорида и чистого брома показали низкопороговую генерацию и довольно высокую фотостабильность спектров во времени по сравнению с йодными структурами.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 24-73-10072).

1. J. Moon et al., *Adv. Mater.*, **36**, 2211284 (2024).
2. A. Soosaimanickam et al., in *Nanomaterials: The Building Blocks of Modern Technology. Smart Nanomaterials Technology*. – Springer, Singapore, 2023, pp. 143–179.
3. J. Liu et al., *Acc. Chem. Res.*, **55**, 262–274 (2022).

ОЦЕНКА ЁМКОСТНЫХ ПОТЕРЬ В ДВУМЕРНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ДЕТЕКТОРАХ

Изучение RC-задержек в графене при создании фотодетекторов имеет ключевое значение, поскольку быстродействие и эффективность таких устройств напрямую определяются скоростью отклика и способностью регистрировать ультракороткие оптические импульсы. Помимо упомянутого ограничения быстродействия в виде RC-задержек, которые представляют собой характеристику измерительного прибора, важны также и времена, связанные с физикой формирования фототока. В представленной работе построена модель с последовательным учетом этих времен, поэтому полученные выводы не зависят от физики формирования фототока. Результаты этой работы интересны ещё и потому, что в ней были изучены различные случаи локализации фототока, что дает дополнительное понимание того, какая геометрия детектора будет наиболее эффективной в смысле быстродействия.

Теоретическая модель разрабатывалась для системы, состоящей из двумерного проводника, с учетом подсоединенного к ней не идеального амперметра и наличия затвора. Такая система была рассмотрена с учетом возникшего фототока внутри двумерной системы на частоте падающего излучения. Система описывалась в рамках модели обобщенного закона Ома для локального тока с дополнительными фототоками источниками произвольной природы. Отклик системы был описан с учетом согласования тока с динамическим уравнением непрерывности. Электрическое поле описывалось с помощью скалярного потенциала, т.е. определялось уравнением Пуассона. Затвор рассматривался в рамках приближения плавного канала, когда можно считать, что создаваемое им поле однородно на протяжении всей двумерной системы, но в тоже время мы рассматривали затвор на достаточном расстоянии, чтобы пренебречь эффектами квантовой ёмкости. В итоге задача свелась к решению уравнения типа теплопроводности для электростатического потенциала.

Результатом рассмотрения двумерной системы в такой модели стало обнаружение сильной зависимости RC-подобной задержки от точки локализации индуцируемого фототока, а также выявление роли согласования проводимости двумерной системы с внешней нагрузкой в высокоскоростном терагерцовом детектировании. Оказалось, что чем ближе источник тока к контактам, тем меньше задержка в получении сигнала. Такое можно интерпретировать, как результат уменьшение эффективного расстояния от источника тока до контакта, что по итогу уменьшает эффективную площадь образца, с которой сигнал уходит в канал затвора.

1. E. Titova et al., *ACS nano*, **17**(9), 8223–8232 (2023).
2. D.A. Mylnikov et al., *Nano Letters*, **23**(1), 220–226 (2022).

И.С. Федосов (асп., 1 год, НИУ ВШЭ СПб),
Н.А. Фоминых (м.н.с., НИУ ВШЭ СПб),
Н.В. Крыжановская (д.ф.-м.н., зав. лаб., НИУ ВШЭ СПб)

УМЕНЬШЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В СОПРЯЖЕННОМ ВОЛНОВОДЕ,
МОНОЛИТНО ИНТЕГРИРОВАННОМ С МИКРОДИСКОВЫМ ЛАЗЕРОМ,
ДЛЯ ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ GaAs

Перспективным направлением решения задачи увеличения скорости обработки данных является использование оптоэлектронных устройств, объединённых в фотонные интегральные схемы (ФИС). Для источников излучения в ФИС важны компактность и способность работать при повышенных температурах. Активная область на основе квантовых точек (КТ) InGaAs/GaAs позволяет создавать лазеры с рабочим диапазоном температур выше 100°C [1], а исполнение резонатора в виде микродиска (МД) позволяет добиться высокой добротности при малых, вплоть до единиц микрон, размерах прибора за счёт поддержки мод шепчущей галереи [2]. Излучение МД лазера распространяется в плоскости резонатора, что облегчает интеграцию с другими компонентами, которая может быть реализована посредством эманесцентной связи. Изготовление оптического волновода (ОВ) и МД лазера из единой гетероструктуры (т.н. монолитная интеграция) позволяет добиться высокой точности позиционирования, необходимой для контролируемой эманесцентной связи, при использовании стандартного технологического процесса. Однако при этом возникает задача подавления поглощения излучения в самом ОВ, который содержит ту же активную область, что и МД.

В данной работе были исследованы МД лазеры диаметром 30 и 40 мкм, эманесцентно связанные с волноводами, изготовленными из единой гетероструктуры. Активная область состояла из 6 слоёв КТ In_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs. Расстояние между МД лазером и ОВ варьировалось от 0 до 200 нм, некоторые ОВ имели секцию, огибающую МД. Для подавления генерации ОВ на модах Фабри-Перо его торцы были скосены под углом ~15° с помощью травления фокусированным ионным пучком. При комнатной температуре в режиме постоянной накачки было подтверждено возникновение лазерной генерации в МД. Для уменьшения поглощения в ОВ применялась его токовая накачка, которая позволила достичь просветления ОВ, сопровождающегося скачкообразным увеличением мощности проходящего излучения почти на порядок. При увеличении тока накачки из-за джоулева разогрева структуры длина волны генерации лазера смещается в длинноволновую область ($\lambda > 1060$ нм), что дополнительно снижает поглощение излучения в ОВ.

Таким образом, были экспериментально показаны два механизма уменьшения потерь в оптическом волноводе, выполненному из лазерной гетероструктуры: за счёт токовой накачки и за счёт теплового сдвига лазерной моды.

1. N. Kryzhanovskaya et al., *Electron. Lett.*, **51**, 1354–1355 (2015).
2. N. Kryzhanovskaya et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **54**, 453001 (2021).

А.С. Фунтикова (стаж.-иссл., СПбПУ),
А.М. Можаров (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбАУ РАН им. Ж.И.Алферова),
А.В. Павлов (к.ф.-м.н., м.н.с., СПбАУ РАН им. Ж.И.Алферова),
Д.С. Гец (к.ф.-м.н., в.н.с., ИТМО)

МИКРОЛАЗЕР НА БАЗЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЫ
ННК GaP И ПЕРОВСКИТА CsPbBr_3

Неорганические перовскиты, в том числе CsPbBr_3 , в последние годы привлекают интерес исследователей благодаря своим выдающимся оптоэлектронным свойствам. Эти материалы демонстрируют ряд преимуществ по сравнению с классическими полупроводниками, что делает их перспективными для применения в светодиодах [1], фотоприемниках, солнечных элементах [2] и других устройствах оптоэлектроники. Также, благодаря высокой квантовой эффективности фотолюминесценции [3], перовскитные структуры являются потенциальными платформами для создания микролазеров. В свою очередь, нитевидные нанокристаллы (ННК) могут выступать в качестве эффективных оптических резонаторов, а за счет контролируемого выхода эвансцентных волн за их пределы, способны взаимодействовать с внешней средой. Таким образом, интеграция перовскита с резонатором в виде ННК позволяет создать эффективный лазер с низким порогом стимулированной генерации.

В данной работе проведено исследование лазерной генерации в структурах на основе ННК GaP, покрытого слоем перовскита CsPbBr_3 . Для перовскита из первых принципов была рассчитана зонная структура, определены ширина запрещенной зоны и плотность состояний электронов и дырок. Благодаря оптическому расчету модового состава гетерогенной системы ННК GaP, покрытого перовскитом, были определены добротности и фактор перекрытия резонансов. На основе этих данных выполнен аналитический расчет процессов рекомбинации носителей в перовските и оценен порог лазерной генерации в таких структурах. Выполненный комплексный расчет полностью согласуется с результатами проведенного экспериментального исследования: в изготовленных структурах наблюдается лазерная генерация при фотовозбуждении с предсказанным порогом.

Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал использования перовскитов, интегрированных с ННК для создания компактных источников лазерного излучения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (грант государственного задания FSEG-2024-0017).

1. L.N. Quan et al., *Adv. Mater.*, **30**, 1801996 (2018).
2. M.A. Green et al., *Prog. Photovoltaics*, **27**, 565 (2019).
3. M.B. Johnston et al., *Acc. Chem. Res.*, **49**, 146 (2016).

Т.М. Шугабаев (асп., 4 год, СПБАУ им. Ж.И. Алферова, лаб. эпитак. нанотех.),
В.В. Лендяшова (асп., 2 год, СПБАУ им. Ж.И. Алферова, лаб. эпитак. нанотех.),
А.М. Даутов (асп., 1 год, СПБАУ им. Ж.И. Алферова, лаб. эпитак. нанотех.),
А.Ю. Гагарина (асп., 4 год, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»),
Г.Э. Цырлин (д.ф.-м.н., зав. лаб. эпитак. нанотех., СПБАУ им. Ж.И. Алферова),
В.О. Гридчин (н.с., СПБАУ им. Ж.И. Алферова, лаб. эпитак. нанотех.)

ПЛАЗМОННЫЕ НАНОЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ НИТРИДНЫХ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ

Сильная связь между поверхностными плазмон-поляритонами и экситонами в гибридных металл-полупроводниковых наноструктурах позволяет манипулировать светом в глубоком субволновом масштабе [1]. Это взаимодействие лежит в основе создания сверхкомпактных источников когерентного излучения – плазмонных нанолазеров. Для формирования последних, перспективной платформой являются полупроводниковые нитевидные нанокристаллы (ННК), поскольку данные наноструктуры обладают высоким кристаллическим качеством и естественными волноводными свойствами [2].

В данной работе представлены результаты по созданию плазмонных нанолазеров на основе одиночных ННК GaN, работающих при комнатной температуре. Исходный массив ННК был синтезирован с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота на кремниевой подложке с использованием буферных слоев AlN/GaN. Просвечивающая электронная микроскопия и дифракция медленных электронов подтвердили высокое структурное качество ННК: однородный диаметр вдоль длины ННК и отсутствие дислокаций. Средние высота и диаметр ННК составили 2.3 мкм и 90 нм соответственно. Для создания нанолазеров исходный массив ННК подвергался ультразвуковой обработке и таким образом отделялся от ростовой поверхности. Затем одиночные ННК переносились на специальную плазмонную подложку. Подложка представляет собой эпитаксиально выращенный на пластине кремния слой Al с шероховатостью менее 0.8 нм, покрытый слоем SiO_x толщиной 5 нм. Мощностные зависимости спектров микро-фотолюминесценции одиночных ННК на плазмонной подложке продемонстрировали лазерную генерацию с относительно низкими порогами для существующих аналогов [3]. Порог генерации при оптической накачке соответствовал 30–40 кВт/см², полуширина лазерной линии составила 0.5 нм.

Полученные результаты могут представлять интерес для технологии высокоразрешающей биовизуализации, лазерной терапии, оптических систем хранения данных и других приложений, связанных с локализацией света в нанометровом масштабе.

Работа была выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 23-79-00012.

1. T.C. Ellis et al., *Nanophotonics*, **13**(15), 2707–2739 (2024).
2. V.G. Dubrovskii et al., *Semiconductors*, **43**(12), 1539–1584 (2009).
3. Q. Zhang et al., *Nature Commun.*, **5**(1), 4953 (2014).

И.В. Шушканов (асп., 2 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),
С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, отд. ЦФН)

ИСТОЧНИКИ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ СУБ-НС ДЛИТЕЛЬНОСТИ
НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaAs/GaAs
С КВАНТОВОРАЗМЕРНОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ

В последние годы значительно возрос интерес к разработке компактных, экономичных и высокоэффективных источников мощных лазерных импульсов суб-наносекундной длительности. Актуальность таких исследований обусловлена их широким применением в современных технологиях, включая телекоммуникации, медицинскую диагностику и научные исследования. Компактные источники лазерных импульсов играют ключевую роль в высокоточных системах измерения расстояния (ToF-дальномерах) [1], а также в различных областях метрологии, где требуется высокая точность и стабильность. Важным аспектом в данной теме является совершенствование конструкции кристаллов полупроводниковых лазеров и разработка эффективных генераторов импульсов тока. В существующих работах для накачки полупроводниковых лазеров часто использовались внешние генераторы импульсов, которые отличаются крупными габаритами по сравнению с самим кристаллом лазера и требуют согласования с нагрузкой 50 Ом.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование, в котором для накачки полупроводниковых лазеров рассматривается решение, основанное на применении быстродействующего токового ключа на базе гетеротиристора, что позволяет повысить компактность и эффективность системы. Преимущество данного подхода связано с возможностью вертикального монтажа, что позволяет создавать интегральные сборки токовый ключ-полупроводниковый лазер с минимальными габаритами и минимальными паразитными индуктивностями в контуре. Кроме этого, в предлагаемой конструкции также отсутствуют серьезные требования к форме импульсов тока управления для включения тиристорного ключа.

Предложенная конструкция продемонстрировала способность генерировать оптические импульсы с пиковой мощностью до 40 Вт и длительностью импульса 130 пс. Было проведено сравнение оптической мощности при различной ширине излучающей апертуры. Достигнутая пиковая мощность превосходит значения, ранее описанные в работах [2, 3], а предложенный подход обладает рядом конструктивных преимуществ, включая использование компактной интегральной схемы и типовой, а не специализированной, конструкции лазерной гетероструктуры.

1. S. Royo, M. Ballesta-Garcia, *Appl. Sci.*, **9**, 4093 (2019).
2. B.S. Ryvkin et al., *Semicond. Sci. Technol.*, **32**, 025015 (2017).
3. A.A. Podoskin et al., *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **50**, 513–519 (2023).

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 535.5

Т.Д. Горелкина (студ., 2 курс маг., ИТМО, Новый Физтех),
И.Э. Калантаевский (асп., 2 год, ИТМО, Новый Физтех),
В.А. Кравцов (PhD, в.н.с., ИТМО, Новый Физтех)

МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫЕ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОНЫ В НАНОСТРУКТУРИРОВАННОМ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКЕ CrSBr

Двумерный Ван-дер-Ваальсов полупроводник CrSBr представляет собой уникальный магнитный материал, сочетающий в себе слоистый антиферромагнитный порядок с сильными экситонными свойствами. Кристаллическая структура CrSBr характеризуется орторомбической симметрией, а ее сильная анизотропия обуславливает формирование квазиодномерных экситонов, поляризованных вдоль легкой оси намагничивания (*b*-ось) и обладающих аномально высокой силой осциллятора [1]. При наноструктурировании слоя CrSBr толщиной меньше 150 нм вдоль *b*-оси методом нанолитографии формируется фотонный кристалл. В такой структуре реализуется режим самогибридизации, когда локализованные экситоны вступают в сильную связь с модой фотонного кристалла, формируя гибридные экситон-поляритонные состояния. На рис. 1, *a* представлена дисперсия экситон-поляритона, изменение угла наклона моды подтверждает наличие самогибридизации.

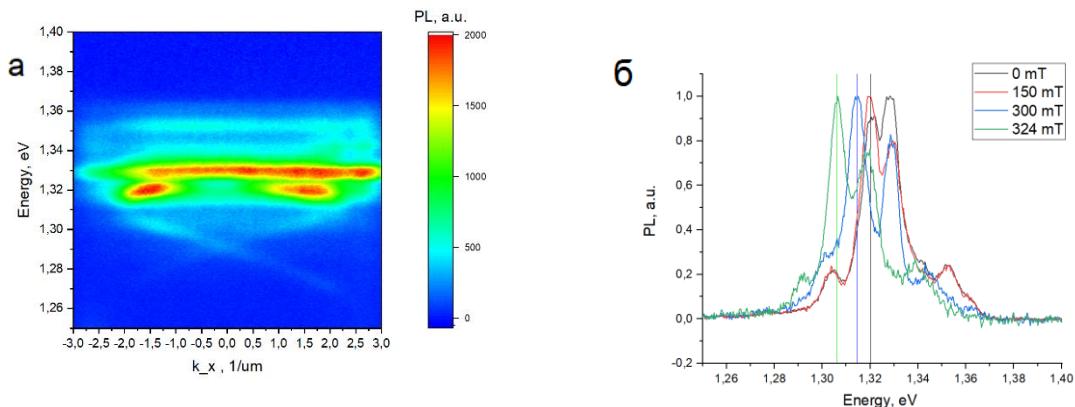


Рис. 1. *a*) Экспериментальная карта фотолюминесценции при 9К, *б*) Спектры фотолюминесценции при $k_x = -1000000 \text{ } 1/\text{m}$ для внешних магнитных полей 0, 150, 300, 324 мТл. Вертикальными линиями отмечены пик экситон-поляритона, который при увеличении магнитного поля смещается на 14 мэВ в область меньших энергий

Приложение внешнего магнитного поля вдоль легкой оси индуцирует скачкообразный переход от антиферромагнитного к ферромагнитному межслоевому упорядочению, что существенно модифицирует электронную зонную структуру за счет изменения межслоевой гибридизации. В настоящей работе продемонстрировано, что данный переход проявляется в красном смещении экситонной энергии, что непосредственно влияет на дисперсию поляритонов (рис. 1, *б*).

1. J. Klein et al., *ACS Nano*, **17**, 5316–5328 (2023).

С.П. Ильин (асп., 2 год, Университет ИТМО, ФТМФ),
Л.Е. Зеленков (к.х.н., Университет ИТМО, Харбинский инженерный университет)

ЭФФЕКТИВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В МЕТАПОВЕРХНОСТЯХ НА ОСНОВЕ БЕССВИНЦОВЫХ ГАЛОГЕНИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ

Эффективная и управляемая генерация второй гармоники (ГВГ) играет ключевую роль в современных фотонных технологиях. Этот процесс находит применение в оптической связи, биовизуализации и квантовых информационных системах. Для создания компактных устройств, таких как фотонные чипы, модуляторы и сенсоры требуется реализация высокоэффективной ГВГ на микро- и наноуровне. Это возможно при использованииnanostructured materials, обеспечивающих сильное резонансное усиление электромагнитного поля. Однако традиционные нелинейные материалы имеют значительные ограничения: плазмонные системы страдают от оптических потерь и термической нестабильности, а полупроводниковые среды требуют сложных и дорогостоящих технологий изготовления.

В данной работе рассматривается простой и недорогой подход к созданию нелокальных метаповерхностей на основе бессвинцовых германиевых галогенидных перовскитов. Такие соединения, как CsGeI_3 и MAGeI_3 , представляют собой перспективную альтернативу традиционным нелинейным материалам благодаря высокой квадратичной нелинейной восприимчивости ($\chi^{(2)} = 125 \text{ pm/V}$ для CsGeI_3 ; $\chi^{(2)} = 161 \text{ pm/V}$ для MAGeI_3) и возможности получения простыми растворными методами синтеза. В ходе работы были изготовлены высококачественные тонкие пленки CsGeI_3 и MAGeI_3 , демонстрирующие интенсивную генерацию второй гармоники [1], после чего были получены метаповерхности методом нанопечатной литографии, позволяющие существенно повысить эффективность ГВГ. Проведенные численное моделирование и оптические исследования подтверждают улучшенные нелинейные свойства полученных структур.

Полученные результаты демонстрируют, что метаповерхности на основе бессвинцовых перовскитов обладают высоким потенциалом для практического применения в широком спектре задач нанофотоники, открывая путь к новым поколениям фотонных устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-73-20189).

1. S. Ilin et al., *Adv. Opt. Mater.*, **12**(22), 2400170 (2024).

И.Э. Калантаевский (асп., 2 год, НИУ ИТМО, ФТМФ),
Т.Д. Горелкина (студ., 2 курс маг., НИУ ИТМО, ФТМФ),
А.И. Чернов (д.ф.-м.н., в.н.с., зав. лаб., МФТИ),
В.А. Кравцов (PhD, в.н.с., НИУ ИТМО, ФТМФ)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ МОД В ДВУХМЕРНОМ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКЕ CrSBr ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Сильное взаимодействие между светом и веществом можно реализовать за счёт связывания экситонных резонансов в CrSBr с резонансными оптическими модами в автономных резонаторах, например, в зеркалах на основе распределённых брэгговских отражателей [1] или в субволновых дифракционных решётках [2]. Однако, несмотря на совместимость с планарными технологиями, такие структуры часто требуют сложного технологического процесса, что ограничивает их возможность перестройки и затрудняет интеграцию в реальные устройства.

В настоящей работе исследовались волноводные поляритоны в материале CrSBr, представляющем особый интерес для поляритоники благодаря высокой энергии связи экситонов (~ 0.5 эВ) и большой силе осциллятора (2.03 (эВ) 2) [3]. Наблюдение поляритонных мод осуществлялось методом спектроскопии в задней фокальной плоскости микрообъектива с применением линзы твёрдой иммерсии, что позволило эффективно возбуждать и регистрировать моды, расположенные ниже светового конуса [4].

Многослойный образец CrSBr был получен методом механического отшелушивания из объёмного кристалла, после чего сухим переносом помещён на цилиндр, которой при помощи плавиковой кислоты был вытравлен в подложке SiO_2 . Толщина образца CrSBr, обеспечивающая формирование единственной оптической моды, контролировалась с помощью атомно-силовой микроскопии. При помощи метода спектроскопии в задней фокальной плоскости микрообъектива с применением линзы твёрдой иммерсии были получены экспериментальные спектры отражения и фотолюминесценции за пределами светового конуса, демонстрирующие антипересечение при энергии около 1.34 эВ, что свидетельствует о сильной связи между экситонным резонансом и волноводной модой в CrSBr. Для подтверждения этих результатов было проведено моделирование было проведено моделирование коэффициента отражения с разрешением по углу методом матриц переноса, которое показало хорошее качественное соответствие с экспериментом.

Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований волноводных поляритонов и разработки устройств, полностью основанных на ван-дер-ваальсовых двухмерных материалах.

1. T. Wang et al., *Nat. Commun.*, **14**, 5966 (2023).
2. Q. Li et al., *Phys. Rev. Lett.*, **133**, 266901 (2024).
3. C. Li et al., *Adv. Funct. Mater.*, **34**, 2411589 (2024).
4. V.I. Kondratyev et al., *Nano Lett.*, **23**, 7876 (2023).

А.Р. Колесникова (студ., 2 курс маг., Университет ИТМО, ФТ МФ),
Д.А. Литвинов (асп., 4 год, ИМТО, ФТ МФ),
А.Д. Синельник (к.ф.-м.н., ИТМО, ФТ МФ)

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ ГЮЙГЕНСА НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ С ФАЗОВОЙ ПАМЯТЬЮ

Метаповерхности открывают широкие возможности для управления светом и являются одним из наиболее активно развивающихся направлений нанофотоники. Ключевое преимущество метаповерхностей заключается в возможности проектировать и изготавливать структуры с требуемыми свойствами для каждой конкретной задачи. Однако традиционные метаповерхности имеют фиксированные параметры, определяемые геометрией, и не подлежат перестройке, что ограничивает их функциональность. Перспективным решением являются перестраиваемые метаповерхности на основе энергонезависимых материалов с фазовой памятью, таких как GeSbTe (GST). Благодаря обратному переходу между аморфной и кристаллической фазами этих материалов становится возможным динамическое управление их оптическими свойствами и интеграция в современные электронные и оптические технологии [1].

В данной работе представлено численное исследование перестраиваемых сферических наночастиц из GST для телекоммуникационного диапазона длин волн. Были определены геометрические параметры сферических наночастиц, удовлетворяющих первому и второму условиям Керкера, которые обеспечивают преимущественное рассеяние света вперёд или назад. Показано, что изменение фазы GST позволяет включать и выключать эффект Керкера для отдельной частицы.

Также были исследованы перестраиваемые метаповерхности Гюйгенса на основе GST для телекоммуникационного диапазона, собранные из массивов таких наночастиц. Эти структуры демонстрируют характерные для метаповерхностей Гюйгенса свойства избирательного пропускания или отражения, которые также можно динамически переключать или выключать, изменяя фазовое состояние материала. Поскольку одна и та же частица может удовлетворять двум различным условиям эффекта Керкера, спектральным положением резонансов пропускания и отражения метаповерхности можно управлять, варьируя период решётки.

Интеграция метаповерхностей в оптоэлектронные устройства открывает значительные перспективы для создания сверхкомпактных, эффективных и многофункциональных систем. Полученные результаты показывают, что перестраиваемые метаповерхности на основе GST могут найти применение в фотонных интегральных схемах, включая устройства телекоммуникационного диапазона.

Работа была выполнена при поддержке РНФ (проект № 24-72-10038).

1. S.T. Ha et al., *Science*, **386**, 6725 (2024).

М.Р. Шарнас (асп., 1 год, СПбПУ, ВИФШ; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, лаб. физ. ТЭ),
Д.А. Пшенай-Северин (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, лаб. физ. ТЭ, СПбПУ, ВИФШ),
А.Т. Бурков (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, лаб. физ. ТЭ),
Д.Б. Айрапетян (РАУ, Армения)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ
ВРЕМЕНИ РЕЛАКСАЦИИ НА РАСЧЕТ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
CoGe И МАТЕРИАЛОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

Моногерманид кобальта (CoGe) – термоэлектрический материал для среднего диапазона температур (300–700 К). Он интересен возможностью легирования и создания твердых растворов ($\text{CoGe}_{1-x}\text{Si}_x$, $\text{CoGe}_{1-x}\text{Sn}_x$) для оптимизации термоэлектрических свойств. Кубическая фаза CoGe типа B-20 обладает асимметричной электронной зонной структурой, включает подобие дираковского конуса и плоские зоны вблизи уровня Ферми. Это обуславливает высокие значения коэффициента Зеебека.

В данной работе транспортные свойства моногерманида кобальта исследовались с помощью программы Perturbo, основанной на *ab initio* расчетах электрон-фононного взаимодействия, что позволяет учесть энергетическую зависимость времени релаксации. По сравнению с CRTA, такой подход верно показывает тип основных носителей, а также позволяет лучше моделировать процессы переноса. Электронная структура и матричные элементы для e-ph взаимодействия рассчитывались в Quantum Espresso.

Полученные значения коэффициента Зеебека ($S = -65.17 \text{ мкВ/К}$ при 300 К) хорошо согласуются с экспериментальными данными (-82 мкВ/К) и превосходят по точности оценки, выполненные в приближении постоянного времени релаксации (CRTA, $S = +69.96 \text{ мкВ/К}$). Расчетная электропроводность составила $0.41 \cdot 10^6 \text{ См/м}$, что близко к экспериментальному значению $0.5 \cdot 10^6 \text{ См/м}$. Решетчная теплопроводность $4.72 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ также воспроизводит эксперимент ($5.3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). Расчетная термоэлектрическая добротность CoGe составила $ZT = 0.065$ при 300 К, тогда как экспериментально ZT достигает 0.112.

Таким образом, в работе смоделированы легированные системы $\text{CoGe}_{1-x}\text{Me}_x$ ($\text{Me} = \text{Fe}, \text{Ni}$). Показана возможность управления типом проводимости: переход от n- к p-типу с изменением состава. Полученные результаты подтверждают термоэлектрический потенциал CoGe, а также эффективность учета энергетической зависимости времени релаксации для систем с особенностями зонной структуры.

РОЛЬ ДИФФУЗИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ГАЛОГЕНИДНЫХ ПЕРОВСКИТНЫХ ЛЮМИНОФОРМАХ С ПАМЯТЬЮ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Фон Неймановская архитектура была основой для большинства современных компьютеров, однако ее ограничения в производительности и энергоэффективности стали очевидны с развитием вычислительных систем, в частности для задач искусственного интеллекта [1]. Одним из альтернативных вариантов является нейроморфная архитектура, работающая по образу и подобию человеческого мозга. Для увеличения энергоэффективности и скорости вычислений можно использовать оптическую реализацию нейроморфных систем, элементами которой являются фотолюминесцирующие объекты, обладающие функциями памяти, иначе мемлюморы [2]. Металлогалогенидные перовскиты обладают всеми необходимыми свойствами, а также имеют такие преимущества как доступность синтеза и относительная простота изготовления мемлюмолов на их основе [3]. В данной работе было исследовано влияние диффузии носителей заряда в мемлюмалахах на основе металлогалогенидных перовскитов на их люминесцентные свойства.

Исследование зависимости квантового выхода микрокристаллов CsPbBr_3 от их линейного размера проводилось при помощи обработки двух изображений – флуоресцентного и со сканирующим электронным микроскопом (СЭМ). Из полученных результатов было установлено, что интегральное значение фотолюминесценции при изменении линейных размеров кристаллов от 100 до 1000 нм практически не изменяется, а квантовый выход уменьшается пропорционально обратному квадрату.

Для пленок MAPbBr_3 толщина измерялась при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ) и составила от 70 до 450 нм. Динамика носителей заряда изучалась методом времязарегистрированной фотолюминесценции с временным разрешением до 100 пс. Полученные зависимости показали наличие двух компонент времени жизни носителей: быструю (порядка единиц нс), связанную с диффузией и медленную. Численное моделирование на основе модели Шокли-Рида-Холла с добавлением диффузии подтвердили экспериментальные результаты, однако выявило количественные расхождения между теорией (моделью) и экспериментом.

В результате работы было установлено, что предпочтительнее работать с независимыми элементами, не связанными друг с другом в режиме, где диффузия минимизирована. Данный результат важен для разработки мемлюмальных массивов, с плотностью элементов, сопоставимой с современными транзисторными схемами (10^{10} см^{-2}).

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 25-29-00520).

1. P.A. Merolla et al., *Science*, **345**, 668–673 (2014).
2. A. Marunchenko et al., *ACS Energy Lett.*, **9**, 2075–2082 (2024).
3. A.P. Pushkarev et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 1040–1048 (2019).

З.М. Яшкин (студ., 2 курс маг., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),

М.В. Захарченко (м.н.с., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),

Г.Ф. Глинский (д.ф.-м.н., проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

ЗОННАЯ СТРУКТУРА РТ-СИММЕТРИЧНЫХ ФОНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

В рамках макроскопической теории фононные кристаллы (ФК) можно рассматривать как структуры, упругие свойства которых периодически изменяются в пространстве. Основными развивающимися направлениями при использовании ФК являются: разработка на их основе устройств, способных работать в ТГц диапазоне частот, а также устройств вибраакустического контроля с применением пьезоэлектрических ФК [1].

В настоящее время одними из перспективных метаматериалов для создания ФК являются периодические неэрмитовы структуры с РТ (Parity-time) симметрией, то есть системы с пространственно-временной модуляцией свойств материала. В таких структурах за счет правильного сочетания областей усиления и потерь могут формироваться так называемые особые точки в частотном спектре ФК [1, 2], соответствующие сингулярностям в зависимости частоты от параметров системы. В этих точках собственные значения частоты становятся вырожденными и любое возмущение приводит к их расщеплению, что может быть использовано при разработке чувствительных элементов для сенсоров. Несмотря на активное изучение ФК, в литературе отсутствует общий подход к решению задачи о распространении упругой волны в структурах с периодически изменяющимися плотностью кристалла и тензором модулей упругости, при наличии пространственных областей с потерями и усилением.

Настоящая работа посвящена исследованию закона дисперсии собственных мод в ФК с РТ-симметрией. В рассматриваемом нами приближении уравнения колебаний сплошной среды можно представить в следующей операторной форме:

$$(\hat{s}\hat{k})\hat{c}(\hat{s}\hat{k})|u\rangle = \omega^2 \hat{\mu}|u\rangle.$$

Здесь \hat{s} – оператор поляризации акустических мод, \hat{k} – оператор волнового вектора, \hat{c} и $\hat{\mu}$ – операторы модулей упругости и плотности кристалла соответственно, $|u\rangle$ – вектор в комплексном гильбертовом пространстве, определяющий поле смещения. Переход в этом уравнении к базису с определенным значением волнового вектора $|\mathbf{k}\rangle$ в рамках биортогонального формализма [3] позволяет свести задачу определения зонной структуры фононного кристалла к решению задачи определения собственных чисел и собственных столбцов неэрмитовой матрицы. Развитый подход позволяет автоматически учитывать граничные условия на гетероинтерфейсах, а также рассматривать структуры с произвольной анизотропией упругих и механических свойств.

1. Y. Jin et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **58**, 113001 (2025).
2. A. Gupta, R. Thevamaran, *J. Phys. Mater.*, **6**, 035011 (2023).
3. M.V. Zakharchenko, G.F. Glinskii, *Phys. Scr.*, **100**, 045212 (2025).

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Артеев Д. С.	70	Корниенко П. Д.	78
Ахундов А. Я.	7	Кравченко А. С.	79
Бабин Д. В.	8	Куватов М. М.	25
Балашов В. С.	9	Кучинов Д. А.	50
Банникова А. С.	71	Лакунцова О. Е.	32
Батаев М. Н.	41	Легостаев К. А.	26
Батуева А. В.	10	Лихачев К. В.	15
Башегурова Е. А.	72	Ляшенко А. А.	16
Белоконь И. С.	11	Малевская А. Д.	80
Бобров М. А.	73	Малыш М. А.	51
Будник В. С.	21	Малышкин В. Г.	5
Васильев С. Я.	42	Машинский К. В.	52
Вейшторт Г. П.	43	Мельниченко И. А.	81
Ведь М. В.	74	Михайлов Д. А.	82
Войтович В. И.	28	Моисеенко И. М.	53
Геворгян Д. Г.	44	Мунтян О. А.	54
Горелкина Т. Д.	96	Мурзин А. О.	83
Гришин А. Е.	22	Мусин Т. И.	33
Дерибина Е. И.	45	Наапетян А. А.	55
Егоров Д. А.	29	Назаров Р. С.	34
Ермакова Е. А.	75	Некрасов А. С.	84
Завьялова Е. С.	46	Нечеухина Л. В.	56
Замолоцких С. С.	23	Никитин А. А.	85
Здоровейщев Д. А.	24	Николаева А. В.	57
Зедоми Т. Э.	47	Оськин Е. В.	58
Зибинский А. Л.	48	Панфилов А. С.	35
Зографян Д. С.	49	Петухов Н. А.	59
Жиляков В. Л.	12	Подопригора В. В.	86
Исаков И. Д.	13	Поленок Е. Д.	60
Иванов А. А.	30	Прудченко К. К.	87
Ильин С. П.	97	Разова А. А.	88
Калантевский И. Э.	98	Ремеле В. Е.	27
Карасева Е. П.	76	Ризаев А. Э.	89
Караулов Д. А.	14	Родиончикова А. Д.	61
Кириленко Я. Д.	31	Ружевич М. С.	36
Ковач Я. Н.	77	Сайтов Ш. Р.	62
Колесникова А. Р.	99	Сапожникова Е. В.	90

Сарыпов Д. И.	37	Чепуров Е. А.	67
Сафонов И. В.	91	Чжэн Шимин	39
Севастьянова И. М.	63	Чуманов И. В.	40
Семёнов Д. А.	17	Чуприн И. А.	68
Смирнова В. А.	18	Шарнас М. Р.	100
Сотничук М. К.	38	Шевага Н. И.	19
Султанов О. Ш.	64	Шенцев А. М.	69
Татаринов Д. А.	65	Шугабаев Т. М.	94
Тонков Д. Н.	66	Шушканов И. В.	95
Торопов А. А.	6	Экгардт А. А.	101
Федосов И. С.	92	Яковлева В. В.	20
Фунтикова А. С.	93	Яшкин З. М.	102

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОСТРУКТУР, ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Тезисы докладов

Всероссийской научной молодежной конференции

24–28 ноября 2025 года

Санкт-Петербург

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

Подписано в печать 11.11.2025. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 6,75. Тираж 140. Заказ 5086.

Отпечатано с готового оригинал-макета,
представленного оргкомитетом конференции,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.