

# ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОСТРУКТУР, ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Тезисы докладов Всероссийской  
научной молодежной конференции



28 ноября – 2 декабря 2022  
Санкт-Петербург

ПОЛИТЕХ-ПРЕСС  
Санкт-Петербург  
2022

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

28 ноября – 2 декабря 2022 года

Санкт-Петербург



**ПОЛИТЕХ-ПРЕСС**

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

Санкт-Петербург

2022

ББК 22.3  
Ф48

**Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника** : тезисы докладов Всероссийской научной молодежной конференции, 28 ноября – 2 декабря 2022 г., Санкт-Петербург. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 116 с.

ISBN 978-5-7422-7908-2

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022

## 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

Госзадание Минобрнауки РФ №075-03-2022-010/9  
ООО «Тидекс»  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

### Программный комитет

*Председатель* — Р.А. Сурис, акад. РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

*Заместитель председателя* — Д.А. Фирсов, СПбПУ, С.-Петербург

### Члены программного комитета:

В.Ф. Агекян, СПбГУ, С.-Петербург	В.П. Кочерешко, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург
В.Я. Алешкин, ИФМ РАН, Н. Новгород	И.В. Рожанский, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург
С.Ю. Вербин, СПбГУ, С.-Петербург	А.А. Саркисян, Российско-армянский университет, Ереван, Армения
М.М. Глазов, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург	Д.Р. Хохлов, МГУ, Москва
А.Е. Жуков, НИУ ВШЭ, С.-Петербург	Т.В. Шубина, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург
В.И. Зубков, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», С.-Петербург	
М.С. Каган, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва	

### 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	Г.А. Мелентьев, СПбПУ, С.-Петербург
Т.А. Гаврикова, СПбПУ, С.-Петербург	В.Ю. Паневин, СПбПУ, С.-Петербург
В.Э. Гасумянц, СПбПУ, С.-Петербург	А.Д. Петрук, СПбПУ, С.-Петербург
А.Ю. Егоров, Алфёровский университет, С.-Петербург	А.А. Саркисян, РАУ, Ереван, Армения
В.А. Зыков, СПбПУ, С.-Петербург	А.В. Филимонов, Алфёровский университет, С.-Петербург
В.П. Кочерешко, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург	В.А. Шалыгин, СПбПУ, С.-Петербург
	И.И. Щипачева, СПбПУ, С.-Петербург

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ (ПД)	5
ОБЪЕМНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ (ОСП)	7
ПРОЦЕССЫ РОСТА, ПОВЕРХНОСТЬ, ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА (ПР)	19
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ, СВЕРХРЕШЕТКИ, КВАНТОВЫЕ ЯМЫ (ГСКЯ)	32
КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ, КВАНТОВЫЕ НИТИ И ДРУГИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ (КТКН)	62
ПРИБОРЫ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ (ПОиН)	93
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ (НМ)	110
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	114

## ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ (ПД)

УДК 539.12

А.М. Быков (д.ф.-м.н., проф., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, СПбПУ)

### АНТИМАТЕРИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

В докладе обсуждаются проблемы происхождения и эволюции античастиц в космосе. Приведены результаты прямых и косвенных наблюдений космических позитронов, антипротонов и анти-ядер на внеатмосферных космических аппаратах. Известны источники позитронов, связанные с распадом нестабильных ядер, произведенных в процессах синтеза химических элементов в звездах, с рождением электрон-позитронных пар в магнитосферах пульсаров и неупругих взаимодействиях космических лучей со средой. Позитроны также могут быть продуктами аннигиляции и взаимодействий гипотетических частиц темной материи, и поэтому наблюдения космических позитронов используют для проверки возможных моделей темной материи. Особый интерес для космологии представляют поиски анти-ядер. Наблюдаемое сегодня глобальное преобладание вещества над антивеществом, а также малое (порядка  $6 \cdot 10^{-10}$ ) значение отношения плотности барионов к плотности фотонов связывают с малой асимметрией барионов и антибарионов в ранней Вселенной. В космологических моделях данная асимметрия обусловлена некоторыми различиями в законах взаимодействия частиц и античастиц, что проверяют в ускорительных экспериментах. Эта идея, сформулированная А.Д. Сахаровым в 1967 г. в статье под названием «Нарушение СР-инвариантности. С-асимметрия и барионная асимметрия Вселенной», и три его условия возникновения барионной асимметрии нашли развитие в современных космологических теориях. Поиск антивещества, наряду с гравитационно-волновой и нейтринной астрономией, позволяют делать заключения о характере фундаментальных процессов во Вселенной в области энергий, недостижимых для современных ускорителей частиц. Они необходимы для понимания генезиса барионов и лептонов, а также природы темной материи. Мы обсудим технику и результаты поиска частиц космической антиматерии [1] и аннигиляционного гамма-излучения [2] с использованием сверхпроводящих магнитов и полупроводниковых детекторов.

1. M. Aguilar, L.Cavasonza, G. Ambrosi et al The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station, *Physics Reports*, **894**, 1 (2021).

2. N.Prantzos, C.Boehm, A.M.Bykov et al The 511 keV emission from positron annihilation in the Galaxy, *Reviews of Modern Physics*, **81**, 1001 (2011).

## НОВЕЙШИЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ В ОБЛАСТИ МОЩНЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Инжекционные лазеры полосковой геометрии с торцевым выводом излучения являются исторически первым типом полупроводниковых лазеров и на сегодняшний момент наиболее проработанной и массово применяемой их конструкцией. Такие лазеры отличаются малыми размерами, высокой эффективностью преобразования электрической энергии в оптическую, высокими уровнями оптической мощности, технологичностью, надежностью и долгим сроком службы. Среди наиболее важных областей применения следует отметить накачку мощных твердотельных и волоконных лазеров, обработку материалов, медицину, дальнометрию и различные спецприменения (наведение, целеуказание, газоанализ).

Доклад будет посвящен современным тенденциям в области разработок и исследований торцевых лазерных диодов ближнего ИК диапазона длин волн. Будут представлены последние результаты, достигнутые как в России, в том числе в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, так и в мире. Будут обсуждаться конструкции лазерных диодов на основе квантоворазмерных гетероструктур на основе Al-In-Ga-As-P твердых растворов, выращенных на подложках GaAs (длины волн 630-1100 нм) [1-4] и InP (длины волн 1260-2000 нм) [5,6] методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Главное внимание будет уделено их основным выходным электрооптическим характеристикам - оптическая мощность, КПД, расходимость, спектральная и пространственная яркость, температурная стабильность, надежность (срок службы), а также их стоимость. Будут рассмотрены следующие типы излучателей, работающие при непрерывной и импульсной (длительность от 1 нс до 100 нс) накачке:

- мощные многомодовые одиночные полупроводниковые лазеры с широкой апертурой излучения (100-800 мкм);
- мощные лазерные линейки и матрицы;
- одномодовые и многомодовые лазерные диоды.

1. V.V. Zolotarev et al., *Semicond.Sci.Technol.*, **35(1)**, ArtNo:015009 (2020).
2. И.С. Шашкин и др., *ФТП*, **54(4)**, стр. 408-413 (2020).
3. D.A. Veselov et al., *Semicond.Sci.Technol.*, **36(11)**, ArtNo: 115005 (2021).
4. П.С. Гаврина и др., *Квант. электроника*, **51(2)**, стр. 129-132 (2021).
5. Н.А. Волков и др., *Квант. электроника*, **51(4)**, стр. 283-286 (2021).
6. В.Н. Святогоров и др., *Квант. электроника*, **51(10)**, стр. 909-911 (2021).

## ОБЪЕМНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ (ОСП)

УДК 537.6

Н.А. Богословский (н.с., ФТИ им А.Ф. Иоффе),  
П.В. Петров (с.н.с., ФТИ им А.Ф. Иоффе),  
Н.С. Аверкиев (зав. сек., ФТИ им А.Ф. Иоффе)

### АНАЛИТИЧЕСКИЙ И ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТЫ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ СПИНОВ В МОДЕЛИ ИЗИНГА

В последнее время активно изучаются свойства материалов с сильными электронными корреляциями. Во многих случаях магнитные атомы в изучаемых структурах расположены хаотически, в частности магнитные примеси в полупроводниках. При этом теоретически магнитные свойства материалов изучаются, как правило, на регулярных, или близких к регулярным решетках. Магнитные свойства систем с полностью случайным расположением магнитных атомов изучены недостаточно. Это может быть связано как со сложностью рассматриваемой модели, так и с различными подходами к описанию регулярных и нерегулярных систем.

В настоящей работе исследуется модель Изинга с неупорядоченным расположением спинов и водородоподобной зависимостью обменного взаимодействия от расстояния. Нам удалось применить методы статистической физики и численные алгоритмы для вычисления функции распределения рассматриваемой системы  $f(E, M)$  в зависимости от полной обменной энергии  $E$  и магнитного момента  $M$ . Зная функцию распределения несложно рассчитать средний магнитный момент системы  $\bar{M}$  и магнитную восприимчивость системы  $\chi = \partial \bar{M} / \partial B$  в зависимости от температуры и магнитного поля.

Существуют различные алгоритмы для численного расчета функции распределения, самым известным из них является алгоритм Метрополиса-Гастингса. Этот алгоритм позволяет посчитать функцию распределения вблизи максимума, но дает слишком большие шумы на хвостах функции распределения. В настоящей работе был использован алгоритм Ванга-Ландау, который позволяет получить равномерную точность вычислений во всем рассматриваемом диапазоне. Вычисления производились как для полной функции распределения, зависящей от энергии и магнитного момента, так и для функции распределения по энергии при фиксированном значении магнитного момента системы.

Функция распределения  $f(E, M)$  также была посчитана аналитически. Показано, что функция распределения по энергии хорошо описывается нормальным распределением со средним значением и дисперсией, зависящими от магнитного момента системы. Полученное аналитическое выражение хорошо согласуется с численными расчетами. Таким образом, в настоящей работе показано, что магнитные свойства системы, состоящей из случайно расположенных спинов, можно рассчитать аналитически при помощи методов статистической физики.

Д.А. Колюх (асп., 2 год, и.о. м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
Я.М. Бельтюков (к.ф.-м.н., и.о. зав. сек., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

## НЕАФФИННЫЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В современной теории конденсированных сред исследование структурных особенностей аморфных материалов является одной из важных задач. Хорошо известно, что все аморфные вещества с самыми различными типами ближнего порядка (ковалентные сетки, металлические стекла, полимеры и др.) имеют ряд общих колебательных свойств. Это линейная по температуре теплоемкость и квадратичная теплопроводность при температурах около 1 К, избыточная плотность колебательных состояний при температурах порядка 5–20 К. Наличие таких универсальных явлений позволяет сделать предположение, что они основаны на общих особенностях строения неупорядоченных материалов.

Отличительной чертой аморфных систем от кристаллических является отсутствие порядка в расположении их структурных элементов на микроскопическом уровне. Это приводит к существенной неоднородности локальных деформаций, характерный масштаб которых зависит от силы беспорядка и может составлять несколько нанометров [1]. На этих масштабах неаффинности описание аморфного тела как континуальной среды неприменимо, что вызывает большой теоретический интерес к проблеме исследования неаффинных деформаций. Одним из способов изучения неаффинности является рассмотрение упругих свойств нанокompозитных объектов с размерами структурных элементов, сопоставимых с масштабом неаффинных смещений. Экспериментально установлено, что добавление включений нанометрового размера может сильнее влиять на макроскопические свойства нанокompозитов по сравнению с добавлением включений большего размера при той же объемной доле [2].

Для изучения неаффинных деформаций в аморфных твердых телах нами использовались методы теории случайных матриц, примененной ранее для описания бозонного пика и кроссовера Иоффе-Регеля [3]. В рамках этого подхода нами разработано полное теоретическое описание эффективной упругости, показывающее экспоненциальный спад упругих модулей вблизи жесткой наночастицы в зависимости от расстояния до нее [4]. Вокруг наночастицы образуется эффективная упругая оболочка с толщиной порядка масштаба неаффинных деформаций, которая увеличивает эффективный объем наночастиц и приводит к увеличению их влияния на макроскопические упругие свойства нанокompозитов. Результаты согласуются с результатами расчета молекулярно-динамической модели полистирола с нановключениями SiO<sub>2</sub> [4].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-72-10083.

1. F. Leonforte et al., *Phys. Rev. B*, **72**, 224206 (2005).
2. О. Москалюк, А. Самсонов, И. Семенова, В. Смирнова, В. Юдин, *ЖТФ*, **87**, 266 (2017).
3. D.A. Conyuh, Y.M. Beltukov, *Phys. Rev. B*, **103**, 104204 (2021).
4. Y.M. Beltukov, D.A. Conyuh, I.A. Solov'yov, *Phys. Rev. E*, **105**, L012501 (2022).

В.М. Литвяк (к.ф.-м.н., м.н.с., СПбГУ, Лаборатория Оптики Спина им. И.Н. Уральцева),  
Р.В. Чербунин (к.ф.-м.н., доц., СПбГУ, каф. ФТТ),  
К.В. Кавокин (д.ф.-м.н., в.н.с., СПбГУ, Лаборатория Оптики Спина им. И.Н. Уральцева)

## ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ЯДЕРНОЙ СПИНОВОЙ СИСТЕМЫ ОБЪЕМНЫХ СЛОЕВ n-GaAs МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ ОТОГРЕВА

Поляризация ядерных спинов решетки в полупроводниках в слабых внешних магнитных полях возможна благодаря явлению оптической ориентации [1]. Ориентированные по спину электроны поляризуют ядерные спины через контактное сверхтонкое взаимодействие. Такое взаимодействие приводит к появлению ядерной поляризации, характеризующейся эффективным магнитным полем (поле Оверхаузера), а также сопровождается охлаждением ядерной спиновой системы (ЯСС). Оптическое охлаждение позволяет получать ядерные спиновые температуры на несколько порядков ниже температуры решетки. Охлажденная ЯСС способна поглощать мощность переменного магнитного поля в звуковом диапазоне частот, что приводит к ее отопреву. Это свойство лежит в основе метода оптически-детектируемого ядерного магнитного резонанса (ОДЯМР), который широко используется для изучения свойств различных материалов.

В настоящей работе представлен обзор возможностей изучения свойств ЯСС объемных кристаллов n-GaAs с помощью методики спектроскопии отогрева. Данная методика похожа на ОДЯМР, но реализуется в нулевом и слабых внешних магнитных полях. Начало спектроскопии отогрева ядерных спинов было положено в работе [2], мы развили и автоматизировали ее [3]. В частности, данная методика позволяет глубоко охлаждать ЯСС с помощью оптического охлаждения и адиабатического размагничивания до спиновых температур (разных знаков) порядка единиц микрокельвин, а также измерять величины локального поля и поля Найта. Основным преимуществом является возможность измерять спектры поглощения ЯСС. В спектре поглощения в нулевом статическом магнитном поле проявляется наличие квадрупольных взаимодействий в виде двух пиков поглощения, вместо одного диполь-дипольного пика. Измеряя спектры поглощения в различных статических магнитных полях, можно наблюдать, как два квадрупольных пика поглощения эволюционируют и переходят в зеемановские линии и квадрупольные спутники [3]. Также данная методика позволяет получать частотные и временные корреляционные функции охлажденной ЯСС. В представленной работе приведены некоторые характеристики ЯСС объемных слоев n-GaAs, полученные методикой спектроскопии отогрева.

1. Optical Orientation, под ред. F. Meier, В. P. Zakharchenya (1984).
2. V. K. Kalevich et al., *Bull. Acad. Sci. USSR Phys.Ser.*, **47**, №5 (1983).
3. V. M. Litvyak et al., *Phys.Rev.B*, **104**, 235201 (2021).

И.В. Осинных (м.н.с., ИФП СО РАН, лаб. 37, асс., НГУ, каф. ЕНД),  
Т.В. Малин (инж., ИФП СО РАН, лаб. 37),  
К.С. Журавлёв (д.ф.-м.н., в.н.с., ИФП СО РАН, лаб. 37)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПОВ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ И КОНЦЕНТРАЦИЙ ДОНОРОВ И АКЦЕПТОРОВ В GaN ПО КИНЕТИКЕ ЗАТУХАНИЯ И ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ОТ МОЩНОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Нитриды металлов III группы и их твердые растворы являются прямозонными полупроводниками, применяющимися для изготовления светоизлучающих приборов для видимой и ультрафиолетовой областей спектра. Создание эффективных светоизлучающих полупроводниковых приборов невозможно без легирования эпитаксиальных слоев для получения n- и p- типа проводимости. Однако эпитаксиальный рост полупроводниковых структур сопряжен с образованием точечных дефектов, которые могут быть акцепторами и компенсировать легирующую примесь.

В спектрах фотолюминесценции (ФЛ) GaN известна желтая полоса люминесценции с максимумом около 2.2 эВ, связанная с электронными переходами на центры с энергетическими уровнями, лежащими в глубине запрещенной зоны, однако механизм рекомбинации и природа центров до конца не установлены. В настоящей работе приведены результаты исследования кинетики и зависимости от мощности возбуждения желтой полосы ФЛ в легированных кремнием слоях GaN, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на сапфировых подложках, для определения механизма рекомбинации желтой полосы и концентраций доноров и акцепторов в них. Концентрация атомов кремния в GaN менялась в пределах  $1 \times 10^{18} - 2.2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Для измерения ФЛ в широком диапазоне мощности возбуждения использовалась 4-ая гармоника стационарного YAG лазера ( $\lambda=266 \text{ нм}$ ) с максимальной плотностью мощности излучения  $12.6 \text{ Вт/см}^2$ . Кривые затухания были измерены после короткого импульсного возбуждения неравновесных электронно-дырочных пар 4-ой гармоникой импульсного Nd:YLF лазера ( $\lambda=263 \text{ нм}$ ). Для анализа зависимости от мощности возбуждения построена модель электронных переходов в компенсированном GaN при межзонной генерации электрон-дырочных пар, в рамках модели были рассчитаны зависимости темпов различных каналов рекомбинации от плотности мощности возбуждения.

Спектры стационарной ФЛ GaN содержат полосы краевой ФЛ с максимумом около 3.45 эВ и желтой полосы с максимумом около 2.2 эВ, причем желтая полоса подавлена при концентрации кремния выше  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Степенная зависимость интенсивности желтой полосы ФЛ от плотности мощности возбуждения и длительная (десятки микросекунд) не экспоненциальная кинетика показывают, что она обусловлена донорно-акцепторными оптическими переходами. Анализ кинетики затухания и зависимостей интенсивности межзонной и донорно-акцепторной полос ФЛ от плотности мощности возбуждения позволил оценить концентрации доноров и акцепторов в GaN.

А.Д. Петрук, Н.Ю. Харин (асп., 1 год., СПбПУ, ВИФШ),  
Д.А. Фирсов (д.ф.-м.н., проф., СПбПУ, ВИФШ),  
А.А. Саркисян (д.ф.-м.н., проф., РАУ, Ереван)

## СТИМУЛИРОВАННАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА В ОБЪЁМНЫХ СЛОЯХ n-GaAs

Разработка источников терагерцового излучения является одной из важнейших задач современной оптоэлектроники. Создание оптических приборов на базе наногетероструктур, в том числе квантово-каскадных лазеров, является крайне дорогостоящим, так как требует выращивания сотен слоёв с чередующимися составами, что сильно ограничивает их применение. Альтернативой могут стать источники излучения на переходах с участием примесных состояний в объёмных эпитаксиальных слоях, поскольку энергии связи мелких примесей соответствуют терагерцовому диапазону. Большой объём активной области в сравнении со структурами с квантовыми ямами позволит увеличить интенсивность излучения.

Одним из методов увеличения интенсивности источника на примесных переходах электронов может служить организация опустошения основного примесного уровня стимулированным излучением ближнего инфракрасного диапазона [1]. С этой целью в представленной работе проведено экспериментальное исследование ближней инфракрасной фотолюминесценции при гелиевых температурах и разных интенсивностях оптического возбуждения. Использовалась микроструктура с эпитаксиальным слоем GaAs толщиной 0.52 мкм, легированным кремнием, и градиентным волноводом на полуизолирующей подложке GaAs. Для получения стимулированного излучения были изготовлены образцы в геометрии четырёхсклотового резонатора. Оптическое межзонное возбуждение осуществлялось импульсным лазером, работающим на длине волны 532 нм. На полученных спектрах спонтанного излучения при малых накачках наблюдается широкий пик, связанный с экситонами и наличием донорных примесей, а также более узкий пик, соответствующий остаточным акцепторным примесям. С увеличением накачки на длинноволновом плече широкого донорного пика возникает и быстро растёт узкая линия излучения. Зависимость её интенсивности имеет пороговый характер и более крутой наклон относительно зависимостей других пиков, что соответствует стимулированному излучению. С ростом накачки интенсивности пиков спонтанного излучения выходят на насыщение, что является типичным для полупроводниковых лазеров.

Обнаружение стимулированного излучения ближнего инфракрасного диапазона с участием донорных уровней позволит в дальнейшем провести исследование терагерцовой эмиссии в условиях эффективного опустошения конечных состояний.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00105.

1. I.S. Makhov et al., *Journal of Luminescence*, **210**, 352-357 (2019).

А.В. Соломникова (инж., СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
И.В. Клепиков (к.г.-м.н., асс., СПбГУ, каф. минералогии),  
Г.Е. Яковлев (к.ф.-м.н., асс., СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
Р.А. Двоглазов (студ., 5 курс, СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
Н.Н. Жогаль (студ., 5 курс, СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
В.И. Зубков (д.ф.-м.н., проф., СПбГЭТУ, каф. МНЭ)

## КОМПЛЕКСНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ БОЛЬШОЙ (8x8 мм) МНОГОСЕКТОРНОЙ ПЛАСТИНЫ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО НРНТ АЛМАЗА, ЛЕГИРОВАННОГО БОРОМ

Уникальные характеристики монокристаллического алмаза делают его самым перспективным материалом для развития электронной компонентной базы и создания приборов экстремальной и СВЧ-электроники [1]. Однако его широкое практическое использование, равно как и детальный анализ микроэлектронных свойств полученного материала, затруднены в силу отсутствия образцов достаточно больших размеров.

Данная работа представляет первые комплексные оптические и электрофизические исследования уникальной алмазной пластины типа Пв большого размера, пригодной в качестве основы приборной структуры; проведен анализ морфологии поверхности пластины, сделаны выводы о ее оптических характеристиках и распределении концентрации примеси. Многосекторная пластина размером 8×8×0.4 мм вырезана из объемного монокристалла НРНТ алмаза, легированного бором, перпендикулярно направлению [100] и визуально имеет вид «мальтийского креста». По краям пластины располагаются четыре голубых сектора кристаллографических направлений <111>, окаймляющие центральную прозрачную область (100). Различие в цветах областей определяется скоростью внедрения примеси в процессе роста и обсуждалось нами в статье [2].

Морфология поверхности образца исследовалась атомно-силовой микроскопией. Сканирование показало явное различие в качестве поверхности разных секторов: область (111) имеет наибольшую плотность упаковки атомов и поэтому сложнее всего поддается шлифовке. Снятые спектры поглощения в различных секторах позволили оценить ширину запрещенной зоны полупроводника. При облучении образца жестким УФ излучением (220 нм) были зарегистрированы спектры флуоресценции.

Концентрация примеси бора  $N_B$  в разных секторах образца регистрировалась методом инфракрасной FTIR-спектроскопии. Анализ спектров FTIR демонстрирует различие концентрации бора в секторах более чем в 30 раз: в секторе (100) бор не регистрируется ( $N_B < 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ), а в секторах (111) –  $N_B = 3.5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Большой размер образца позволил впервые в практике диагностики монокристаллического алмаза определить концентрацию основных носителей заряда методом электрохимического вольт-фарадного профилирования без изготовления контактов. Этим методом многосекторные алмазные пластины изучаются впервые. Полученный профиль показывает однородную концентрацию дырок по глубине сектора (100). Концентрация дырок составляет  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , что удовлетворительно коррелирует с данными FTIR.

1. J.Y. Tsao et al., Adv. Electron. Mater., 4(1), 2017, 1600501 DOI: 10.1002/aelm.201600501.
2. V. Zubkov, A. Solomnikova, A. Koliadin, J.E. Butler. Mater. Today Commun., 24, 100995 (2020). DOI:10.1016/j.mtcomm.2020.100995.

И.П. Вейшторт (студ., 1 курс маг., ИТМО, ФизФ;  
лаборант, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
А.М. Скоморохов (студ., 1 курс маг., ИТМО, ФизФ;  
лаборант, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
И.Д. Бреев (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

## ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОДМР-СПЕКТРА ВАКАНСИОННЫХ ЦЕНТРОВ СО СПИНОМ 3/2 В КАРБИДЕ КРЕМНИЯ ПОЛИТИПОВ 6H И 15R

Оптически управляемые твердотельные спиновые кубиты являются ключевым элементом квантовых вычислений. Эффективное извлечение излучаемых фотонов и надежность спин-фотонной системы имеют решающее значение для реализации протоколов квантового зондирования и необходимы для реализации квантовых повторителей. Несмотря на то, что карбид кремния (SiC) является очень перспективным материалом, содержащим высококогерентные вакансионные спиновые кубиты, недостатком их практического применения является их система уровней в возбужденном состоянии [1]. В исследовании изучены кремниевые вакансии (или сокращенно V-центры) со спином 3/2. Исследовалось излучение света вдоль и поперек гексагональной кристаллографической оси (с-оси) кристалла 15R-SiC, по аналогии с исследованиями, показанными в работе [1]. Изучено отличие оптического излучения V-центров в политипах 6H и 15R.

Исследования осуществлялись посредством метода оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР), сигнал которого регистрировался в зависимости от длины волны в диапазоне от 800-950 нм. Был проведен анализ влияния поляризации фотолуминесценции (ФЛ) на ОДМР спектр V-центров в 6H- и 15R-SiC. Полученные зависимости позволили оценить поляризацию диполя V-центров в политипе 15R и подтвердить поляризацию диполей V-центров в 6H. Из угловых поляризационных зависимостей излучения может быть сделан вывод о возможности применения спин-фотонной квантовой запутанности на основе данных центров

1. Inverted fine structure of a 6H-SiC qubit enabling robust spin-photon interface. I.D. Breev, Z. Shang, A.V. Poshakinskiy et al, NJP Quantum Information 8, 23 (2022).

О.Е. Лакунцова (студ., 1 курс маг., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),  
Д.Д. Фирсов (к.ф.-м.н., доц., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ДВУМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ХАЛЬКОГЕНИДОВ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

В настоящее время активно исследуются полупроводниковые соединения из группы халькогенидов, особенность которых заключается в том, что при понижении толщины объемного кристалла вплоть до единичных монослоев происходит изменение зонной структуры материала. Путём комбинации монослоев различных халькогенидов возможно создание т.н. Ван-дер-Ваальсовых гетероструктур [1], которые являются перспективными для применения в нанотранзисторах, фотоприемниках, светодиодах и для оптической модуляции.

В данной работе исследовались оптические свойства объемных кристаллов двух полупроводниковых халькогенидов: InTe и MoS<sub>2</sub>. Дисульфид молибдена был выбран для исследования, как наиболее востребованный материал данного класса [1], в то время как теллурид индия на данный момент является малоизученным. При изучении MoS<sub>2</sub> производились измерения спектров модуляционного отражения (фотоотражения) в области прямых межзонных оптических переходов с участием связанных экситонов при разных температурах. Для InTe были проведены измерения спектров коэффициента отражения, а также разностного отражения при воздействии непрерывной лазерной засветки. Измерения осуществлялись на установке на базе фурье-спектрометра Vertex 80 [2]. Для анализа спектров отражения производилась оценка величины показателя поглощения, а спектры модуляционного отражения анализировались по методам, описанным в статье Hosea [3].

В результате проделанной работы для теллурида индия были выявлены 3 оптических перехода: около 0,4 эВ – непрямой, 1,245-1,265 эВ и 1,67 эВ – прямые переходы. Для дисульфида молибдена были идентифицированы экситонные переходы в спектре фотоотражения, включая возбужденные состояния, а также исследована их температурная зависимость в интервале от 10 К до 320 К. Зависимость была описана эмпирическим выражением Варшни, из которого были получены соответствующие коэффициенты для прямого экситонного перехода в дисульфиде молибдена.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФ, проект #22-29-20141.

1. Geim A. K., Grigorieva I. V. Nature 499.7459 (2013): 419-425.
2. Firsov, D. D., Komkov O. S. Technical Physics Letters 39.12 (2013): 1071-1073.
3. Hosea, T. J. C. Physica Status Solidi (b) 189.2 (1995): 531-542.

Р.С. Назаров (студ., 1 курс маг., СПбГУ, каф. фотоники),  
 И.А. Соловьёв (м.н.с., СПбГУ, каф. фотоники),  
 Ю.В. Капитонов (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ, каф. фотоники)

### ФОТОННОЕ ЭХО В МОНОКРИСТАЛЛЕ ГАЛОГЕНИДНОГО ПЕРОВСКИТА $\text{MABrI}_3$

До недавнего времени фотонное эхо (ФЭ) в галогенидных перовскитах не было обнаружено и исследовано. В настоящей работе мы одними из первых в мире демонстрируем возможность наблюдения ФЭ – возможного способа реализации квантового вентиля – в монокристалле галогенидного перовскита. Последний является перспективным материалом в области оптических вычислений [1]. Для наблюдения ФЭ был поставлен эксперимент по вырожденному четырехволновому смешению с временным разрешением с оптическим гетеродинированием. Оптическое возбуждение осуществлялось перестраиваемым титан-сапфировым пикосекундным лазером. Независимый контроль поляризации каждого из импульсов позволил провести поляриметрические измерения фотонного эха.

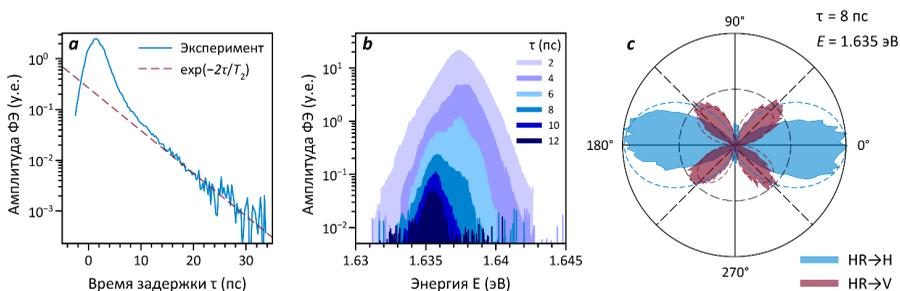


Рис. 1. (а) Зависимость амплитуды ФЭ от  $\tau$  – времени между первым и вторым импульсами. (б) Спектры ФЭ при различных  $\tau$ . (с) Зависимость амплитуды ФЭ от угла между первым и вторым импульсами, представленная в полярных координатах.

Амплитуда ФЭ спадает экспоненциально с постоянной времени оптической когерентности  $T_2 = 8.2$  пс при увеличении задержки импульса  $\tau_{12}$ . ФЭ-спектроскопия и поляриметрия доказывают свободную экситонную природу наблюдаемого в материале резонанса.

Работа выполнена на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ «Нанопотоника» за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00439.

1. Fu, Y., Zhu, H., Chen, J. et al. *Nat Rev Mater* 4, 169–188 (2019).

А.А. Скрылев (студ., 1 курс маг., ННГУ, ФПЭН),  
А.В. Нежданов (к.ф.-м.н., доц., ННГУ, ФПЭН),  
К.А. Мажукина (ННГУ), А.И. Машин (д.ф.-м.н., проф., ННГУ), Д.В. Шестаков (ННГУ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМО-ОПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В Si НА ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ МАХА-ЦЕНДЕРА

Очень быстро развивающийся кремниевый технологический процесс позволяет создавать чипы по технологии 7 нм, а к 2024 году ожидается переход на технологию 5 нм. Однако бесконечное уменьшение элементов имеет фундаментальное ограничение из-за возникающих квантовых эффектов, ограничивающих работу транзисторов. Альтернативой электронике является кремниевая фотоника, решающая задачу интеграции на одном чипе системы, которая бы излучала, передавала свет и управляла им. Одной из проблем является то, что кристаллическая решетка кремния имеет центральносимметричное строение, а значит не обладает линейным электрооптическим эффектом, что затрудняет создание оптических модуляторов.

Одним из перспективных решений является фазовая модуляция, возникающая из-за изменения показателя преломления, в основе которой лежит термо-оптический эффект (ТОЭ). Он прост в реализации, по сравнению, например, с эффектом дисперсии плазмы и выражен сильнее, чем электрооптические эффекты, наблюдаемые в кремнии (эффект Керра [1], эффект Франца-Келдыша [1]).

Исследование ТОЭ проводилось на образце, который представляет из себя пластину КЭФ 4,5 с окнами внутри кольцевых алюминиевых контактов, находящимися на обеих сторонах пластины. Для уменьшения барьера Шоттки контакты были нанесены на дополнительно легированные  $n^+$ -области. Образец помещался в одно из плеч схемы на основе интерферометра Маха-Цендера и нагревался путем пропускания тока от 0 до 4,7 А. Во втором плече находилась аналогичная пластина.

Температурная зависимость фазового сдвига была получена путем съемки интерференционной картины. В связи с нелинейной зависимостью нагрева и градиентом температуры в рабочей области, наблюдается небольшое уширение полупериодов с увеличением температуры, а среднее значение температуры для сдвига фазы на  $\pi$  составляет  $\Delta T_\pi = 1,5$  °С. Теоретические расчеты, как в [2], дают несколько большее значение  $\Delta T_\pi$ , что возможно связано с неучтенным в нашем случае дополнительным вкладом в изменение показателя преломления из-за протекания тока.

Таким образом, было продемонстрирован термо-оптический эффект в образце на основе кремния, а также найден способ его количественной оценки для применения к новым подобным усовершенствованным структурам.

1. Петров В.М., Шамрай А.В., СВЧ интегрально-оптические модуляторы. Теория и практика – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 225 с.
2. G. Cocorullo, F. G. Della Corte et al., *Appl. Phys. Lett.* **74** 3338 (1999).

Б.М. Фоминых (студ., 1 курс маг., УрФУ им. Б.Н. Ельцина (ФТИ), ТФиПМ),  
В.В. Марченков (д.ф.-м.н., г.н.с., ИФМ УрО РАН им. М.Н. Михеева,  
УрФУ им. Б.Н. Ельцина)

## ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ И ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛА ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ПОЛУМЕТАЛЛА $WTe_2$

Одним из приоритетных направлений в области физики конденсированного состояния является поиск и исследование физических свойств новых квантовых материалов. К ним относятся полуметаллы Вейля – новые материалы с уникальным законом дисперсии, когда верхняя валентная и нижняя зоны проводимости линейно соприкасаются вблизи уровня Ферми в точках Вейля. При этом в полуметаллах Вейля возникают особые поверхностные состояния – ферми дуги. Благодаря своим практически важным свойствам, полуметаллы Вейля могут найти применение во многих областях науки и техники, таких как спинтроника, термо- и микроэлектроника, вычислительная техника, квантовые компьютерные и лазерные технологии, новые элементы памяти.

Дихалькогенид вольфрама  $WTe_2$  относится к полуметаллам Вейля II типа. При исследовании монокристаллов  $WTe_2$  было обнаружено, что в них наблюдается квадратичная температурная зависимость электросопротивления в необычно широком диапазоне температур от 2 К до 70 К [1, 2]. Можно предположить, что квадратичная зависимость будет наблюдаться в сопротивлении и в присутствии внешнего магнитного поля. Цель данной работы - изучение кинетических свойств (электро- и магнитосопротивление, эффект Холла) монокристалла  $WTe_2$  для установления вида температурной зависимости сопротивления в магнитном поле, применение однозонной и двухзонной моделей для объяснения особенностей в поведении эффекта Холла.

В результате исследования было установлено, что сопротивление, измеренное как в нулевом, так и в ненулевом магнитном поле, зависит от температуры по квадратичному закону в широком диапазоне температур. На температурной зависимости сопротивления во внешнем магнитном поле обнаружено наличие минимума, что можно объяснить переходом от сильных к слабым эффективным магнитным полям. Кроме того, из анализа полевых и температурных зависимостей эффекта Холла сделаны оценки концентрации и подвижностей носителей тока, используя как однозонную, так и двухзонную модели.

1. Y.Y. Lv, L. Cao, X. Li et al., *Sci Rep.* **7**, 44587 (2017).
2. V.V. Marchenkov, A.N. Perevalova Domozhirova, S.V. Naumov, S.M. Podgornykh, E.B. Marchenkova, V.V. Chistyakov, J.C.A. Huang, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* **549**, 168985 (2022).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МАГНЕТИЗМА СТРУКТУР НА ОСНОВЕ GaAs, ЛЕГИРОВАННОГО Fe и Ni

Разбавленные магнитные полупроводники (РМП) на основе полупроводников  $A^3B^5$ , сильно легированных Fe, такие как (Ga,Fe)Sb [1] и (In,Fe)Sb [2], являются перспективными материалами для полупроводниковой спинтроники, поскольку они имеют температуру Кюри выше комнатной. В данной работе представлены исследования магнитных свойств структур GaAs/GaAs:Fe, GaAs/GaAs:Fe,Ni и GaAs/ $\delta$ -слой Fe, выращенных методом импульсного лазерного осаждения, и структур GaAs:Fe, полученных с помощью ионной имплантации и последующего лазерного отжига. В результате исследований с помощью эффекта магнитного циркулярного дихроизма (МЦД) было определено, что структура GaAs/GaAs:Fe обладает ферромагнетизмом, связанным с магнитной матрицей полупроводника, что подтверждается наличием спектральной зависимости величины МЦД (рис.1). Наличие спектральной зависимости величины МЦД для структуры GaAs/ $\delta$ -слой Fe указывает на то, что структура обладает собственным ферромагнетизмом (рис.2). Также было определено, что добавление никеля в качестве легирующей примеси в структуру GaAs:Fe,Ni приводит к значительному ухудшению магнитных свойств образца.

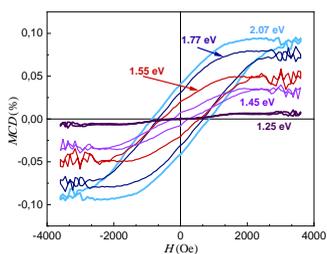


Рис. 1.

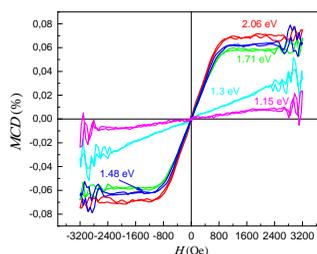


Рис. 2.

Для структур GaAs:Fe, полученных методом ионной имплантации было определено, что слой GaAs:Fe, полученный при энергии ионов 30 кэВ, обладает собственным ферромагнетизмом. Слои GaAs:Fe, полученные при энергии ионного пучка 80 кэВ, обладают ферромагнитными свойствами, которые связаны с образованием второй фазы в образцах.

Работа профинансирована Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (FSWR-2021-011).

1. N. Th. Tu, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 192401 (2016).
2. A. V. Kudrin, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **122**, 183901 (2017).

## ПРОЦЕССЫ РОСТА, ПОВЕРХНОСТЬ, ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА (ПР)

УДК 539.23

Я.Е. Майдэбура (асп., 2 год, ИФП СО РАН),  
К.С. Журавлев (д.ф.-м.н., ИФП СО РАН)

### ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ И МОРФОЛОГИЯ МОНОСЛОЕВ GaN НА ПОВЕРХНОСТИ AlN ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ПОТОКА АММИАКА

Электронные и оптические свойства квантовых точек (КТ) GaN вызывают большой интерес исследователей за счет яркого проявления квантово-размерных эффектов, что важно при создании одноэлектронных транзисторов, однофотонных излучателей и светоизлучающих диодов. Типичным способом формирования КТ при росте в молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) является рост по механизму Странского-Крастанова (С-К). В системе GaN/AlN наблюдается модифицированный механизм С-К, в котором для формирования 3D островков из 2D слоя GaN (2D-3D переход) необходимым условием является остановка роста и модификация поверхности слоя GaN, и, в случае МЛЭ с аммиаком в качестве источника азота, модификация заключается в отключении потока аммиака [1,2].

В настоящей работе для выяснения механизмов 2D-3D перехода при росте КТ GaN было проведено экспериментальное исследование изменения морфологии поверхности слоя GaN/AlN при варьировании потока аммиака. Образцы выращивались на установке МЛЭ "Riber CBE-32" с аммиаком в качестве источника азота. 2D-3D переход был исследован *in situ* методом дифракции быстрых электронов на отражение и *ex situ* методом атомно-силовой микроскопии с использованием Кельвин-зондовой силовой микроскопии. Для объяснения полученных результатов была использована ранее разработанная кинетическая модель [2], которая позволяет оценить изменение элементного состава фрагментов аммиака на поверхности слоя GaN и поверхностную энергию последнего при изменении ростовых условий. Помимо элементного состава, в модели учитывается процесс занятия частицами различных положений на поверхности слоя GaN.

В результате была исследована трансформация псевдоморфного слоя GaN, выращенного методом аммиачной МЛЭ на поверхности AlN. Экспериментально показано, что выключение потока аммиака приводит к трансформации 2D слоя в 3D островки (прямой 2D-3D переход), а последующее включение потока аммиака приводит к обратному преобразованию 3D островков в 2D слой (обратный 3D-2D переход). Теоретически было показано, что морфология поверхности слоя GaN сильно коррелирует с его поверхностной энергией. Поверхностной энергией можно управлять, изменяя состав и положение аммиачных фрагментов на поверхности GaN, что дает возможность контролировать морфологию и плотность GaN КТ путем изменения поверхностной энергии GaN.

1. Damilano, J. Brault & J. Massies. *Journal of Applied Physics*. 118, 024304 (2015).
2. Y. E. Maidebura, V. G. Mansurov, T. V. Malin & K. S. Zhuravlev. *Applied Surface Science*. 577, 151802 (2022).

Д.Г. Амельчук (асп., 4 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отд. ТЭ),  
А.А. Лебедев (проф., д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
С.П. Лебедев (н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
М.Г. Мынбаева, А.Н. Смирнов, В.Ю. Давыдов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отд. ТЭ)

## ПЕРЕНОС ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЁВ 3C-SiC, ВЫРАЩЕННЫХ НА КРЕМНИИ, НА ПОДЛОЖКУ 6H-SiC МЕТОДОМ ПРЯМОГО СРАЩИВАНИЯ

Карбид кремния (SiC) рассматривается в качестве основного материала для замещения приборов на основе кремния благодаря своим уникальным сочетаниям электронных и физических свойств, таких как широкая запрещённая зона, термическая и коррозионная стабильность, высокая скорость дрейфа электронов и лавинного пробоя. Среди всех используемых в микроэлектронике политипов, 3C-SiC является наиболее перспективным для создания электронных приборов с высокой электронной подвижностью. Как показали предварительные оценки, в случае полевых транзисторов типа MOSFET, созданных на основе эпитаксиальных слоёв 3C-SiC, подвижность в канале может достигать  $\sim 380 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  [1]. Однако в настоящее время актуальной проблемой является отсутствие технологий объёмного роста, позволяющих получить монокристаллический материал, из которого могут быть получены подложки кубического политипа для проведения гомоэпитаксии 3C-SiC. Наряду с этим проведение качественной гомоэпитаксии SiC кубического политипа на подложках гексагональных политипов также представляет собой технологическую проблему.

В настоящей работе приводятся результаты исследований, направленных на создание комбинированной подложки путём переноса гетероэпитаксиальных слоёв 3C-SiC, выращенных на кремнии методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ, *англ.* CVD), на пластины гексагонального политипа 6H-SiC. Перенос эпитаксиальных слоёв проводился методом прямого сращивания образцов SiC и 3C-SiC/Si в установке с ВЧ нагревом в вакууме с последующим удалением кремния методом жидкостного травления. Полученные комбинированные структуры были использованы в качестве подложек для гомоэпитаксии 3C-SiC методом сублимационного роста. Оценка структурного качества выращенных слоёв проводилась методами рентгеновской дифракции и комбинационного рассеяния света (КРС). Полученные рентгеновские кривые имели угловое положение максимума, соответствующее структуре монокристалла 3C-SiC. Исследования, проведённые с методом КРС, показали, что выращенные слои 3C-SiC обладают высокой структурной однородностью.

Таким образом, в рамках проведённого исследования был успешно реализован подход, который позволил переносить гетероэпитаксиальные слои 3C-SiC на пластины карбида кремния с целью создания затравочного слоя кубического политипа для проведения гомоэпитаксии 3C-SiC.

1. S. Nishino, J.A. Powell, H.A. Will. *Appl. Phys. Lett.*, **42**, 460 (1983).

Т.С. Кункель (асп., 4 год, МФТИ, ФЭФМ),  
 Ю.В. Воробьёв (к.ф.-м.н., с.н.с., РГРТУ),  
 П.И. Лазаренко (к.т.н., с.н.с., МИЭТ),  
 М.П. Смаев (к.ф.-м.н., с.н.с., ФИАН),  
 С.А. Козюхин (д.х.н., г.н.с., ИОНХ РАН)

## УПОРЯДОЧЕННЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ КАК РЕЗУЛЬТАТ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МАТЕРИАЛА ФАЗОВОЙ ПАМЯТИ СЕРИЕЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В настоящее время значительный интерес вызывают явления, сопровождающие облучение материалов фазовой памяти (МФП) серий ультракоротких лазерных импульсов, в связи с их фундаментальной и прикладной значимостью. Однако лазерная абляция была обделена вниманием, поскольку рассматривалась лишь как способ разрушения материала. В данной работе мы используем процесс абляции для создания на поверхности тонкой плёнки самоорганизующихся периодических наноструктур, которые могут найти применение в виде систем упорядоченных нанолинз и оптических нанорешёток.

Лазерная абляция тонких плёнок МФП  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  проводилась с помощью облучения поверхности сериями фемтосекундных импульсов на длине волны 1030 нм. Наблюдалось формирование двух типов упорядоченных наноструктур. На низких энергиях образовывались стеклообразные сферы одинакового размера (Рис. 1, а). Предполагается, что сферы возникают в результате разбиения длинных тонких полос расплавленного материала на отдельные капли, согласно теории Плато-Рэля. Сами полосы имеют электромагнитную природу: интерференция поверхностной плазмон-поляритонной волны и падающего света приводит к пространственной модуляции температуры и дальнейшему плавлению в максимумах. При более высоких энергиях облучения на месте цепочек из сфер образуется периодическая система чередующихся гребней и впадин (Рис. 1, б). Мы объясняем их формирование массопереносом под действием термо-капиллярных сил. И лишь при критически высоких энергиях абляция заканчивается испарением плёнки (Рис. 1, в).

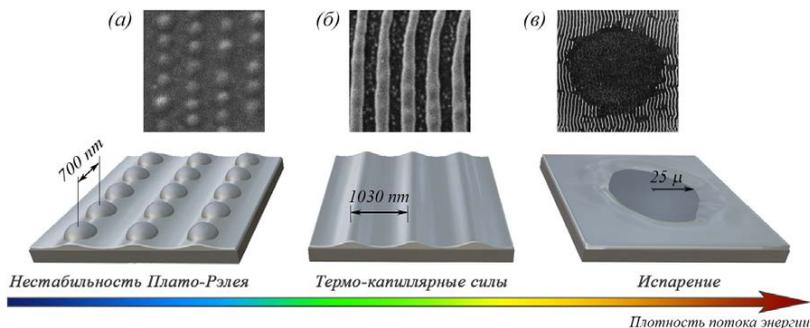


Рис. 1. Наноструктурирование поверхности тонкой плёнки под действием лазерных импульсов различной энергии.

Р.Р. Резник (к.ф.-м.н., рук. лаб., СПбГУ),  
Г.Э. Цырлин (д.ф.-м.н., зав. лаб., Алфёровский университет),  
Н. Акопян (проф., зав. лаб., Датский Технический Университет)

### ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ III-V НАНОСТРУКТУР КОМБИНИРОВАННОЙ РАЗМЕРНОСТИ НА КРЕМНИИ

В настоящее время полупроводниковые наноструктуры на основе соединений III и V групп таблицы Менделеева привлекают повышенный интерес исследователей благодаря своим уникальным оптическим, электрофизическим, транспортным и другим свойствам. III-V наноструктуры являются перспективными компонентами для создания приложений нового поколения в областях фотоники, силовой электроники, возобновляемой энергетики, квантовой информатики и многих других [1]. В свою очередь, особое внимание исследователей направлено на создание и исследование физических свойств III-V наноструктур комбинированной размерности, например, квантовых точек (КТ) в теле нитевидных нанокристаллов (ННК) и их интеграцию с кремниевой платформой. Современные методы синтеза, например, метод молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), позволяют синтезировать в рамках единого ростового процесса КТ в теле ННК, обладающие высоким кристаллографическим качеством. Важно отметить, что уровень контроля геометрических параметров таких КТ значительно превышает аналогичный параметр самоорганизованных на поверхности подложки КТ. Стоит особо отметить, что благодаря эффективной релаксации механических напряжений на гранях ННК, такие наноструктуры комбинированной размерности могут быть синтезированы на поверхности кремния.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование зависимости физических свойств ННК с КТ на основе различных материалов составляющих как ННК, так и КТ (AlGaAs и GaAs для ННК и GaAs, InGaAs, InAs для КТ) от параметров роста, таких как температура подложки во время роста, величины и соотношения потоков материалов из источников, время роста ННК и КТ, предростовая и послеростовая обработки образцов. Рост наноструктур проводился с помощью метода МПЭ на подложках Si(111).

В результате исследований были изучены зависимости физических свойств наноструктур от условий роста. В частности, было показано, что изменяя время роста КТ, соотношение потоков материалов III группы и температуру роста, можно управлять размером и составом КТ, тем самым управляя длиной волны излучения из КТ. Для GaAs и InGaAs КТ суммарный диапазон длин волн излучения составил 750-1330 нм. Также было показано, что высота и форма ННК влияют на интенсивность и направленность излучения из КТ. Теоретические расчёты, проведенные в рамках работы, хорошо согласовываются с экспериментальными данными.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках исследовательского гранта № 92591131.

V.G. Dubrovskii et al., *Semiconductors*, **43**, 1539 (2009).

Д.А. Татаринов (асп., 3 год, ИТМО, ФизФ),  
А.П. Пушкарев (к.х.н., с.н.с., ИТМО, ФизФ),  
С.В. Макаров (д.ф.-м.н., г.н.с., ИТМО, ФизФ)

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕРОВСКИТНЫХ ПЛЕНОК CsPbBr<sub>3</sub> С ВЫСОКИМ ЗНАЧЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА ОПТИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ

В настоящее время наиболее перспективным классом материалов для изготовления микро- и нанолазеров, генерирующих излучение в диапазоне 420-824 нм, являются галогенидные перовскиты состава CsPbX<sub>3</sub> (X = I, Br, Cl) [1]. Химически полученные монокристаллы перовскита CsPbX<sub>3</sub> имеют высокое качество и различную форму (кубоиды, нитевидные нанокристаллы и пр.), а также обладают высоким уровнем коэффициента оптического усиления ( $\sim 10^3 \text{ см}^{-1}$  [2]). Однако, изготовленные тонкие пленки того же состава обычно имеют шероховатую морфологию, содержат большое количество дефектов кристаллической решетки на границах мелких перовскитных зерен, и демонстрируют значение коэффициента оптического усиления  $\sim 10^2 \text{ см}^{-1}$ , что, в свою очередь, не позволяет использовать их для генерации лазерного излучения.

В настоящей работе приведен новый метод изготовления тонких пленок перовскита CsPbBr<sub>3</sub> с крупными зернами (линейный размер до 18 мкм) на основе высокотемпературной перекристаллизации под давлением, которые имеют высокое значение коэффициента оптического усиления ( $\sim 10^4 \text{ см}^{-1}$ ). Характеризация полученных пленок методами атомно-силовой микроскопии, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции подтверждает гладкую поверхностную морфологию и высокую кристалличность пленок. Кривые затухания время-разрешенной фотолюминесценции были измерены для исходных поликристаллических образцов и для рекристаллизованных образцов. Обнаружено, что пленки с крупными зернами демонстрируют увеличение времени затухания (11.5 нс) фотолюминесценции по сравнению с поликристаллическими пленками (1.34 нс), что возможно объяснить снижением концентрации глубоких дефектов в результате высокотемпературной рекристаллизации. Измеренные коэффициенты оптического усиления демонстрируют похожую зависимость: для поликристаллической пленки значение составляет  $\sim 5000 \text{ см}^{-1}$ , в то время как для рекристаллизованной пленки достигается рекордное значение  $12\,900 \text{ см}^{-1}$ .

На основе полученных пленок с высоким оптическим усилением методом лазерной абляции были изготовлены перовскитные микродиски, проявляющие высокодобротную лазерную генерацию (добротность  $\sim 1800$ ) при низком пороге оптической накачки  $\sim 14 \text{ мкДж см}^{-2}$ .

1. H. Zhu et al., Nature Materials, **14**, 6 636 (2015).
2. W. Du et al., Nano Letters (2022).

П.А. Балунов (студ., 6 курс, СПбПУ, ИЭиТ),  
К.М. Афанасьев (студ., 6 курс, СПбПУ, ИЭиТ),  
А.М. Минтаиров (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
А.Ю. Кунцевич (д.ф.-м.н., Физический институт им. П.Н. Лебедева)

## ЛОКАЛЬНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ МОНОСЛОЙНОГО $WSe_2$ и $WSe_2/h-BN$ НА ПОДЛОЖКЕ GaN

Двумерные электроны, локализованные в квантовых точках, т.е. лужи квантового Холла (ЛКХ), могут спонтанно генерировать кванты магнитного потока (вихри), что приводит к формированию композитных частиц - энионов, имеющих дробный заряд [1]. Для электронных состояний с не нулевым угловым моментом энионы могут генерировать моды Майорана, т.е. комбинацию вихрь-анти-вихрь [2], что является перспективным для топологических квантовых вычислений (ТКВ) [1]. Недавнее наблюдение эффекта дробного квантового Холла в  $WSe_2$  [3] свидетельствует о существовании энионов в дихалькогенидах переходных металлов (ДПМ), и реализация ЛКХ в ДПМ представляет большой интерес, поскольку в этих материалах они могут существовать при повышенных температурах.

В работе представлены первоначальные эксперименты по реализации ЛКХ в ДПМ с использованием подложек с локальными пьезоэлектрическими полями, индуцированными структурными/поверхностными дефектами, которые создают ямы в поверхностном потенциале подложки, обеспечивая локальное легирование ДПМ. Для экспериментальной проверки принципа мы использовали слой GaN толщиной 1 микрон, выращенный на сапфировой подложке методом молекулярно-лучевой эпитаксии, который имеет инверсионные домены и капли Ga, обеспечивающие потенциальные ямы размером  $\sim 1$  микрон и амплитудой  $\sim 0,2$  эВ.

Монослойный флейк  $WSe_2$  размером  $20 \times 50$  мкм<sup>2</sup> был нанесен на слой GaN методом механического отслаивания. Были измерены топография поверхности и потенциала, а также распределение интенсивности (карты) спектров микрофотолуминесценции (ФЛ) и Рамановского рассеяния в области флейка.

На картах ФЛ обнаружено несколько областей размером  $\sim 1$  мкм, в которых преобладает трионная эмиссия (770 нм) в сочетании с трехкратным увеличением интенсивности фоновой моды  $A^1_g$ , что свидетельствует о локальном легировании  $WSe_2$  до уровня  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Было показано, что эти области соответствуют потенциальным ямам, связанным с инверсными доменами и каплями Ga.

Аналогичные результаты были получены для двойной гетероструктуры  $WSe_2/h-BN$ , нанесенной на ту же подложку.

1. A. M. Mintairov et al, Sci. Rep. **11**, 21440 (2021).
2. A. M. Mintairov et al, Nanotechnology, **12**, 1016 (2022).
3. Q. Shi et al, Nat. Nanotechnology, **15**, 569(2020).

Л.А. Барсуков (студ., 4 курс, МИЭТ, каф. КФН),  
 А.В. Ромашкин (к.т.н., н.с., МИЭТ, НОЦ ЗМНТ),  
 В.К. Неволин (д.ф.-м.н., проф., МИЭТ, НОЦ ЗМНТ)

## РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ УДАЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО ПОЛИМЕРА ПРИ ПЕРЕНОСЕ ГРАФЕНА НА ПОДЛОЖКИ С МИКРОЭЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ БИОСЕНСОРОВ

При переносе графена с использованием полиметилметакрилата (ПММА) удается формировать высокочувствительные сенсоры на основе графена при достижении высокой воспроизводимости геометрических параметров канала на микроуровне и малой дефектности [1]. Но крутизна ВАХ и, соответственно, чувствительность устройств на основе графена, ограничиваются остаточным полимером на его поверхности [2]. Удаление остаточного полимера остаётся актуальной проблемой [3]. Было осуществлен перенос графена с использованием ПММА с различной молекулярной массой на подложки с микроэлектродами для формирования транзисторных структур. Для удаления слоя ПММА сравнивались различные методики с применением широко используемых растворителей: ацетон, бутилацетат (БА), диметилформамид (ДМФА), трихлорэтилен (ТХЭ), изопропанол [2] в сочетании с обработкой органическими кислотами [4], а также разработана методика с применением смеси тетрагидрофуран/БА. Качество перенесённого графена оценивалось при измерении толщины слоя в атомно-силовом микроскопе (АСМ) и соотношения пиков 2D/G на спектрах комбинационного рассеяния света (КР), были выбраны оптимальные методики удаления остаточного ПММА на графене. Толщина перенесённого графена с остаточным ПММА по описанной ранее методике [1] составила около 2 нм и 4 нм для различной молекулярной массы ПММА (рис.1а), а соотношение 2D/G составило 1-2 и существенно увеличивалось при использовании ДМФА с ТХЭ последовательно (рис.1б). На основе разработанных методик удаления остаточного ПММА можно создать недорогие газовые, оптические и другие виды сенсоров на основе графена с увеличенной чувствительностью.

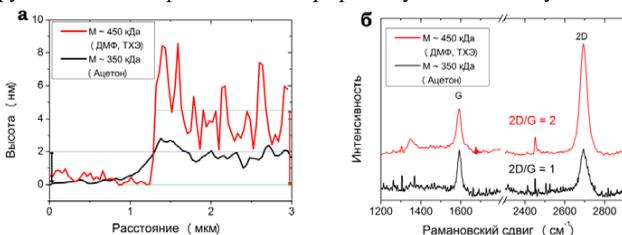


Рис. 1. Графен после удаления ПММА: а. - толщина слоя, б. - спектры графена

1. N. Nekrasov, D. Kireev, A. Emelianov, I. Bobrinetskiy, *Toxins*, **11(10)**, 550 (2019).
2. T. Duan et.al, *Nanotechnology*, **33(49)**, 495704 (2022).
3. A. Tyagi, et.al, *Nanoscale*, **14(6)**, 2167-2176 (2022).
4. B. H. Son et al., *Scientific reports*, **7(1)**, 1-7 (2017).

Д.А. Здравейшев (студ., 4 курс, ННГУ, каф. ФПЭН),  
 О.В. Вихрова (к.ф.-м.н., в.н.с., НИФТИ ННГУ),  
 М.В. Дорохин (д.ф.-м.н., зав. лаб., НИФТИ ННГУ),  
 Б.Н. Звонков (к.ф.-м.н., с.н.с., НИФТИ ННГУ),  
 П.Б. Демина (м.н.с., НИФТИ ННГУ)

## ПОЛУЧЕНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ GaAs ЛЕГИРОВАННЫХ МАРГАНЦЕМ МЕТОДОМ МОГФЭ

Полупроводниковые слои GaAs легированные марганцем являются перспективными для применения в различных приборах полупроводниковой электроники. На основе таких материалов возможно создание фотоприемников инфракрасного диапазона, резисторных термометров и пр. [1]. Для указанных функциональных применений необходимо разрабатывать и оптимизировать технологию получения таких слоев.

В данной работе для получения эпитаксиальных слоев GaAs:Mn используется метод газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений и гидридов (МОГФЭ). В качестве гидрида и металлоорганического соединения выступают  $AsH_3$  и триметилгаллия. Для легирования марганцем используется метод распыления твердотельной мишени лазером в холодной части реактора [2].

Методом МОГФЭ была получена серия структур GaAs:Mn для которых варьировались: температура, соотношение потоков арсина и TМGa, концентрация вводимой примеси. Для контроля уровня легирования и типа проводимости на полученных структурах в широком температурном диапазоне (10-300К) измерялся эффект Холла, а для анализа оптических свойств были получены спектры низкотемпературной (77 К) фотолюминесценции (ФЛ) с накачкой He-Ne лазером. Таким образом, полученные слои имели как n-тип, так и p-тип проводимости, а по спектрам ФЛ можно сделать вывод о высоком качестве полученных слоев (рис. 1). На спектре наблюдается собственный пик GaAs при энергии 1,51эВ и пик, связанный с переходами на примесных центрах марганца, при энергии 1,4эВ.

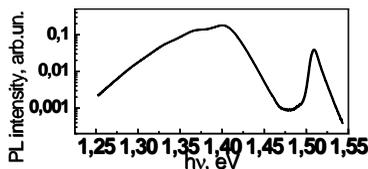


Рис.1 Спектр ФЛ образца GaAs:Mn, полученного методом МОГФЭ при T=77К

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства “Приоритет 2030” Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-20186).

1. L. Jansak, P. Kordos. Cryogenics, 8, 467, (1974).
2. Б.Н. Звонков и др. Оптический журнал, т.75, в.6, (2008).

## КРИВИЗНА И ПРОГИБ III-N НЕМТ СТРУКТУР ПРИ ЭПИТАКСИИ НА Si-ПОДЛОЖКАХ

Гетероструктуры НЕМТ на основе III-N полупроводников в последние годы получают все большее распространение. Они используются при изготовлении как СВЧ транзисторов, так и высоко мощных транзисторов для силовой электроники. Однако, массовое применение таких транзисторов требует снижения стоимости гетероструктур за счет использования дешевых подложек и увеличения площади одной подложки. Большой интерес, с этой точки зрения, представляют подложки монокристаллического Si(111). Они доступны диаметром до 300 мм и для них уже продемонстрирована возможность выращивания III-N структур [1]. Тем не менее, эпитаксия III-N НЕМТ структур на Si-подложках представляет большую сложность вследствие значительной разницы параметров решетки и коэффициентов термического расширения (КТР) подложки и III-N слоев. Также существует целый ряд технологических сложностей эпитаксии таких структур, связанных с растворимостью Ga в Si, короблением подложек большого диаметра вследствие неоднородности температуры, приводящим к их пластической деформации, и др.

Одной из главных проблем эпитаксии является различие КТР подложки и III-N слоев, приводящее к растрескиванию гетероструктуры. Для устранения этого эффекта используется техника создания механических напряжений в растущих слоях III-N во время роста для компенсации напряжений, возникающих при остывании структуры [2]. Оценить эти напряжения можно по измерению кривизны структуры как во время эпитаксии, так и при остывании. Так как структуры сильно напряжены, после процесса эпитаксии они могут иметь различный прогиб, который влияет на последующие этапы изготовления транзисторов. Важно оценить влияние параметров эпитаксии на величину конечного прогиба всей структуры.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование динамики кривизны и остаточного прогиба III-N НЕМТ структур во время эпитаксии и после остывания для подложек Si(111) диаметром 100 мм различной толщины; были определены скорость изменения кривизны от температуры для различной толщины подложки и структуры, что позволяет определить параметры эпитаксии для получения необходимого прогиба структур после остывания.

Эксперименты проводились в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в лаборатории физики полупроводниковых гетероструктур на установке для МОГФЭ Dragon D-125, оборудованной системой лазерной рефлектометрии с возможностью in-situ-измерения кривизны структур.

1. [https://compoundsemiconductor.net/article/113649/Enkris\\_Demonstrates\\_300mm\\_GaN-on-Si\\_HEMT\\_Wafers](https://compoundsemiconductor.net/article/113649/Enkris_Demonstrates_300mm_GaN-on-Si_HEMT_Wafers).
2. Yuefei Cai et al, Strain Analysis of GaN HEMTs on (111) Silicon with Two Transitional Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N Layers, Materials 2018. 11. 1968. doi:10.3390/ma11101968.

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА ИНДИЯ-ОЛОВА

Актуальной задачей современной оптоэлектроники является защита fotocувствительных приборов от радиочастотных помех. Для изготовления защитных фильтров используются материалы, которые прозрачны в оптическом диапазоне и эффективно отражают или поглощают излучение в микроволновом диапазоне. Одним из перспективных материалов являются проводящие пленки оксида индия-олова (indium tin oxide, ИТО). Целью работы было экспериментальное исследование оптических свойств проводящих пленок ИТО и разработка бесконтактного способа определения их параметров (толщина, концентрация и подвижность носителей заряда). Были экспериментально исследованы спектры отражения и пропускания пленок различной толщины (от 60 до 500 нм), напылённых на подложку из стекла К108. Исследования проводились в ультрафиолетовом, видимом и ИК диапазонах длин волн (0.18–4.5 мкм). Предварительно аналогичные спектры были получены для подложки, и для нее были определены спектральные зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции.

Теоретическое моделирование спектров отражения и пропускания пленки ИТО на стекле проводилось с помощью метода матриц переноса, причем подложка рассматривалась как «некогерентный слой» [2]. Комплексная диэлектрическая проницаемость проводящей пленки описывалась в рамках модели Друде. Спектры показателя преломления  $n$  и коэффициента экстинкции  $k$  пленки ИТО рассчитывались с помощью уравнения Френеля. Путем подгонки модельных спектров под эксперимент определялись параметры пленок ИТО. Для минимизации целевой функции был применен метод Нелдера-Мида. Разработанный метод определения параметров проводящей пленки обеспечивает выигрыш в точности определения толщины пленки примерно на порядок (по сравнению с методом сканирующей электронной микроскопии), а в точности определения поверхностного удельного сопротивления – в 2 раза (по сравнению с методом Ван дер Пау, для пленок толще 150 нм). Разработанный метод является *неразрушающим*, и в этом его главное достоинство.

При найденных параметрах пленок ИТО было рассчитано ожидаемое ослабление электромагнитного излучения в радиочастотном диапазоне как свободной пленкой, так и пленкой на подложке. Для свободной пленки имеет место своеобразный парадокс. В длинноволновом пределе ( $\lambda \rightarrow \infty$ ), где  $n \approx k \propto \lambda^{1/2}$ , коэффициент отражения для одиночного интерфейса вакуум/ИТО равен 1. А у тонкой плёнки (с толщиной меньше скин-слоя), обладающей двумя интерфейсами, коэффициент отражения оказывается *меньше* 1, и имеется ненулевое пропускание, величина которого определяется единственным параметром – поверхностным удельным сопротивлением пленки.

1. M. González, et al. *The Chemical Record*, **7-8**, 1000 (2018).
2. R.B. Adamov, et al. *Applied Sciences*, **11**, 6053 (2021).

Д.А. Малых (студ., 1 курс маг., ИТМО, ФТМ),  
М.С. Дунаевский (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отд. ФТТ),  
П.А. Алексеев, В.А. Шаров (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## КОНТАКТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ТОКА ПРИ ТРЕНИИ МЕТАЛЛ–ПОЛУПРОВОДНИК

Проблема использования энергии возобновляемых источников делает актуальной задачей создание её эффективных преобразователей. К таким устройствам можно отнести трибоэлектрические наногенераторы, которые позволяют за счет контактного трения различных материалов получить источник электрической энергии. Трибоэлектрическая генерация характерна для самых разных материалов и экспериментально изучена для пар полимер–полимер, полупроводник–полупроводник, металл–полупроводник [1,2]. Стоит отметить, что применение полупроводников в производстве наногенераторов позволяет достичь значений плотности тока до  $10 \text{ кА/м}^2$  [3] и мощности до  $1 \text{ кВт/м}^2$  [4].

Экспериментально установлено, что плотность трибоэлектрического тока зависит от плотности поверхностных состояний, уровня и типа легирования полупроводника, толщины естественного оксида. Существует два возможных механизма, объясняющие полярность трибоэлектрического тока. Первый связан с трибовольтаическим эффектом, при котором должно наблюдаться совпадение знака триботока со знаком фототока [5]. Второй связывает знак трибоэлектрического тока с эффектом туннелирования электронов через поверхностный оксид, а также с положением закрепления уровня Ферми на поверхностных состояниях [4,6].

В рамках данной работы были проведены экспериментальные измерения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода при трении металлизированного зонда о поверхность полупроводникового материала. Эксперимент проводился с использованием методов сканирующей зондовой микроскопии: в контактном режиме регистрировался ток короткого замыкания при различных силах воздействия зонда на поверхность, а напряжение холостого хода определялось подбором значения, компенсирующего возникающий ток. В качестве полупроводников использовались Si, InP, InAs, GaAs с различными уровнями и типами легирования.

Полученные данные показали преимущество полупроводников  $A^3B^5$  по сравнению с кремнием вследствие высокой плотности поверхностных состояний, что позволяет увеличить плотность тока в 10–100 раз. Направление триботока определяется соотношением работы выхода зонда и положением поверхностного закрепления уровня Ферми.

1. C. Wu et al. *Advanced Energy Materials*, 9 (1), 1802906. (2019).
2. R. Yang et al. *Nano Energy*, 105849 (2021).
3. V. A. Sharov et al. *ACS Applied Energy Materials*, 2 (6), 4395 (2019).
4. S. Lin et al. *Advanced Science*, 6 (24), 1901925 (2019).
5. M. Zheng et al. *Advanced Materials*, 32, 2000928 (2020).
6. J. Liu et al. *Advanced Electronic Materials*, 5, 1900464 (2019).

## ПЕРЕХОД МЕТАЛЛ–ПОЛУПРОВОДНИК В НАНОПЛЕНКАХ ИТТЕРБИЯ, ИНДУЦИРОВАННЫЙ АДсорБИРОВАННЫМИ МОЛЕКУЛАМИ КИСЛОРОДА

С помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и сканирующей туннельной спектроскопии (СТС) впервые исследовано влияние адсорбированного слоя молекул кислорода (в условиях, при которых диссоциации молекул на поверхности не происходит) на электронную структуру пленок иттербия толщиной 16 монослоев (6.08 nm).

Нанопленки металлического иттербия ( $\text{Yb}^{2+}$ ) выращивались на кремниевой подложке Si(111)(7×7) при 300 К. Анализ топографии СТМ-изображений поверхности этих пленок показал, что они имеют высокую степень однородности по толщине, растут по механизму, очень близкому к послойному, и имеют однородную кристаллическую структуру. С помощью количественных оценок было установлено, что средняя шероховатость указанных пленок составляет ~4% от их толщины (т.е., ~0.24 nm) [1]. Другим характерным свойством нанопленок  $\text{Yb}^{2+}$  является наличие в них квантовых состояний, обусловленных ограничением движения электронов в направлении, перпендикулярном границам раздела иттербий–кремний и иттербий–вакуум. Данные состояния четко проявлялись в спектрах нормированной дифференциальной проводимости, полученных с помощью СТС, в виде набора хорошо выраженных полностью разрешенных пиков [2].

Установлено, что адсорбция молекул  $\text{O}_2$  на поверхности нанопленок индуцирует в иттербии фазовый переход металл–полупроводник (М–П), в результате которого формируется запрещенная зона шириной около 1.2 эВ. Очевидно, что переход М–П должен сопровождаться изменением типа связей в решетке иттербия: из металлической она может трансформироваться в ковалентную. Подтверждением этого вывода является исчезновение квантовых состояний в нанопленках иттербия, наблюдающееся при адсорбции на их поверхности молекул  $\text{O}_2$  [2].

1. М.В. Кузьмин, М.А. Митцев, ЖТФ, 90, 1359. (2020).
2. М.В. Кузьмин, М.А. Митцев, ЖТФ, 91, 1189. (2021).

## ФОРМИРОВАНИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЕНОК КОБАЛЬТА НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ

Низкоразмерные структуры, образующиеся при нанесении тонких пленок кобальта на поверхность кремния, изучаются уже более двух десятилетий. В последние годы в связи с бурным развитием спинтроники, повысился интерес к магнитным свойствам сверхтонких слоев кобальта и силицидов кобальта. Однако, проведение таких исследований является достаточно сложной задачей, требующей измерений *in situ* в условиях сверхвысокого вакуума. Целью данной работы было изучить начальные стадии роста пленок кобальта на различных гранях кремния при комнатной температуре, а также реакции силицидообразования, протекающие в системе при повышенных температурах, при одновременном анализе фазового состава, электронной структуры и магнитных свойств этих пленок.

Эксперименты проводились в Российско-Германской лаборатории синхротронного излучения на накопительном кольце HZB BESSY II и были выполнены в условиях сверхвысокого вакуума ( $5 \times 10^{-10}$  Торр). Анализ элементного состава и электронного строения формируемых пленок проводился методом фотоэлектронной спектроскопии высокого энергетического разрешения с использованием синхротронного излучения. Энергия фотонов, как правило, составляла 135 эВ. Фазовый состав формируемых пленок определялся на основе анализа интенсивностей линий фотоэлектронов, обладающих высокой чувствительностью к химическому состоянию атомов поверхности. Ферромагнитное упорядочение формирующихся пленок исследовалось с помощью эффекта магнитного линейного дихроизма в угловом распределении остовных Co 3р электронов.

В настоящей работе установлены корреляции между фазовым составом и магнитными свойствами ультратонких пленок, образующихся на поверхностях Si(100)2x1 и Si(111)7x7 при напылении Co при комнатной температуре и последующем отжиге образцов до 600°C. В частности, было установлено, что на начальной стадии напыления Co на кремниевую подложку образуются интерфейсный силицид CoSi и твердый раствор Co-Si. Показано, что ферромагнитное упорядочение в плоскости поверхности образца носит пороговый характер и появляется при покрытии Co около  $6 \text{ \AA}$  для обеих систем, что соответствует фазе твердого раствора. После отжига образцов первыми синтезированными фазами являются метастабильный ферромагнитный силицид Co<sub>3</sub>Si и немагнитный силицид Co<sub>2</sub>Si. Они трансформируются в силициды CoSi и CoSi<sub>2</sub> при более высоких температурах. Для всех указанных силицидов, образующихся на поверхностях Si(100) и Si(111), определены температурные интервалы стабильности и значения энергий связи Si 2р.

УДК 548.75

Е.Р. Бурмистров (асп., 1 год, МГУ, каф. ОФ),  
Л.П. Авакянц (д.ф.-м.н., проф., МГУ, каф. ОФ)

## ПАРАМЕТРЫ 2ДЭГ В СВЕТОДИОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С ТРЕМЯ КЯ/КБ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ПО ДАННЫМ THz-TDS

Гетероструктуры  $\text{InGaN}/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$  со встроенными пьезоэлектрическими полями в активной области используются в качестве источников терагерцового излучения, преобразуя ультракороткие оптические импульсы в терагерцовые электромагнитные волны [1]. Значение мощности терагерцового излучения, генерируемого с помощью гетероструктур  $\text{InGaN}/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ , пропорционально напряженности встроенных электрических полей.

Мощность и эффективность излучения приборов на основе гетероструктур  $\text{InGaN}/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$  определяются подвижностью 2ДЭГ во множественных квантовых ямах (МКЯ)  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ . В настоящей работе метод терагерцовой спектроскопии с временным разрешением (THz-TDs) используется для определения времени релаксации квазиимпульса, подвижности и эффективной массы 2ДЭГ в гетероструктурах с тремя КЯ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ , широко используемых в настоящее время в светодиодах синего и зеленого диапазона излучения. В результате многофотонного поглощения лазерных импульсов длительностью 130 фс на длине волны 800 нм в КЯ  $\text{InGaN}$  возникают пространственно разделенные электроны и дырки. Под действием встроенных пьезоэлектрических полей электронно-дырочная пара становится поляризованной. Это ведет к генерации в системе осциллирующего во времени дипольного момента  $\vec{P}(t)$ , который приводит к излучению терагерцовых электромагнитных волн. Временные формы терагерцовых импульсов были измерены в диапазоне температур от 90 до 170К. С помощью быстрого Фурье преобразования временных форм были получены частотные зависимости Фурье-амплитуд терагерцовых импульсов, моделирование которых позволило получить частотные спектры мощности и фазового сдвига терагерцового излучения. Их интерпретация дала возможность оценить время релаксации импульса ( $\sim 10^{-12}$  с), подвижность ( $\mu = 4 \cdot 10^3$  см<sup>2</sup>/В·с) и эффективную массу ( $m^* = 0.45 m_e$ ) 2ДЭГ в исследованных гетероструктурах. С помощью серии частотных спектров мощности и фазового сдвига терагерцового излучения были получены температурные зависимости эффективной массы и времени релаксации квазиимпульса 2ДЭГ. Значения подвижности 2ДЭГ, полученные методом THz-TDS, хорошо согласуются с данными холловских измерений.

При нагреве образцов гетероструктур от 90 до 170К было обнаружено красное смещение плазмонной резонансной частоты, а также получена немонотонная температурная зависимость эффективной массы ( $m^* = 0.43 m_e$  при 90К и  $m^* = 0.56 m_e$  при 170К).

1. G. Sun et al., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **17**, 48 (2011).

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ  $n$ -GaAs  
С РАЗЛИЧНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО  $p$ -СЛОЯ

Оптические переходы электронов и дырок с участием примесных состояний в квантовых ямах позволяют реализовать на их основе источники терагерцового (ТГц) излучения в условиях как оптической, так и электрической накачки. Ширина квантовой ямы и конфигурация профиля легирования определяют энергию излучательных переходов, что дает возможность получить источник ТГц излучения с заданной рабочей частотой. В работе [1] была исследована структура с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, легированная в области каждой квантовой ямы одновременно и донорами, и акцепторами. В условиях оптической накачки была экспериментально получена эмиссия ТГц излучения, обусловленная переходами электронов из первой подзоны размерного квантования на основные донорные уровни (переходы  $e1$ -D).

В настоящей работе предложен новый дизайн структуры с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, нацеленный на увеличение интенсивности ТГц излучения при той же мощности накачки. Специфика структуры заключается в том, что компенсирующая акцепторная примесь (Be) располагается не в квантовой яме (легированной донорами Si), а в формирующих ее барьерах. На этой структуре проведены исследования фотолюминесценции (ФЛ) в ближнем ИК диапазоне при гелиевой температуре. Для сравнения такие же исследования проведены на структуре-прототипе, в которой компенсирующий  $p$ -слой располагался в самой квантовой яме.

Проведен анализ спектров ФЛ для различных интенсивностей межзонной оптической накачки (от 0.016 до 16 Вт/см<sup>2</sup>), определены основные каналы излучательной рекомбинации. Показано, что при максимальной накачке интенсивность линии ФЛ, соответствующей переходам электронов с основного состояния донора (D) на дно первой подзоны тяжелых дырок ( $hh1$ ), в новой структуре имеет в 2.3 раза большую интенсивность, чем суммарная интенсивность линий D- $hh1$  и D-A в структуре-прототипе (где A – основное состояние акцептора). Наблюдавшееся увеличение скорости опустошения донорного уровня позволяет рассчитывать на примерно двукратное увеличение интенсивности ТГц ФЛ, вызванной электронными переходами  $e1$ -D.

Полученные результаты указывают на то, что с точки зрения эффективности использования структур с квантовыми ямами  $n$ -GaAs/AlGaAs для генерации ТГц излучения на переходах  $e1$ -D в условиях оптической или электрической накачки, целесообразно размещать компенсирующую акцепторную примесь не в квантовой яме, а в формирующих ее барьерах.

Авторы благодарят И.В. Седову и С.В. Сорокину за изготовление структур. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-00103).

С.В. Граф (асп., 3 год, СПбПУ, ВИФШ),  
Г.А. Мелентьев (ст. преп., СПбПУ, ВИФШ),  
А.А. Саркисян (д.ф.-м.н., проф., РАУ (Армения), ИФИ)

## НЕРАВНОВЕСНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ GaN/AlGaN

Нитрид галлия обладает уникальным набором свойств, позволяющим использовать микро- и наноструктуры на его основе для создания приборов терагерцовой (ТГц) оптоэлектроники и плазмоники [1, 2]. В данных работах ТГц излучение было связано с неравновесными плазмонами, создаваемыми неравновесными (горячими) электронами в условиях разогрева последних электрическим полем. Цель настоящей работы - провести комплексное теоретическое исследование двумерных (2D) плазмонов, связанных плазмон-фононных (СПФ) мод и особенностей рассеяния неравновесных электронов в квантовой яме GaN/AlGaN с большой концентрацией носителей заряда.

Объектом исследования являлась квантовая яма, формирующаяся на интерфейсе GaN/AlGaN. В расчетах температура кристаллической решетки бралась равной 4.2 К; концентрация двумерных электронов –  $1.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Степень неравновесности носителей заряда характеризовалась электронной температурой ( $T_e$ ), а разогрев осуществлялся электрическим полем. Обычно при больших  $T_e$  основным механизмом рассеяния электронов является рассеяние на продольных оптических ( $LO$ ) фононах. Однако при больших концентрациях носителей заряда возникает несколько особенностей. Во-первых, электроны экранируют поляризационный потенциал, возникающий при оптических колебаниях решетки. В наших расчетах мы учитывали данный эффект с помощью диэлектрической проницаемости в приближении хаотических фаз. Во-вторых, значительную роль начинает играть рассеяние на связанных плазмон-фононных модах, которые могут образовываться при взаимодействии двумерных плазмонов и  $LO$  фононов. За счет затухания 2D плазмонов, начиная с некоторого значения волнового вектора, СПФ моды не формируются. Проведен расчет закона дисперсии двумерных плазмонов и их времени жизни по отношению к затуханию Ландау. Был найден диапазон волновых векторов, в котором 2D плазмоны затухают, т.е. не существует связанных плазмон-фононных мод, а рассеяние электронов происходит на «чистых»  $LO$  фононах. Была рассчитана скорость рассеяния энергии  $\langle d\varepsilon/dt \rangle$  на СПФ модах и на «чистых» фононах как функция электронной температуры. Проведенный расчет времени жизни связанных плазмон-фононных мод позволил также учесть эффект их накопления. С помощью уравнения баланса мощности  $\langle d\varepsilon/dt \rangle = e\mu E^2$  получена зависимость электронной температуры от электрического поля  $E$ . В электрических полях 4000 В/см температура горячих электронов превышает 400 К.

1. G.A. Melentev et al. J. Appl. Phys., **119** (9), 093104 (2016).
2. V.A. Shalygin et al. J. Appl. Phys., **126** (18), 183104 (2019).

А.С. Дашков (асп., 4 год, Алфёровский университет, лаб. наноэлектроники),  
Н.А. Фоминых (асп., 4 год, Алфёровский университет, лаб. нанофотоники),  
А.Ю. Егоров (д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, проректор по науке,  
Алфёровский университет)

## СВЕРХРЕШЕТКИ GaAsN/InAs ДЛЯ ДЛИННОВОЛНОВЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ

Наиболее перспективным подходом для реализации монолитных длинноволновых вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) на подложках GaAs является использование четверных твердых растворов  $A^{III}B^V$  на основе «разбавленных» нитридов (в системе материалов  $In_yGa_{1-y}N_xAs_{1-x}$ ). Однако сложность ростовых условий, требуемых для формирования азотсодержащих квантовых ям (КЯ), ограничивает выходную оптическую мощность ВИЛ на их основе [1]. Использование активных областей на основе многопериодных сверхрешеток (СР) GaAsN/InAs потенциально позволяет повысить структурное качество и эффективность люминесценции гетероструктур за счет минимизации диффузии азота из КЯ в поперечном направлении. Более того, применение СР позволяет значительно увеличить интеграл перекрытия световой волны с активной областью, и, как следствие, увеличить коэффициент модального усиления в сравнении с активными областями на основе азотсодержащих КЯ.

В работе представлены результаты по эпитаксиальному росту, характеризации структурного качества и исследованию оптических свойств активных областей на основе СР GaAsN/InAs, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с использованием радиочастотного источника азота. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, измерений просвечивающей электронной микроскопии показано высокое структурное совершенство, однородность толщин и состава слоев в различных СР. Продемонстрирована эффективная фотолюминесценция при комнатной температуре активных областей на основе данного типа СР вблизи 1.1 мкм с характерной шириной максимума, измеренного на полувысоте порядка 70 мэВ. Электролюминесценция при комнатной температуре данного класса СР наблюдается вблизи 1.15 мкм с характерной полушириной максимума порядка 90 мэВ при плотности тока накачки  $\sim 20$  А/см<sup>2</sup>. Предложен подход и реализован численный алгоритм расчета энергии межзонных переходов для СР на основе «разбавленных» нитридов. По результатам численных расчётов предложены параметры слоев сверхрешеток GaAsN/In(Ga)As для активных областей спектрального диапазона 1.3 мкм для реализации монолитных вертикально-излучающих лазеров на подложках GaAs.

Финансирование работы: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00718, <https://rscf.ru/project/21-19-00718/>.

1. M. Gębski et al., *OSA Continuum* **3**, 1952–1957 (2020).

## МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОНОВ В ХИРАЛЬНОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ ПРИ РЕЗОНАНСНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ

Теоретически исследован планарный микрорезонатор с экситонами в квантовых ямах в активной области. В этой системе может наблюдаться неоднозначная зависимость плотности экситон-поляритонов от интенсивности оптической резонансной накачки, связанная с ростом резонансной частоты при увеличении плотности экситон-поляритонов [1]. Если учесть векторную природу экситон-поляритонов, такая неоднозначность приводит к мультистабильности отклика [2].

Был рассмотрен микрорезонатор, на верхнем брэгговском зеркале которого была выгравлена квадратная решётка микропилларов с точечной симметрией  $C_4$  (рис. 1, а). Наличие хиральной структуры приводит к тому, что для право- и левополяризованной накачки начинают различаться значения критической интенсивности, при которых происходят переходы между ветвями S-образной зависимости плотности экситон-поляритонов от интенсивности накачки (рис. 1, б).

В результате даже у структуры с низкой ( $\sim 3\%$ ) степенью циркулярной поляризации отклика при слабой линейно поляризованной накачке, в нелинейном режиме при больших накачках возможна значительная (выше 60%) величина степени циркулярной поляризации отклика, см. на рис. 1, с.

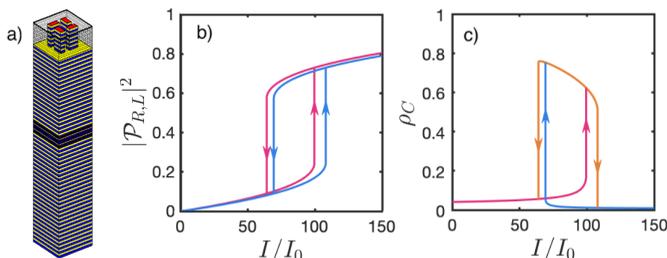


Рис. 1. а) Элементарная ячейка рассматриваемой структуры. б), с) Зависимости плотности право (красные кривые) и лево (синие кривые) циркулярно поляризованных экситонов (б) и степени циркулярной поляризации отклика (с) от интенсивности линейно поляризованной накачки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00961, <https://rscf.ru/project/22-22-00961/1>.

1. N.A. Gippius et al., *Europhys. Lett.*, **67**, 997 (2004).
2. N.A. Gippius et al., *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 236401 (2007).

М.В. Захарченко (асп., 2 год, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),  
 Г.Ф. Глинский (д.ф.-м.н., проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

## ДИСПЕРСИЯ ПОЛЯРИТОНОВ В СВЕРХРЕШЁТКАХ AlAs/GaAs ВБЛИЗИ ЭКСИТОННОГО РЕЗОНАНСА

Одномерные полупроводниковые сверхрешётки на основе AlAs/GaAs можно рассматривать в качестве одномерных фотонных кристаллов. Однако в области прозрачности этих материалов диэлектрический контраст данной структуры относительно невелик, что обуславливает малую ширину фотонных запрещённых зон. В то же время вблизи экситонного резонанса GaAs его диэлектрическая проницаемость имеет полюс, в результате чего дисперсия электромагнитных волн претерпевает существенное изменение. С микроскопической точки зрения это происходит в результате возникновения новых элементарных возбуждений – экситонных поляритонов.

Можно выделить два основных подхода к анализу экситонных поляритонов. Первый из них полуфеноменологичен и подразумевает введение дисперсии диэлектрической проницаемости [1]. В основе второго лежит совместное решение уравнений Максвелла и уравнения, определяющего диэлектрическую поляризацию среды вблизи резонанса [2]. Однако наиболее общий подход может быть сформулирован исходя из точных результатов квантовой теории поля в её функциональной формулировке [3].

В настоящей работе последний метод используется для исследования закона дисперсии собственных поляритонных мод сверхрешётки AlAs/GaAs вблизи экситонного резонанса GaAs. Исходя из точных соотношений для фотонной функции Грина и функции Грина «механических» экситонов [3] была получена система уравнений, определяющих дисперсию поляритонов в структуре

$$\begin{aligned}\hat{M}|A_v\rangle + \hat{\Gamma}|\psi_v\rangle &= \omega_v|A_v\rangle, \\ \hat{\Gamma}^+|A_v\rangle + \hat{H}|\psi_v\rangle &= \omega_v|\psi_v\rangle.\end{aligned}$$

Здесь  $\hat{M}$ ,  $\hat{H}$  – операторы, спектр которых определяет частоты невзаимодействующих фотонов и экситонов, соответственно,  $\hat{\Gamma}$  – вершинный оператор, характеризующий взаимодействие частиц в системе,  $|A_v\rangle$ ,  $|\psi_v\rangle$  – векторы состояния в комплексном гильбертовом пространстве, описывающие фотонные и экситонные степени свободы состояний поляритона с частотой  $\omega_v$ . Решение этих уравнений осуществлялось методом, представленным в [4–6].

1. Y. Brule, *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B* **33**, 691 (2016).
2. Е. Л. Ивченко, А. Н. Поддубный, *ФТТ* **48**, 540 (2006).
3. G. F. Glinskii, Z. G. Koinov, *Phys. Stat. sol. B* **155**, 501 (1989).
4. Г. Ф. Глинский, *ЖТФ* **89**, 329 (2019).
5. M. V. Zakharchenko, G. F. Glinskii, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1851**, 012002 (2021).
6. М. В. Захарченко, Г. Ф. Глинский, *ЖТФ* **92**, 1720 (2022).

А.Д. Любомиров (асп., 3 год, СПбГУ, каф. ФТТ),  
Е.С. Аладинская (маг., 1 курс, СПбГУ, каф. ФТТ),  
Р.В. Чербунин (к.ф.-м.н., доц., СПбГУ, каф. ФТТ)

## СТОХАСТИЧЕСКИЕ КОЛЬЦЕВЫЕ ТОКИ ЭКСИТОННЫХ ПОЛЯРИТОНОВ В ОПТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ

В поляритонике уделяется особое внимание перспективам использования орбитальной степени свободы для обработки, хранения квантовой и классической информации, а также для оптических коммуникаций [1,2]. Экситонные поляритоны, будучи бозонами, способны образовывать макроскопическое состояние (экситон-поляритонного конденсата (ПК)). Его поведение подобно сверхтекучей жидкости и описывается единой волновой функцией. Потоки поляритонов внутри конденсатного состояния задают ненулевой орбитальный угловой момент (ОУМ, по сути, характеризует направление и распределение плотности потока поляритонов). В данной работе изучались состояния ПК с ненулевым ОУМ, характеризующиеся непрерывным набегом фазы.

Нами исследовалось нерезонансное оптическое возбуждение поляритонных токов в плоском микрорезонаторе с помощью оптической кольцевой ловушки. Токи имеют ненулевой ОУМ, что проявляется в искривленном волновом фронте излучения. Распределение квадрата амплитуды волновой функции ПК получается из изображения люминесценции, а распределение фазы — из интерферограмм, полученных с помощью интерферометра Маха-Цендера.

Наблюдается стохастическое переключение между двумя токовыми состояниями ПК при импульсном нерезонансном оптическом возбуждении. При интерферометрических измерениях со сферической опорной волной в таком случае усредненные интерференционные полосы представляют собой концентрические кольца, расщепленные проходящей почти через центр ПК линией. Внося асимметрию в потенциал ловушки путем подачи дополнительного управляющего импульса, можно задать определенное направление тока. При этом возникают поляритонные вихри с тем направлением вращения, которое соответствует нарушению симметрии из-за относительного положения управляющего импульса. Так система управляемо переводится из стохастического режима в режим с определенным направлением тока. Данный результат полезен в свете исследований возбуждения поляритонных вихрей с изначально контролируемым ОУМ.

Работа была поддержана Санкт-Петербургским государственным университетом, грант №91182694.

1. Xue, Y. et al. Phys. Rev. Res. 3, 013099 (2021).
2. Sedov, E. S., Lukoshkin, V. A., Kalevich, V. K. et al. Phys. Rev. Res. 3, 013072 (2021).

А.С. Петров (к.ф.-м.н., МФТИ, лаб. оптоэлектроники двумерных материалов),  
Д.А. Свинцов (к.ф.-м.н., МФТИ, лаб. оптоэлектроники двумерных материалов)

### ОПЕРАТОРНЫЙ ПОДХОД К УРАВНЕНИЯМ ЭЛЕКТРОННОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

Во многих прикладных задачах требуется описание электронного транспорта в твёрдых телах. Мощным, но весьма абстрактным подходом является многочастичный формализм [1]. Более наглядной, пусть и менее строгой, является гидродинамическая модель, уже почти век применяющаяся для описания различных эффектов в электронном газе [2-5]. Хотя формально для её применения частота электрон-электронных столкновений должна быть доминирующей в системе, на практике применимость модели гораздо шире. Так, с её помощью успешно описываются терагерцовые плазменные волны [3,4].

Несмотря на богатую историю, применение гидродинамической модели транспорта как правило фокусируется на конкретных конфигурациях физических устройств, оставляя в стороне общие свойства электронного транспорта. Эти свойства кардинально отличаются от свойств классической жидкости, т.к. электронная ‘жидкость’ является сжимаемой и заряженной.

В данной работе мы развиваем операторный подход к уравнениям электронной гидродинамики на примере двумерного электронного газа. Оказывается, линеаризованные уравнения непрерывности, Навье-Стокса и Пуассона могут быть записаны в операторной форме, и при должном определении вектора и скалярного произведения в получившемся гильбертовом пространстве мы получим удобный формализм, во многом аналогичный квантовой механике.

Данный формализм оказывается удобным при описании магнитодисперсии плазменных волн в различных геометриях, а также служит основой для построения теории возмущений. Построенная теория [6] позволяет установить ряд общих свойств плазменных волн в двумерном электронном газе: условия их самовозбуждения под действием постоянного электрического поля, оптимальные конфигурации устройств для максимизации инкремента нарастания и влияние вязкости [7], а также значительно упрощает математические выкладки, что позволяет описать неустойчивость межкраевого магнитоплазмона в строгой электростатической модели [8].

Работа поддержана Стипендией Президента РФ СП-429.2021.5.

1. F. Stern // *Phys. Rev. Lett.* 1967 V. 18, P. 546-548.
2. Bloch, F. // *Zeitschrift fur Physik* 1933 V. 81, P. 363—376.
3. A. Fetter // *Ann. Phys.* 1973 V. 81 P. 367-393.
4. M. Dyakonov & M. Shur // *Phys. Rev. Lett.* 1993 V. 71 P. 2465-2468.
5. D. Svintsov et al.// *J. Appl. Phys.* 2012. V. 111, P. 083715.
6. A. Petrov & D. Svintsov // *Phys. Rev. B* 2019. V. 99. P. 195437.
7. A. Petrov & D. Svintsov // *Phys. Rev. Appl.* 2022. V. 17. P. 054026.
8. A. Petrov & D. Svintsov // *Phys. Rev. B* 2020. V. 102. P. 121402(R).

ГЕНЕРАЦИЯ СТИМУЛИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ  
ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ  
НА ОСНОВЕ HgCdTe В ОБЛАСТИ 24-20 МКМ

В работе представлены результаты исследований спектров стимулированного излучения (СИ) и процессов межзонной рекомбинации в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами (КЯ) на основе HgCdTe. Известно, что в таких узкозонных структурах закон дисперсии в районе  $k=0$  является гиперболическим. Это позволяет существенно, по сравнению с объемными структурами HgCdTe, увеличить пороговую энергию оже-рекомбинации, и получить СИ при импульсной оптической накачке в инфракрасной области спектра вплоть до 31 мкм [1]. Однако пороговые плотности мощности наблюдения СИ даже при температурах  $\sim 10$  К составляют от 5 до 10 кВт/см<sup>2</sup>, что ограничивает перспективы использования лазеров на основе данных структур при высоких температурах и при непрерывном режиме. Однако, если уменьшить модовые потери, улучшая локализацию TE<sub>0</sub> моды волновода путем подбора оптимальных параметров структуры (увеличивая толщину буферного слоя CdTe с 10 до 15 мкм), то есть определенный шанс значительно уменьшить порог наблюдения СИ. Кроме того, дополнительно порог СИ может быть уменьшен при использовании накачки с большим, по сравнению с излучательным временем межзонного перехода, временем оптического импульса в случае, когда безызлучательные процессы подавлены. Учитывая подавленность оже-процесса в гетероструктурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe из-за квазигиперболического закона дисперсии и низкий уровень концентрации глубоких центров вакансии ртути ( $\sim 10^9$  см<sup>-2</sup>), отвечающих за безызлучательную Шоккли-Рид-Холл рекомбинацию, такой благоприятный сценарий возможен. В таких оптимизированных волноводных структурах при  $T = 8 - 19$  К на длинах волн в районе 24 – 20 мкм получены спектры СИ при непрерывной оптической накачке с характерной пороговой плотностью мощности меньше 1 Вт/см<sup>2</sup>. Ранние результаты для структур без оптимизированного волновода демонстрировали СИ в этом диапазоне длин волн исключительно при импульсной оптической накачке, пороговая мощность которой составляла 5 кВт/см<sup>2</sup>. Уменьшение модовых потерь и использование непрерывной накачки, фактически позволяющей сколь угодно долго накапливать носители на уровнях размерного квантования для получения инверсии населенности, позволили добиться столь значительного улучшения по уменьшению порога наблюдения СИ в таких структурах. Представленные в работе результаты показывают существенное, более чем на три порядка, улучшение пороговых характеристик наблюдения СИ и делает такие структуры перспективными для лазеров, работающих при киловаттных плотностях мощности при относительно высоких ( $> 200$  К) температурах и в непрерывном режиме при низких температурах.

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

1. S.V. Morozov et al., *ACS Photonics*, **8** (12), 3526-3535 (2021).

МЕЖЗОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ ЭЛЕКТРОНОВ С ИСПУСКАНИЕМ ПЛАЗМОНОВ  
В МНОГОЯМНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ HgTe/CdHgTe

Перспективным объектом для создания лазеров, генерирующих излучение в области остаточных лучей GaAs, где не работают квантово-каскадные лазеры, являются гетероструктуры CdHgTe/HgTe с квантовыми ямами (КЯ). В работе [1] показано, что в условиях инверсной населенности зон коэффициент усиления плазмонов за счет межзонных переходов электронов в структуре с одиночной квантовой ямой имеет порядок  $10^5 \text{ см}^{-1}$ . Кроме того для генерации плазмонов нет необходимости создания специальных волноводов. Эти особенности открывают возможность создания компактных источников излучения среднего ИК диапазона на основе рассматриваемых структур. Кроме того, межзонные переходы с испусканием плазмонов являются важным каналом рекомбинации неравновесных носителей. Однако, до настоящего времени процессы усиления и рекомбинации с участием плазмонов рассматривались только в одноямных структурах [1 – 3]. Данная работа посвящена изучению межзонных переходов с испусканием плазмонов в многоямных гетероструктурах HgTe/CdHgTe. В рамках данной работы проведено исследование спектра коэффициента усиления в многоямных структурах, а также изучена зависимость средней вероятности спонтанной рекомбинации с испусканием плазмонов от концентрации неравновесных носителей.

Спектры плазмонов находились с учетом пространственной дисперсии поляризуемости неравновесных носителей заряда в структурах с 2 – 8 КЯ, а также в структуре с бесконечным числом КЯ. Вычислен коэффициент межзонного усиления плазмонов для рассматриваемых структур. Обнаружено, что наибольшим коэффициентом усиления обладает мода, электрическое поле которой в плоскости КЯ не обращается в ноль. При фиксированной концентрации неравновесных носителей ( $4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ), увеличение числа КЯ приводит к немоному возрастанию коэффициента усиления плазмонов при температуре 4.2 К. Показано, что с ростом числа КЯ, уменьшается пороговая концентрация неравновесных носителей, превышая которую усиление становится возможным.

Проведено вторичное квантование плазмонов и получены выражения для вероятностей спонтанной рекомбинации носителей с испусканием плазмонов. Построена зависимость средней вероятности спонтанной рекомбинации с испусканием плазмона при трех эффективных температурах неравновесных носителей (4.2, 77 и 300 К) для структур с 2, 3 КЯ, а также для структуры с бесконечным числом КЯ. Показано, что увеличение числа КЯ слабо влияет на величину средней вероятности рекомбинации. Увеличение температуры приводит к уменьшению средней вероятности рекомбинации с испусканием плазмонов.

1. K. Kapralov, G. Alymov, D. Svintsov, and A. Dubinov, *J. Phys.: Condens. Matter* 32, 065301 (2020).
2. V. Ya. Aleshkin et al., *Journal of Optics*, 23.11, 115001 (2021).
3. V. Ya. Aleshkin et al., *Journal of Physics Communications*, 4.11, 115012 (2020).

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУСЛОЙНОГО ГРАФЕНА  
С РАЗОРИЕНТИРОВАННЫМИ СЛОЯМИ

Основными требованиями, предъявляемыми к современным электронным устройствам, являются минимальные размеры компонентов, быстродействие и низкое энергопотребление, поэтому элементная база таких устройств должна основываться на материалах с пониженной размерностью и высокой подвижностью носителей заряда. Кроме того, внедрение структур с пониженной размерностью позволяет использовать квантовые эффекты, такие как туннелирование, осцилляции проводимости в магнитном поле. [1]. В частности, графен – монослой атомов углерода, обладающий рядом уникальных электрофизических свойств. При этом, недостатком изолированного монослоя графена является отсутствие запрещённой зоны, необходимой для управления переносом электронов в приборах.

Варьирование энергетических свойств однослойного графена возможно при его легировании или взаимодействии с подложкой. В последнее время большой интерес вызывают гетероструктуры из двух или нескольких слоёв двумерных материалов с различными параметрами. Также, управление характеристиками структур возможно путем поворота слоёв относительно друг друга. Приборы, созданные на основе нескольких слоёв графена, развёрнутых относительно друг друга, открывают новый раздел электроники – твистронику [2]. В двухслойном графене с различным углом разориентации слоёв появляются периодически расположенные области (т.н. AA- и AB- упаковки), при этом свойства графена периодически меняются и возникает узор, напоминающий муаровый. Таким образом, появляется сверхпериод в геометрии данных слоёв, а вследствие этого, и в энергетической структуре. Размеры областей и, соответственно, параметр сверхпериода определяются углом разориентации.

В качестве исследуемых структур рассматриваются слои графена с различным сверхпериодом, создаваемым муаровым узором в зависимости от угла поворота. В данной работе численным методом матрицы переноса рассчитываются коэффициенты прохождения структуры и вольт-амперные характеристики, полученные на их основе. Исследуется влияние угла поворота слоёв и силы межслойного взаимодействия в двухслойном графене на транспортные характеристики структуры. Результаты расчетов показывают, что особенности вольт-амперных характеристик двухслойного муарового графена заметно зависят от угла разориентации слоёв.

1. Ferrari et al., *Nanoscale*, 7, 4598–4810, 2015.
2. A.V. Rozhkov et al, *Physics Reports*, 648, 1–104, 2016.

МАГНЕТО-МЕЖПОДЗОННЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ  
В ОДНОМЕРНОЙ ЛАТЕРАЛЬНОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ

Транспортные свойства двумерного (2D) электронного газа в одномерных латеральных сверхрешетках (ULSL) на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs исследуются более 30 лет [1, 2]. По своей сути ULSL представляет собой 2D систему с периодической пространственной модуляцией потенциала. Наиболее ярким явлением, обнаруженным в ULSL, являются соизмеримые осцилляции (CO) магнетосопротивления [1]. В рамках классической модели CO объясняются резонансом между периодическим движением электронов в магнитном поле  $B$  по орбите радиусом  $R_c$  и осциллирующим дрейфом центра орбиты, индуцированным латеральным потенциалом [3]. В рамках квантовой механики латеральная модуляция потенциала видоизменяет энергетический спектр электронов в магнитном поле вследствие снятия вырождения по отношению к координате центра волновой функции, что приводит к возникновению зон Ландау. Ширина зон Ландау равна нулю в минимумах CO, а в максимумах – принимает максимальное значение. Периодическое изменение ширины зон Ландау по  $1/B$ , а вместе с шириной и величины зонной проводимости, является квантовой причиной CO [2].

Недавно были созданы ULSL на основе высокоподвижных гетероструктур GaAs/AlAs с двумя заполненными энергетическими подзонами, в которых CO сосуществуют с магнито-межподзонными (MIS) осцилляциями [4]. Такие ULSL открыли возможность экспериментального изучения роли зон Ландау и особенностей Ван Хофа в межподзонном рассеянии. В настоящей работе приводятся результаты исследования MIS осцилляций в ULSL, изготовленных на основе одиночной квантовой ямы GaAs шириной 26 нм с модулированным сверхрешеточным легированием. Обнаружена сильная модификация MIS осцилляций по амплитуде и фазе – подавление амплитуды и «переворот» MIS осцилляций в некоторых диапазонах магнитных полей. Полученные экспериментальные данные объясняются ролью особенностей Ван Хофа в резонансных межподзонных переходах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № РНФ-22-22-00726, <https://rscf.ru/project/22-22-00726/>.

1. D. Weiss, K. v. Klitzing, K. Ploog, and G. Weimann, *Europhys. Lett.* **8** 179 (1989).
2. R. W. Winkler, J. P. Kotthaus, K. Ploog, *Phys. Rev. Lett.* **62** 1177 (1989).
3. C. W. J. Beenakker, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 2020 (1989).
4. A. A. Bykov, I. S. Strýgin, A. V. Goran et al., *JETP Lett.* **110** 354 (2019).

Н.А. Тальнишних (м.н.с., НТЦ микроэлектроники РАН),  
А.Е. Иванов (ст. лаборант, НТЦ микроэлектроники РАН),  
Е.И. Шабунина (к.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
Н.М. Шмидт (д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

## ОСОБЕННОСТИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА И БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В MQW AlGaIn/GaN, ИЗЛУЧАЮЩИХ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 280 НМ

MQW AlGaIn/GaN являются основой светодиодов (СД) и лазеров ультрафиолетового (UV) диапазона, перспективных для применения в медицине, для обеззараживания воды, в системах передачи информации. Однако низкие значения внешней квантовой эффективности (ВКЭ), менее 10%, и срока службы, не более 1000 часов, сдерживают практическое применение этих приборов. Процессы безызлучательной рекомбинации носителей заряда (БР) во многом определяют наблюдаемые явления и интенсивно изучаются различными методами. В данной работе использованы методы изучения особенностей низкочастотного шума (НШ), несущие интегральную информацию о динамике свойств как единичных дефектов, так и системы дефектов, в диапазоне частот  $1-10^4$  Гц и плотностей тока  $10^{-5}-10^{-1}$  А/см<sup>2</sup>. Исследования проводились на коммерческих AlGaIn/GaN светодиодах с ВКЭ 4% в максимуме на длине волны 278 нм и на синих InGaIn/GaN светодиодах с ВКЭ 70% в максимуме на длине волны 445 нм. И в тех, и в других светодиодах максимум ВКЭ определяется туннельной излучательной рекомбинацией в MQW, находящихся в области объемного заряда (ООЗ) p-n перехода. Частотные зависимости спектральной плотности токового НШ ( $S_1$ ) отличаются принципиально для этих светодиодов. Для синих СД во всем диапазоне частот наблюдается зависимость вида  $S_1 \sim 1/f$ , что свидетельствует о преобладающей роли системы дефектов в БР. Для ультрафиолетовых СД, при  $f > 100$  Гц наблюдается суперпозиция  $1/f$ - и генерационно-рекомбинационного (ГР) шума, уровень которого в UV СД почти на порядок выше, чем в синих СД. Кроме того, отклонение зависимости спектральной плотности флуктуаций напряжения ( $S_v$ ) от плотности тока  $S_v(j)$  от классического вида, характеризуемого соотношением  $S_v(j) \sim j^{-1}$ , отражает неоднородное протекание тока в ООЗ, а зависимость  $S_1(j)$  - сложную динамику БР с ростом  $j$  в UV СД. Эти результаты коррелируют с фактором не идеальности прямой ветви ВАХ  $n \gg 2$  и характером ее температурной зависимости, вызванных случайными флуктуациями состава AlGaIn на гетерограницах (ГР). В результате в ООЗ присутствуют локализованные на ГР неравновесные дефекты. О присутствии флуктуаций состава в ООЗ свидетельствует значительная разница между величиной напряжения отсечки 5.8 В и напряжением 5.04 В, соответствующем длине волны излучения в максимуме 278 нм UV СД. Для синих СД со значениями ВКЭ  $> 60\%$ , эта разница менее 0.2 В. Выявленные особенности БР могут быть причинами низких значений ВКЭ в максимуме и срока службы UV СД.

И.В. Скворцов (асп., 1 год, ИФП СО РАН),  
В.А. Тимофеев, В.И. Машанов, А.И. Никифоров, И.Д. Лошкарев (ИФП СО РАН),  
Д.В. Коляда, Д.Д. Фирсов, О.С. Комков (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

## ОСОБЕННОСТИ ЗОННЫХ ДИАГРАММ МНОЖЕСТВЕННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМ GeSiSn/Si И ИХ ФОТООТКЛИК В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

Создание полупроводниковых оптоэлектронных устройств на основе элементов IV группы Ge, Si, Sn является перспективным направлением благодаря возможности монолитной интеграции электронных и оптических компонент на едином кремниевом кристалле [1]. Добавление Sn в матрицу Ge(Si) позволяет уменьшить ширину запрещенной зоны, а также получить полупроводник с прямой запрещенной зоной при определенном содержании Sn. Из-за большого несоответствия параметров решеток Ge, Si и Sn применяются виртуальные подложки Ge или GeSn на Si. Из-за высокой плотности прорастающих дислокаций такой подход имеет ограничения. Целью данной работы являлось изучение особенностей зонных диаграмм гетеропереходов  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y/\text{Si}$ , а также установление оптических свойств множественных квантовых ям (МКЯ)  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y/\text{Si}$  с псевдоморфными слоями GeSiSn на Si(100).

С использованием метода молекулярно-лучевой эпитаксии были получены структуры с МКЯ  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y/\text{Si}$ . Многослойные периодические гетероструктуры содержали 10 квантовых ям GeSiSn с содержанием Ge 10 – 84%, Sn 0 – 30%. Период включал в себя слой GeSiSn толщиной от 0.5 до 2 нм и слой Si толщиной 7 нм. Упругонапряженное состояние слоев МКЯ, а также соответствие состава твердого раствора GeSiSn заданным значениям были подтверждены методом рентгеновской дифрактометрии по кривым дифракционного отражения. Оптические свойства образцов с МКЯ  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y/\text{Si}$  изучались методом фотолюминесцентной спектроскопии (ФЛ), а также путем измерения спектров фототока диодов с p-i-n структурой, содержащей МКЯ в активной области. По спектрам ФЛ показано, что изменение содержания Ge и Sn в слоях GeSiSn позволяет получить значения энергии межзонных оптических переходов в диапазоне 0.58 – 0.85 эВ (1.46 – 2.14 мкм). С использованием подхода model solid theory [2] построены зонные диаграммы, а также карты значений ширины запрещенной зоны для упругонапряженных слоев GeSiSn на подложках Si(100) и Ge(100). Исходя из расчетных данных установлено, что пики, наблюдаемые в спектрах ФЛ, связаны с межзонными оптическими переходами из X долины в Si в подзону тяжелых дырок в слое твердого раствора GeSiSn. Продемонстрировано смещение длинноволновой границы фототока вплоть до длин волн более 2 мкм при увеличении содержания Sn.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 20-79-10092.

1. R. Soref et al., *Opt. Photonics News*, **27**, 32 (2016).
2. V. Timofeev et al., *Nanoscale Res. Lett.*, **13**, 65 (2018).

П.Ю. Авдеев (маг., 1 курс, РТУ МИРЭА, каф. наноэлектроники),  
А.В. Горбатова (асп., 3 год, РТУ МИРЭА, каф. наноэлектроники),  
Д.И. Хусяинов (стаж.-исс., РТУ МИРЭА, каф. наноэлектроники),  
С.В. Овчаренко (к.ф.-м.н., стаж.-исс., РТУ МИРЭА, каф. наноэлектроники),  
А.М. Буряков (к.ф.-м.н., с.н.с., РТУ МИРЭА, каф. наноэлектроники),  
Е.Д. Мишина (д.ф.-м.н., зав. лаб., РТУ МИРЭА, каф. наноэлектроники)

## МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ В СТРУКТУРЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИК/МАГНЕТИК

Терагерцовая (ТГц) спинтроника является одним из наиболее перспективных направлений в спинтронике и электронике в целом [1]. Важной задачей для практического использования ТГц излучения является контроль его поляризации. В работе [2] был продемонстрирован способ управления ТГц поляризацией в мультислойной структуре  $TbCo_2/FeCo$ , основанный на изменении намагниченности спинтронного излучателя. Однако, недавние работы [3, 4] показали, что подобного эффекта можно также достичь при помощи магнитоэлектрического воздействия на спинтронный источник ТГц излучения в структуре пьезоэлектрик/магнетик.

В нашей работе демонстрируется управление свойствами спинтронного излучателя на основе мультислоя  $(TbCo_2/FeCo) \times 25$  при приложении электрического поля к пьезоэлектрической подложке из PMN-PT (001). Исследование проводилось методом терагерцовой спектроскопии временного разрешения в геометрии на отражение, методика которой подробно описана в [5]. В ходе работы были получены петли ТГц гистерезиса, а также зависимости поляризационные зависимости ТГц излучения. Наблюдение эффективной генерации ТГц на оптически непрозрачной подложке, а также эффективное управление свойствами генерируемого ТГц излучения переменным электрическим полем низкого напряжения (до 10 В) качественно отличают нашу работу от упомянутых выше.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 20-12-00276).

1. Walowski J., Münzenberg M. Perspective: Ultrafast magnetism and THz spintronics //Journal of Applied Physics. – 2016. – Т. 120. – №. 14. – С. 140901.
2. Khusyainov D. et al Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure //Scientific reports. – 2021. – Т. 11. – №. 1. – С. 1-8.
3. Agarwal P. et al Electric-field control of nonlinear THz spintronic emitters //Nature communications. – 2022. – Т. 13. – №. 1. – С. 1-8.
4. Lezier G. et al Fully reversible magnetoelectric voltage controlled THz polarization rotation in magnetostrictive spintronic emitters on PMN-PT //Applied Physics Letters. – 2022. – Т. 120. – №. 15. – С. 152404.
5. Khusyainov, D., et al. "Composite Multiferroic Terahertz Emitter: Polarization Control via an Electric Field." Physical Review Applied 17.4 (2022): 044025.

## КВАНТОВАНИЕ ЭКСИТОННЫХ ПОЛЯРИТОНОВ В ОПТИЧЕСКИХ ЛОВУШКАХ

Экситонные поляритоны – это квазичастицы, которые образуются в результате сильного взаимодействия экситонов и фотонов в полупроводниках. Существует два вида экситонных поляритонов: поляритоны в объемных кристаллах и поляритоны в микрорезонаторах. Для поляритонов в микрорезонаторах характерна малая эффективная масса, которую они наследуют от фотонов в микрорезонаторе, и сильное взаимодействие между собой, приобретенное от экситонной составляющей. Эти свойства приводят к возможности конденсации, аналогичной Бозе-Эйнштейновской, то есть к образованию конденсата экситонных поляритонов. Причем конденсация невозможна в бесконечной двумерной системе, необходим ограничивающий потенциал. Если качество образца достаточно высокое, то из-за эффекта голубого сдвига поляритоны диффундируют за пределы области возбуждения и имеют случайное распределение в пространстве. Для получения определенного пространственного распределения необходимо использовать подходящий потенциал.

В случае возбуждения системы при помощи одного кольца, конденсат экситонных поляритонов может иметь различные пространственные распределения, определяемые радиальным и азимутальным квантованием. Так, например, самое низкоэнергетическое состояние, называемое первой модой, имеет форму пятна. Вторая, наиболее интересная с точки зрения возможности формирования поляритонного тока, мода имеет форму гантели. Следующие по энергии моды имеют форму концентрических колец или лепестков. При этом различные моды могут формироваться далеко не во всех ловушках. Более того, очень малые изменения (порядка 1-2 мкм) внутреннего радиуса потенциала в виде одного кольца при его постоянной ширине приводит к существенному различию в вероятности появления той или иной моды в спектре люминесценции образца.

Различные моды конденсата являются проявлением квантово-размерного эффекта, причем количество возможных состояний определяется высотой и внутренним радиусом кольцевой ловушки. А вероятность заселения – интегралом перекрытия волновой функции поляритонов, являющихся решением уравнения Шредингера, и плотности распределения экситонов в резервуаре, образующем потенциальный барьер для поляритонов.

Также интересной особенностью конденсата экситонных поляритонов, сформированного в подобной ловушке, является то, что если при мощностях, близких к пороговой, имеется одна преобладающая по интенсивности свечения мода, то в случае больших мощностей все моды имеют близкую интенсивность. Благодаря этому, предлагаемая геометрия оптической ловушки в форме одного кольца может оказаться наиболее перспективной для изучения состояний с кольцевыми поляритонными токами.

Авторы благодарны СПбГУ за финансовую поддержку (Грант № 91182694).

А.В. Аланкина (студ., 4 курс, ФГАОУ ВО ВолГУ),  
 О.С. Лебедева (к.ф.-м.н., ст. преп., ФГАОУ ВО ВолГУ, каф. ТФиВП),  
 Н.Г. Лебедев (д.ф.-м.н., проф., ФГАОУ ВО ВолГУ, каф. ТФиВП)

## ЭЛАСТОПРОВОДИМОСТЬ ГРАФЕНОВЫХ НАНОЛЕНТ В ПОЛЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Одна из ветвей сформировавшейся в XXI в. стрейнтроники направлена на изучение деформационных эффектов в низкоразмерных структурах, например, графене, что создаёт необходимые условия для развития гибкой электроники [1]. Графен относят к изотропным линейным упругим материалам при малых деформациях. При больших деформациях наблюдаются отклонения от линейности, начинает проявляться свойство текучести.

Настоящая работа посвящена изучению эластопроводимости материалов графеновой группы, таких как графеновые наноленты (GNR) с учетом пластических деформаций. Учёт текучести графеновых нанолент в данной работе осуществлён с помощью модельного электронного спектра кресельных и зигзагообразных NRs:

$$\varepsilon_a(\mathbf{k}) = \pm\gamma(\delta + \delta_{pl}) \left\{ 1 \pm 4 \cos\left(\frac{\pi q}{n}\right) \cos\left[\frac{3}{2}k_x R_0(1 + \delta + \delta_{pl})\right] + 4 \cos^2\left(\frac{\pi q}{n}\right) \right\}^{1/2},$$

$$\varepsilon_c(\mathbf{k}) = \pm\gamma(\delta + \delta_{pl}) \left\{ 1 \pm 4 \cos\left[\frac{\sqrt{3}}{2}k_y R_0(1 + \delta + \delta_{pl})\right] \cos\left(\frac{\pi q}{n}\right) + 4 \cos^2\left[\frac{\sqrt{3}}{2}k_y R_0(1 + \delta + \delta_{pl})\right] \right\}^{1/2},$$

где  $\gamma(\delta)$  – резонансный интеграл деформированных GNRs как функция относительной деформации  $\delta = \Delta a/a_0$ , где  $\Delta a = a - a_0$  – изменение равновесной постоянной решетки  $a_0 = \sqrt{3}R_0$ ,  $R_0 = 1.4 \text{ \AA}$ ;  $n$  – целое число, нумерующее спектральные моды,  $\delta_{pl}$  – величина малой пластической деформации;  $k_x, k_y$  – компоненты волнового вектора в зоне Бриллюэна GNR.

В рамках теории Кубо-Гринвуда рассчитана продольная компонента тензора эластопроводимости  $M$  «arm-chair» GNR (шириной  $N = 9, 10, 50, 100$  ЭЯ) и «zig-zag» GNR ( $N = 9, 10$  ЭЯ) как функция величины  $\delta = \pm 0.1, \pm 0.06, \pm 0.04, \pm 0.02, \pm 0.01$  при фиксированном значении  $\delta_{pl} = 0.01$ . Поведение графиков зависимости качественно различаются для проводящих и полупроводниковых GNRs и подобны результатам [2], полученным в упругом приближении. Для всех проводящих нанолент кривые качественно подобны и не зависят от ширины ленты. Величина  $M$  принимает положительное (отрицательное) значение при деформации растяжения (сжатия). С ростом ширины полупроводниковой ленты наблюдается численное увеличение продольной компоненты  $M$ .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-20048, <https://rscf.ru/project/22-22-20048/>, и Администрации Волгоградской области.

1. Антонова И.В. *УФН*, **192**(6), 609 – 641 (2022).

2. Lebedeva O.S. et al., *Journal of Physics: Condensed Matter*, **32**(14), 145301 (2020).

МАГНЕТО-ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ТОПОЛОГИЧЕСКОГО  
ИЗОЛЯТОРА  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 

Проявление уникальных, отличных от других материалов, свойств трехмерных топологических изоляторов (ТИ) привлекает большое внимание научного сообщества в силу перспективности их использования в будущем в качестве основы для спин-зависимых устройств. Сочетание симметрии обращения времени и сильного спин-орбитального взаимодействия приводит к образованию поверхностных состояний на границе ТИ, которые описываются нечетным числом конусов Дирака с направлением спина, ортогональным волновому вектору, и однозначно с ним связанным. Данные состояния устойчивы к рассеянию на немагнитных примесях и дефектах. Однако, несмотря на активное исследование пленок ТИ, выявление вклада поверхностных состояний в магнето-транспортные свойства остается непростой задачей из-за шунтирования поверхностных состояний проводимостью объема.

Работа посвящена изучению магнето-транспортных свойств пленок трехмерных ТИ на основе селенида висмута, выращенных на подложках слюды и графена. Пленки ТИ получены с использованием метода физического осаждения из газовой фазы. Использование графена позволяет ожидать формирование структурно совершенной гетерограницы ТИ/графен, а также возможное изменение магнето-транспортных свойств структур из-за эффекта близости ТИ и графена.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование магнетопроводимости и температурной зависимости проводимости на пленках  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , выращенных на подложке  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{графен}/\text{ТИ}$ . Показано, что в проводимости доминирует вклад объема, в то время как магнетосопротивление определяется как объемными, так и поверхностными состояниями. Вклад топологических поверхностных состояний структуры  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{графен}/\text{ТИ}$  проявляется в эффекте слабой антилокализации (САЛ). Анализ кривых магнетопроводимости с помощью двух функций Хиками, описывающих вклады слабой локализации (СЛ) и слабой антилокализации, показал, что в пленке толщиной 50 нм эффект САЛ определяют 2 канала проводимости, тогда как САЛ для пленки с толщиной 30 нм определяется одним каналом. Показано, что при уменьшении толщины пленки от 50 нм до 20 нм происходит переход от эффекта САЛ к СЛ. Для объяснения экспериментальных данных предложена модель, основанная на зависимости вклада САЛ от разных поверхностей при разной толщине пленки от изгиба зон на границах графен/ТИ и ТИ/воздух.

И.В. Бегичев (студ., 6 курс, МФТИ),  
А.В. Арсенин (МФТИ),  
В.С. Волков (МФТИ),  
Д.А. Казарян (МФТИ)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СКРУЧЕННЫХ ДВУМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ПРИ ПОМОЩИ НЕПРЕРЫВНОЙ МОДЕЛИ

Угол между слоями, составляющими Ван-дер-Ваальсовскую гетероструктуру, является важной степенью свободы системы. Кристаллы из нескольких слоев атомов оказываются естественно скрученными при использовании метода осаждения из паровой фазы [1]. В зависимости от угла скручивания значительно изменяется электронная структура, транспортные и оптические свойства гетероструктур [2].

Общепринятые расчеты электронной структуры из первых принципов работают только в особо выделенных случаях накладываются решеток из разных слоев, в то время как экспериментально осуществимы гетероструктуры с любыми углами поворота в пределах погрешности в  $1^\circ$  [3]. Рассчитать дисперсионные кривые структуры с любым углом поворота можно, используя модель сильной связи. Тем не менее, такие вычисления дороги вычислительно и плохо адаптируются от случая к случаю. Более универсальным является приближение непрерывной модели. Непрерывная модель позволяет составить эффективный гамильтониан сильной связи с учетом процессов переброса электрона из слоя в слой [4, 5].

В нашей работе производилось теоретическое моделирование двухслойных гетероструктур: скрученного графена и дихалькогенидов переходных металлов. Основной целью работы было получение оптических констант данных материалов, возникающих в одночастичной модели за счет межзонных переходов. Для скрученного графена подобные расчеты уже были проделаны в работах [6, 7]. Для дихалькогенидов были получены соответствующие зависимости от энергии фотона и угла.

1. J. Hicks, M. Sprinkle, K. Shepperd, F. Wang, A. Tejada, A. Taleb-Ibrahimi, F. Bertran, P. Le Fevre, W. A. de Heer, C. Berger, and E. H. Conrad, *Phys. Rev. B* **83**, 205403 (2011).
2. J. Jung, A. Raoux, Z. Qiao, and A. H. MacDonald, *Phys. Rev. B* **89**, 205414 (2014).
3. Lemme, M.C., Akinwande, D., Huyghebaert, C. *et al.* 2D materials for future heterogeneous electronics. *Nat Commun* **13**, 1392 (2022).
4. J. M. B. Lopes dos Santos, N. M. R. Peres, and A. H. Castro Neto, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 256802 (2007).
5. R. Bistritzer and A. H. MacDonald, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **108**, 12233 (2011)
6. P. Moon and M. Koshino, *Phys. Rev. B* **88**, 241412 (2013).
7. Massatt, D., Carr, S. & Luskin, M. Efficient computation of Kubo conductivity for incommensurate 2D heterostructures. *Eur. Phys. J. B* **93**, 60 (2020).

А.А. Бутюгина (студ., 1 курс маг., СПбГУ, каф. фотоники),  
 И.А. Соловьёв (СПбГУ, каф. фотоники),  
 Ю.В. Капитонов (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ, каф. фотоники)

### ФОТОННОЕ ЭХО ОТ ТРИОНОВ И ЭКСИТОНОВ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ GaAs/AlGaAs

В последнее время особый интерес представляют методы реализации хранения и управления оптической информацией с помощью использования спиновых состояний в полупроводниковых материалах. Преимущество таких методов заключается в том, что они позволяют осуществлять быструю запись с помощью коротких лазерных импульсов на субпикосекундных временах. В настоящей работе проведено исследование фотонного эха от экситонов и их комплексов, в частности от положительных и отрицательных трионов. Исследуемый образец содержит квантовую яму GaAs/AlGaAs толщиной 15 нм, ширина запрещенной зоны ямы и стенок равна 1.52 эВ и 1.85 эВ соответственно. Температура образца в течение всего эксперимента оставалась равной 1.46 К. На рис. 1 показана зависимость амплитуды сигнала фотонного эха от времени опорного импульса и амплитуды первого сигнала. В зависимости наблюдается два максимума Раби-осцилляций — явление изменения сигнала фотонного эха при увеличении мощности первого импульса. Для максимумов Раби-осцилляций были измерены временные профили фотонного эха в зависимости от времени между двумя импульсами  $\tau_{12}$ , зависимость амплитуды сигнала от  $\tau_{12}$  и время необратимой фазовой релаксации  $T_2$ . Было установлено, что при параметрах системы, соответствующих первой Раби-осцилляции,  $T_2$  равно 43.1 пс.

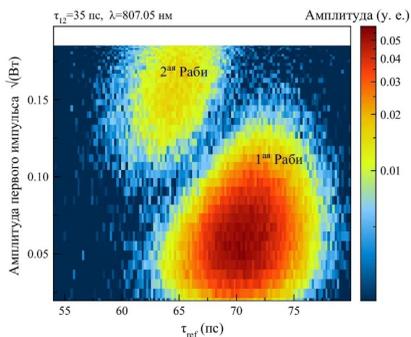


Рис. 1. Зависимость сигнала фотонного эха от времени между двумя импульсами  $\tau_{12}$  и амплитуды первого импульса

Работа выполнена на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ «Нанопотоника». Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00439 (<https://rscf.ru/project/22-22-00439/>).

С.Ю. Кияницын (студ., 6 курс, СПбГЭТУ, каф. ФОТ),  
А.И. Баранов (к.ф.-м.н. СПбАУ, лаб. ВИЭ),  
А.С. Гудовских (д.т.н., СПбАУ, лаб. ВИЭ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ n-GaP/p-Si, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ PE-ALD

Одним из перспективных материалов для многопереходных солнечных элементов на подложках кремния является GaP, так как рассогласование между Si и GaP составляет менее 0.4%, а добавление азота в GaP позволит варьировать запрещенную зону GaPN в диапазоне от 1.7 эВ до 2.2 эВ. В настоящей работе будет использована технология плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения (PE-ALD) при температурах ниже 400°C для роста n-GaP на подложках p-Si. Такая технология позволяет выращивать слои поочередными последовательными реакциями прекурсоров галлия и фосфора, происходящими на поверхности подложки. Основным преимуществом данного метода является то, что рост плёнок основан на механизме самоограничения, то есть за один цикл невозможно осадить больше одного монослоя, что обеспечивает высокую однородность и конформность толщины пленки. Ранее была показана принципиальная возможность донорного легирования пленки GaP, выращенной методом PE-ALD с добавлением дополнительного потока силана [1], и, кроме того, показано, что в непрерывном режиме осаждения GaP в атмосфере аргона происходит улучшение его микрокристалличности и увеличение проводимости при увеличении потока силана, а при отсутствии аргона проводимость пленки не зависит от него.

Тем не менее, существует проблема контроля количественного уровня легирования пленок n-GaP, выращенных PE-ALD, а также деградации поверхности подложки p-Si вследствие использования дополнительного потока аргона [2]. Поэтому в текущей работе будут рассмотрены фотопреобразовательные гетеропереходы n-GaP/p-Si с 10-20 нм слоями GaP выращенные PE-ALD, где будут варьироваться потоки прекурсоров PH<sub>3</sub>, TMG, SiH<sub>4</sub>, состав плазмы из H<sub>2</sub> и Ar для определения оптимального их соотношения для получения n-GaP, обеспечивающего лучшие фотоэлектрические свойства гетероперехода без образования дефектов в подложке. Методами нестационарной спектроскопии глубоких уровней и спектроскопии полной проводимости будут изучены дефектные свойства полученных структур и слоев GaP, а также определено их влияние на фотоэлектрические свойства (спектры квантовой эффективности, вольт-амперные характеристики) гетеропереходов n-GaP/p-Si.

Представленные в работе исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-10413).

1. Baranov *et al* 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1124** 041036.
2. Baranov *et al* 2020 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1482** 012017.

## СТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ДИАПАЗОНЕ 25 – 31 МКМ В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ НА ОСНОВЕ HgCdTe

На протяжении последних десятилетий достигнут значительный прогресс в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии твердых растворов HgCdTe, в связи с чем наблюдается рост числа исследований этого материала и гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) на его основе. Недавние исследования показывают, что такие структуры могут быть перспективными для создания длинноволновых межзонных лазеров [1]. На длинах волн 16 – 30 мкм в HgCdTe практически отсутствует решеточное поглощение, препятствующее продвижению в обозначенный диапазон квантово-каскадных лазеров на основе “традиционных” A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> материалов GaAs и InP.

В данной работе выполнены исследования фотолуминесценции и стимулированного излучения (СИ) в структурах с КЯ на основе HgCdTe с диэлектрическим волноводом, выращенным на полуизолирующей подложке GaAs(013), с ZnTe и CdTe буферами. Исследование структур со стандартной толщиной (10 мкм) технологического буфера CdTe позволило получить СИ с длинами волн 25 мкм и 31 мкм. В случае более коротковолнового СИ (25 мкм) при увеличении температуры с 8 до 60 К линия СИ сдвигалась до 17 мкм из-за увеличения ширины запрещенной зоны. В структуре, в которой СИ наблюдалось на длине волны 31 мкм, сдвига в коротковолновую область с увеличением запрещенной зоны не наблюдается, что связано, как показывают расчеты, с резким увеличением радиационных потерь в области 25 – 31 мкм. В то же время, локализация излучения с длинами волн 31 мкм и более достигается благодаря эффекту сильного отражения от подложки в полосе остаточных лучей GaAs.

Для предотвращения «вытекания» моды в GaAs-подложку в области 25 – 31 мкм толщина буфера CdTe была увеличена до 15 мкм, что привело к уменьшению модовых потерь не менее, чем в 30 раз. Оптимизированная структура позволила получить СИ с длиной волны 27 мкм, сохраняющееся в спектральном диапазоне до 18 мкм при увеличении температуры от 8 К до 72 К. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов модового усиления показывает, что максимальная величина усиления ограничивается разогревом носителей, который возникает из-за «активации» оже-рекомбинации для носителей с энергией, достаточной для преодоления порога оже-процесса с участием двух электронов и дырки. Оценки показывают, что при сохранении условий эксперимента можно рассчитывать на получение СИ в диапазоне длин волн до 33.5 мкм, в то время как с увеличением длины волны оптической накачки более 10.6 мкм диапазон достижимых длин волн СИ расширяется до 40 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-72-10111).

1. S.V. Morozov, V.V. Rumyantsev et al., *ACS Photonics* **8** 3526-3535 (2021).

М.А. Максимов (студ., 2 курс бак., СПбГУ, каф. фотоники),  
 Р.С. Назаров (студ., 2 курс маг., СПбГУ, каф. фотоники),  
 Ю.В. Капитонов (к.ф.-м.н., с.п., СПбГУ, каф. фотоники)

### ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЭКСИТОНОВ В ШИРОКОЙ КВАНТОВОЙ ЯМЕ InGaAs/GaAs

В настоящее время работы по исследованию фотолюминесценции в широких квантовых ямах представляют значительный научный интерес для обнаружения квантовых биений – явления, важного для понимания квантовой запутанности и лазерной генерации без инверсии заселенностей, а также для создания ультрабыстрых оптических приборов.

В настоящей работе исследуется ФЛ от экситонов в широкой 145 нм квантовой яме  $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}/\text{GaAs}$  при оптической накачке непрерывным лазерным излучением 1.9 эВ. Строится теоретическая модель, описывающая квантование энергии поступательного движения экситона в яме.

Полученные экспериментальные данные позволяют говорить о наличии ФЛ от экситонов в толстой яме. В ходе работы был выявлен характерный сдвиг спектра ФЛ при увеличении температуры; особенности на экспериментальных спектрах совпадают с предсказаниями в рамках предложенной теоретической модели.

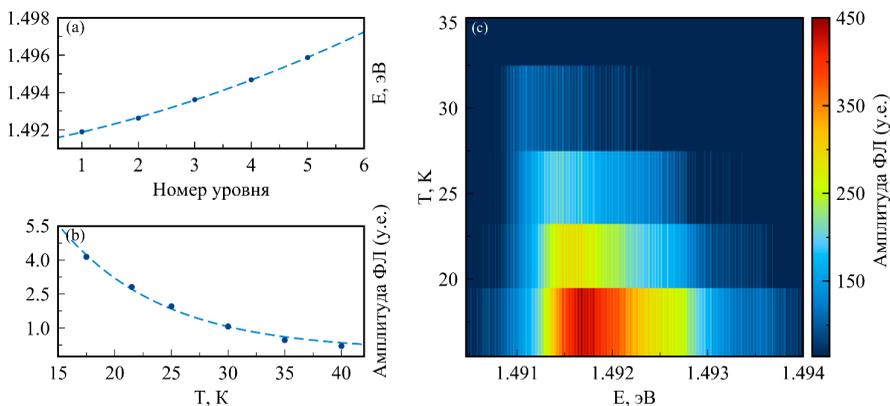


Рис. 1. (a) Энергия различных уровней квантовой ямы. Амплитуда (b) и спектры (c) ФЛ при различных температурах.

Работа выполнена на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ «Нанопотоника» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Мегагрант № 075-15-2022-1112).

И.А. Норватов (студ., 4 курс, СПбПУ, ВИФШ),  
А.Д. Петрук, Н.Ю. Харин (асп., 1 год., СПбПУ, ВИФШ),  
Д.А. Фирсов (д.ф.-м.н., проф. СПбПУ, ВИФШ),  
Д. Айрапетян (РАУ, Армения)

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В СТРУКТУРАХ С ТУННЕЛЬНО-СВЯЗАННЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ GaAs/AlGaAs

Широкое использование терагерцовых (ТГц) оптоэлектронных приборов ограничено отсутствием мощных, компактных и недорогих источников излучения. Разработка физических основ альтернативных схем получения ТГц излучения является актуальной задачей. Один из способов генерации ТГц излучения – использовать межподзонные переходы электронов в квантовых ямах. Туннельно-связанные квантовые ямы (ТСКЯ), в сравнении с одиночными, обладают большим набором параметров для создания оптимальных условий излучения, поэтому они стали объектом данного исследования. Был проведен расчет энергий и волновых функций электронов в подзонах ТСКЯ и максимизация матричного элемента оптического перехода для разных наборов параметров ТСКЯ. На основе проведенного расчета разработан оптимальный дизайн структуры для наблюдения ТГц излучения при межподзонных переходах электронов в условиях межзонной оптической накачки. Одним из факторов, определяющих интенсивность ТГц излучения при межподзонных переходах, является заселенность конечного состояния – в нашем случае, первой подзоны. В обычных условиях оно опустошается за счет межзонной рекомбинации. Его можно интенсивно опустошать, если обеспечить стимулированное излучение на межзонных переходах  $e_1 \rightarrow hh_1$ . С этой целью в структуре необходимо создать волновод для излучения ближнего инфракрасного (БИК) диапазона.

В данной работе был исследован образец ТСКЯ с волноводом для излучения в БИК диапазоне. Были измерены спектры фотолюминесценции (ФЛ) образца в БИК диапазоне при межзонной оптической накачке непрерывным лазером, работающем на длине волны 532 нм. Спектры были получены при температурах 300 К, 77 К и 4,2 К. На полученных спектрах наблюдаются особенности, которые совпадают с расчетными энергиями переходов электронов. Кроме того, спектры ФЛ в БИК диапазоне при температуре 4,2 К также исследовались для образца в геометрии четырехсклолотого резонатора полного внутреннего отражения ( $0,6 \times 0,6 \text{ мм}^2$ ). В такой геометрии было зарегистрировано стимулированное излучение. Излучение фиксировалось по нормали к поверхности образца, а также с торца. Межзонная оптическая накачка осуществлялась мощным импульсным лазером. На полученных спектрах в полосе спонтанного излучения наблюдается высокоинтенсивный узкий пик, обладающий пороговым характером. На основе проведенных экспериментов планируется исследование влияния стимулированного излучения в БИК диапазоне на интенсивность ТГц излучения при межподзонных переходах электронов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00105.

П.А. Пантюхина (студ., 4 курс, Университет ИТМО, Физический Факультет),  
К.Л. Кошелев (Ph.D., н.с., Австралийский Национальный Университет)

## УВЕЛИЧЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ЭКСИТОНОВ В ДВУМЕРНЫХ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Управление скоростью спонтанного излучения экситонов с помощью резонансных структур, основанное на изменении локальной плотности оптических состояний, было продемонстрировано в различных атомных и твердотельных системах [1]. В последние годы исследователи активно изучают свойства экситонов в ультратонких полупроводниках, монослоях дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), в которых преобладают оптические переходы по механизму спонтанного излучения [2]. Недавние работы демонстрируют увеличение скорости спонтанного излучения экситонов на несколько порядков за счет совмещения монослоев ДПМ с резонансными фотонными структурами, обеспечивающими локальное усиление электрического поля в окрестности экситонных центров [3]. Обратный эффект, основанный на подавлении спонтанного излучения экситонов с помощью наноструктурированных оптических резонаторов, представляет особый интерес, в частности, для объяснения сложной динамики релаксации и рекомбинации экситонов в монослоях ДПМ [4]. Однако на настоящий момент этот эффект практически не изучен.

В настоящей работе теоретически и численно исследовано увеличение радиационного времени жизни экситонов в двумерных монослоях ДПМ, интегрированных в диэлектрические фотонные структуры, за счет изменения относительного положения монослоя и модификации локальной плотности оптических состояний. Была построена аналитическая модель слабой связи между экситонами в монослоях ДПМ и утекающими модами диэлектрического волновода. Получено замкнутое аналитическое выражение для фактора Парселла для экситонов. Показано, что при помещении монослоя в локальные минимумы поля резонансной фотонной моды, его радиационное время жизни может быть увеличено в  $n^2$  раз по сравнению с радиационным временем жизни экситонов в монослое ДПМ, располагающемся в воздухе, где  $n$  - показатель преломления материала волновода. Показано, что максимальное время жизни ограничено радиационными потерями утекающих мод волновода. Также показано, что при расширении модели – переходе к взаимодействию с периодической метаповерхностью, время жизни экситонов может превышать предел в  $n^2$  раз, полученный для волновода, более чем на один порядок, за счет сложной структуры локальной плотности состояний метаповерхности. Разработанная теория позволяет объяснить результаты недавних экспериментов [4].

1. M. Bayer, et al., Physical Review Letters 86, 3168 (2001).
2. F. Cadiz, et al., Physical Review X 7, 021026 (2017).
3. Y.C. Lee, et al., ACS Photonics 4, 93-105 (2017).
4. H.H. Fang, et al., Physical Review Letters 123, 067401 (2019).

## РЕЗОНАНСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ СПИНА В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ПОЛУПРОВОДНИК–ФЕРРОМАГНЕТИК

Спинтроника, как область физики конденсированного состояния, изучает явления в твердых телах, связанные со спиновым транспортом, а также возможность применения этих явлений в создании устройств для хранения и обработки информации.

В последнее время большой интерес для исследований представляют подобные графену структуры, такие как дираковские материалы. Вследствие большого спин-орбитального взаимодействия и двумерности, в них могут наблюдаться новые эффекты, связанные с зарядовым и спиновым транспортом. При взаимодействии таких структур с прилегающим слоем ферромагнетика возникает спин-торк — эффект изменения намагниченности в ферромагнетике под воздействием проникающих с него спин-поляризованных электронов, который может быть использован при создании вычислительных устройств.

Для более эффективного применения подобных эффектов необходимо увеличить максимальную спиновую концентрацию, накапливающуюся в структуре, что и изучается в данной работе. Рассматриваются механизмы спинового резонанса в двумерных структурах и на поверхности топологических изоляторов. Также рассматривается роль асимметричного рассеяния на примесях в создании спинового тока и создающегося в результате эффекта спин-торка.

1. A. Avsar et.al., Spintronics in graphene and other two-dimensional materials (2020).
2. Ethan C. Ahn, 2D materials for spintronic devices (2020).
3. D.A. Pesin, A.H. MacDonald, Quantum kinetic theory of current-induced torques in Rashba ferromagnets (2012).
4. M.H. Fischer et.al., Spin-torque generation in topological insulator based heterostructures (2016).
5. M. Duckheim, D. Loss, Electric-dipole-induced spin resonance in disordered semiconductors (2006).

А.В. Снегирев (студ., 1 курс маг., НГУ, каф. ФПП),  
В.М. Ковалев (д.ф.-м.н., зав. лаб., ИФП СО РАН),  
М.В. Энтин (д.ф.-м.н., г.н.с., ИФП СО РАН)

## ДОЛИННЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА, ИНДУЦИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ДИФFUЗИЕЙ, И НЕЛИНЕЙНЫЙ ГАЛЬВАНДИФFUЗИОННЫЙ ТРАНСПОРТ В ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ДИРАКОВСКИХ 2D МОНОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛАХ

В последнее время значительный интерес был привлечен к исследованию свойств двумерных полупроводников, таких как дихалькогениды переходных металлов (ДПМ). Они имеют уникальные оптические свойства, которые могут быть применены в оптоэлектронике. На транспортные свойства ДПМ определяющее влияние оказывает их необычная зонная структура, содержащая пары электронных и дырочных долин, расщепленных сильным спин-орбитальным взаимодействием. В результате, у носителей заряда появляется дополнительная долинная степень свободы. Оптическое возбуждение циркулярно-поляризованным светом может приводить к неравновесному заселению долин. Из-за большого расстояния в импульсном пространстве номер долины становится хорошо сохраняющейся величиной, которая может определять транспортные свойства материала.

Данная работа посвящена теоретическому исследованию электронных транспортных эффектов в монослоях ДПМ, обусловленных неоднородным распределением концентрации носителей заряда. Последнее может быть достигнуто, например, неравномерным облучением образца или инжекцией электронов из других материалов.

В первой части работы рассмотрен процесс анизотропного рассеяния носителей заряда на точечных примесях (skew-рассеяние), в результате которого появляется поперечная к градиенту концентрации компонента тока. Рассчитана и проанализирована поперечная компонента тензора диффузии. Результат качественно аналогичен долинному эффекту Холла с заменой компонент электрического поля на соответствующие градиенты концентрации носителей заряда.

Во второй части работы рассмотрено изотропное рассеяние на точечных и кулоновских примесях. Показано, что в результате учета тригональной гофрировки зон появляются квадратичные по градиентам концентрации поправки к току. В первом порядке по величине гофрировки зон были вычислены и проанализированы компоненты тензоров нелинейной диффузии, связанные с тригональным спектром в долинах, а также смешанные компоненты, обусловленные градиентом концентрации и электрическим полем. Результат качественно аналогичен фотогальваническому эффекту. Кроме того, найдены токи, обусловленные вторыми производными концентрации по координатам.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОЙ ДИНАМИКИ ЭКСИТОНОВ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ GaAs, НАБЛЮДАЕМОЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НАКАЧКА–ЗОНДИРОВАНИЕ

Исследование низкоразмерных систем является одним из перспективных направлений физики полупроводников. В частности, в квантовых ямах GaAs/AlGaAs существует ряд эффектов, которые до конца не изучены и представляют значительный интерес ввиду возможности использования для целей оптоэлектроники. При исследовании экситонных резонансов в таких системах могут возникать чувствительные к поляризации динамические сдвиги энергии перехода и квантовые биения [1].

В настоящей работе проведено теоретическое моделирование экспериментально исследованной динамики экситонов в квантовой яме GaAs/AlGaAs в схеме накачка-зондирование со спектральным разрешением. В эксперименте были измерены зависимости коэффициента отражения от временной задержки между импульсами при различных поляризациях импульсов накачки и зондирования. Полученные результаты свидетельствуют о наличии осциллирующего сдвига частоты линии поглощения экситона с тяжелой дыркой, а также о биениях ее амплитуды в зависимости от задержки. Эти биения, однако, присутствуют не во всех конфигурациях, а лишь таких, в которых поляризации импульсов накачки и зондирования совпадают. Замечен также очень небольшой сдвиг частоты в конфигурации со скрещенными линейными поляризациями.

Для теоретического описания предложена 5-уровневая модель, в которой есть одно основное состояние и четыре состояния экситонов с легкими и тяжелыми дырками, разделенные по спину. Действие импульсов света на систему (спектрально широкого импульса накачки и спектрально узкого импульса зондирования) описывалось оптическими уравнениями Блоха. Кроме этого, учтено обменное взаимодействие между экситонами, рожденными накачкой, и экситонами пробного пучка в соответствии с работой [1]. Результаты теоретических расчетов динамики экситонов в данной модели находятся в согласии с экспериментальными данными. Теоретический анализ позволил получить характерные величины сдвигов и частоты биений для совпадающих и скрещенных поляризаций импульсов. Показано, что обнаруженные экспериментальные зависимости отражают динамику когерентности экситонов с тяжелой и легкой дырками, созданных накачивающим пучком.

Авторы благодарят Санкт-Петербургский Государственный Университет за финансовую поддержку в рамках гранта № 91182694.

1. Trifonov A. V., Kurdyubov A. S., Gerlovin I. Ya., Smirnov D. S., Kavokin K. V., Yugova I. A., Assmann M., and Kavokin A. V., Physical Review B 102, 205303 (2020).

И.В. Чуманов (студ., 1 курс маг., СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
Д.Д. Фирсов (к.ф.-м.н., доц., СПбГЭТУ, каф. МНЭ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ФОТООТРАЖЕНИЯ МЕТАМОРФНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР $\text{In}(\text{Ga},\text{Al})\text{As}/\text{GaAs}$ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ИНФРАКРАСНОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

Метаморфные гетероструктуры  $\text{In}(\text{Ga},\text{Al})\text{As}/\text{GaAs}$  представляют особый интерес для использования в среднем ИК диапазоне (3-5 мкм) [1]. Такие структуры могут лежать в основе высокоэффективных излучающих приборов, например, лазеров и светодиодов. Это позволяет использовать их для проведения газового анализа, организации оптоволоконных линий связи, управления химическими процессами и т. д. Преимущества таких структур обусловлены наличием субмонослойной вставки из  $\text{InSb}$  II типа внутри квантовой ямы  $\text{InAs}/\text{InGaAs}$  I типа, что, в сравнении с системами квантовых ям I типа, обеспечивает лучшее удержание носителей заряда и перекрытие волновых функций электронов и дырок [1].

В настоящей работе исследовались оптические свойства ряда гетероструктур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке  $\text{GaAs}$  с метаморфным буферным слоем  $(\text{In},\text{Al})\text{As}$ . Гетероструктуры включали эпитаксиальные слои  $\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}$  и  $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ , а также сверхрешётки на основе данных твёрдых растворов. Для измерения спектров использовался метод фотоотражения, основанный на ИК фурье-спектроскопии [2]. Исследовательская установка состояла из фурье-спектрометра Vertex 80, оснащенного детектором  $\text{InSb}$ , синхронного усилителя SR-830, лазера с длиной волны 405 нм, который модулировался механически с частотой 2,5 кГц. Для анализа формы линии спектров фотоотражения применялся специализированный алгоритм обработки [3].

В результате анализа экспериментальных данных были обнаружены сигналы от прямых межзонных переходов в слоях  $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$  и  $\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}$ . По положению пика они несколько отличаются от расчётных значений ширины запрещённой зоны, что может свидетельствовать о наличии напряжений в гетероструктуре. Аналогичным образом удалось обнаружить сигналы от краёв минизон в сверхрешётке, разница по энергии, между которыми составила 0.025-0.027 эВ. Для слоёв  $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$  и сверхрешётки  $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}$  в спектрах обнаружены экстремумы, соответствующие прямым оптическим переходам в спин-отщепленные подзоны. Их анализ позволил определить значения величины спин-орбитального расщепления для исследуемых материалов, составившие 0.433-0.48 эВ.

Авторы выражают благодарность Соловьеву В.А. и Чернову М.Ю. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН) за предоставление гетероструктур для исследования. Д.Д. Фирсов благодарит за поддержку Совет по грантам Президента РФ, проект # СП-4626.2021.3.

1. Ivanov S. V. et al. Prog. in Crystal Growth and Characterization of Materials, 65.1 (2019): 20-3.
2. Фирсов Д. Д., Комков О. С., Письма в ЖТФ 39.23 (2013): 87-94.
3. Niose, T. J. C. Physical status solidi (b) 189.2 (1995): 531-542.

А.А. Янцер (студ., 1 курс маг., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, каф. ФПЭН),  
М.А. Фадеев (к.ф.-м.н., н.с., ИМФ РАН),  
С.В. Морозов (к.ф.-м.н., зав. лаб., ИМФ РАН)

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛИЧЕСТВА КВАНТОВЫХ ЯМ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ HgCdTe В ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН 3 – 5 МКМ

Мониторинг окружающей среды нуждается в полупроводниковых лазерах среднего инфракрасного (ИК) диапазона, работающих в окне прозрачности атмосферы 3 – 5 мкм, т.к. в этом диапазоне лежит большое число линий поглощения газов-парников [1]. На данный момент лучшими характеристиками среди полупроводниковых источников среднего ИК диапазона обладают квантово-каскадные лазеры (ККЛ), способные работать в непрерывном режиме при комнатной температуре [2]. Однако, из-за технологических сложностей роста ККЛ, активно разрабатываются альтернативные межзонные излучатели диапазона 3 – 5 мкм. Основным препятствием для разработки межзонных полупроводниковых лазеров среднего ИК-диапазона является оже-рекомбинация, которая приводит к резкому росту порога лазерной генерации с температурой. В нашей работе используются гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) на основе HgCdTe, т.к. в их случае коэффициент оже-рекомбинации на порядок меньше, чем у объёмных слоев HgCdTe [3]. Целью данной работы является оптимизация количества КЯ в структуре для преодоления потерь при высоких температурах.

В работе исследовались три гетероструктуры с одинаковым дизайном диэлектрического волновода с 3, 5 и 10 КЯ HgCdTe, расположенными в пучности TE<sub>0</sub> моды. Структуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующих подложках GaAs (013) с буферами из ZnTe и CdTe. Параметры КЯ были идентичными во всех образцах.

В ходе работы исследовалось стимулированное излучение (СИ) структур при оптической накачке. Были измерены зависимости пороговой интенсивности накачки от температуры. При криогенных температурах пороги генерации для всех образцов близки, но с ростом температуры отношение порогов увеличивается, что приводит к различным максимальным температурам генерации СИ, которые составляют 140, 190 и 210 К для структур с 3, 5 и 10 КЯ, соответственно. Из условия возникновения лазерной генерации был рассчитан коэффициент поглощения в структурах. Показано, что избыточная концентрация носителей, необходимая для преодоления поглощения, для структуры с 3 КЯ сопоставима с концентрацией прозрачности, но с увеличением количества КЯ она резко уменьшается. Из-за этого, начиная с некоторого числа КЯ, увеличение их количества практически перестает оказывать влияние на порог генерации СИ, который определяется концентрацией прозрачности КЯ. Таким образом, оптимальное число КЯ лежит в диапазоне 15 – 20.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-72-10111).

1. I.E. Gordon et al., *J. Quantum Spectrosc. Radiat. Transf.*, **203**, 3–69 (2017).
2. N. Bandyopadhyay et al., *Appl. Phys. Lett.*, **101**(24), 241110 (2012).
3. K. E. Kudryavtsev et al., *Appl. Phys. Lett.*, **117**, 083103 (2020).

# КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ, КВАНТОВЫЕ НИТИ И ДРУГИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ (КТКН)

УДК 538.975

Е.Д. Лещенко (к.ф.-м.н., н.с., НТЦ микроэлектроники РАН),  
В.Г. Дубровский (д.ф.-м.н., проф., СПбГУ)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ СОСТАВА ОСЕВОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ В НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ ГРУПП III-V

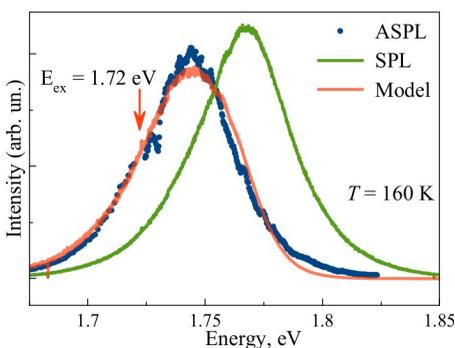
Осевые гетероструктуры на основе нитевидных нанокристаллов (ННК) полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  представляют большой интерес, обусловленный рядом перспективных направлений их использования в оптоэлектронике и нанопотонике. ННК имеют множество преимуществ, в числе которых высокое кристаллическое совершенство, контроль морфологии, кристаллической структуры, состава и степени легирования выращиваемых наноструктур, а также возможность роста на кремниевой подложке. Электрические и оптические свойства приборов на основе гетероструктурных ННК определяются в том числе профилем состава гетероперехода, который, в свою очередь, зависит от условий эпитаксиального роста. Для большинства приложений важно синтезировать гетероструктурные ННК с резкими границами гетероперехода. Моделирование процесса формирования гетероструктур на основе ННК позволяет установить взаимосвязь между их свойствами (профилем состава) и ростовыми параметрами, что необходимо для синтеза наноструктур с управляемыми свойствами.

В докладе будут представлены разработанная модель роста гетероструктурного ННК, позволяющая предсказать профиль состава  $BD/ABD/BD$  гетероперехода, и результаты проведенного теоретического исследования формирования двойной гетероструктуры в автокаталитических и  $Au$ -каталитических ННК. Изучено влияние различных параметров на профиль состава двойного гетероперехода, в том числе, температуры, концентрации внешнего катализатора (на примере золота), концентрации атомов  $V$  группы, морфологии ННК и капли (а именно, радиуса ННК и контактного угла). Будет показано как и почему резкость гетероперехода увеличивается с уменьшением температуры, увеличением концентрации внешнего катализатора, уменьшением концентрации атомов  $V$  группы (в случае кинетического режима роста), уменьшением радиуса ННК и контактного угла. Проведено сравнение кинетического и лимитированного нуклеацией роста. Представленная модель пригодна для описания профиля состава гетероперехода в ННК любой материальной системы и с использованием любого внешнего катализатора.

Проведено сравнение результатов кинетической модели с экспериментальными данными по росту гетероструктурных ННК и показано их хорошее соответствие.

## АНТИСТОКСОВА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ ВО ФТОРФОСФАТНОЙ МАТРИЦЕ

В данной работе представлено исследование антистоксовой фотолюминесценции в нанокристаллах (НК) CsPbBr<sub>3</sub> и CsPbI<sub>3</sub> во фторфосфатной стеклянной матрице. В отличие от коллоидных НК они обладают большей устойчивостью к внешнему воздействию и не деградируют со временем.



**Рис. 1.** Спектры стоксовой (зеленая кривая, SPL) и антистоксовой (синие точки, ASPL) люминесценции в перовскитных нанокристаллах CsPbI<sub>3</sub>. Красной линией показано моделирование спектра антистоксовой люминесценции.

Нами было обнаружено, что при однофотонном возбуждении в автолокализованные экситонные состояния перовскитные НК проявляют яркую антистоксовую люминесценцию [1]. Пример спектра показан на Рис. 1. Данное явление обусловлено наличием долгоживущих состояний автолокализованных экситонов. При этом электрон находится на поверхности, а дырка внутри НК. Это приводит к увеличению времени жизни экситона. При нагреве НК происходит переборс экситонов с уровней автолокализованных состояний на уровни свободных экситонов, где происходит быстрая излучательная рекомбинация экситона. На рисунке представлены спектры стоксовой люминесценции (SPL) при возбуждении  $E_{ex} = 2.33$  эВ и антистоксовой люминесценции (ASPL) при возбуждении в нижний край полосы люминесценции,  $E_{ex} = 1.72$  эВ. Нами разработана простая трехуровневая модель, которая позволяет хорошо описать спектр антистоксовой люминесценции, используя данные о спектре стоксовой люминесценции. Пример модельного спектра показан на Рис. 1.

Авторы благодарят Санкт-Петербургский Государственный Университет за финансовую поддержку в рамках гранта № 91182694.

1. Кузнецова М.С., Батаев М.Н., Чукаев М.А., Ростовцев Н.Д., Вербин С.Ю., Игнатьев И.В., Давыдов В.Ю., Смирнов А.Н., Елисеев И.А., Колобкова Е.В., Оптика и спектроскопия, принято в печать (2022).

В.О. Большаков (асп., 4 год, Университет ИТМО, ФБИТ),  
А.А. Ерина (асп., 2 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
К.В. Пригода (маг., 2 курс, СПбПУ им. Петра Великого),  
Ю.А. Жарова (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
В.А. Толмачев (д.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ГИГАНТСКОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В ГИБРИДНЫХ ПЛАЗМОННЫХ НАНОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ c-Si И Ag

С каждым годом растет количество публикаций и интерес к созданию структур, которые можно было бы использовать в качестве SERS-активных (англ. Surface-enhanced Raman scattering) подложек для детектирования различных веществ в малых количествах. Для исследования таких структур применяется оптический неинвазивный метод гигантского комбинационного рассеяния (ГКР), поскольку он характеризуется высокой чувствительностью и быстротой получения отклика. Для регистрации сигнала от таких подложек, содержащих частицы благородных металлов, используется метод ГКР, который заключается в усилении интенсивности оптического сигнала комбинационного рассеяния света (КРС) от молекул исследуемого анализата. При этом усиление от таких SERS-активных подложек зависит от формы, размера и взаимного расположения частиц металла на поверхности структуры [1]. В своей работе мы предлагаем в качестве подложки использовать кремний, который позволяет создавать на своей поверхности структуры различных топологий при помощи современных технологий, а в качестве металла - серебро. В настоящей работе были исследованы два типа структур: (1) c-Si подложка с внедренными наночастицами (НЧ) Ag (пирамидальные НЧ Ag, внедренные в объем c-Si пластины, были получены в результате высокотемпературной обработки предварительно осаженных НЧ на поверхность кремния из раствора нитрата серебра) и (2) кремниевые нанонити (КНН), декорированные НЧ Ag методом атомно-слоевого осаждения (КНН, обладающие большой удельной площадью поверхности, были получены методом металл-стимулированного травления кремния с последующим нанесением на них металлических наночастиц методом атомно-слоевого осаждения). Численные расчеты показали наличие локализованных плазмонных резонансов (ЛПР) от Ag/c-Si композитного слоя не только в видимой области спектра, но и в ближнем ИК-диапазоне. Данные типы структур представляют собой новые композитные структуры с настраиваемым положением ЛПР. Моделирование электромагнитных полей НЧ Ag на подложке и КНН показало максимальный коэффициент усиления комбинационного рассеяния  $\sim 10^6$  и  $10^{10}$ , соответственно. Полученные структуры были исследованы методами растровой электронной микроскопии, многоугловой спектральной эллипсометрией, УФ-ИК спектроскопией. Рассмотренные структуры перспективны для использования в качестве SERS-активных подложек для усиления комбинационного рассеяния и использования в качестве сенсоров для обнаружения различных веществ в предельно малых количествах.

1. S.A. Maier, Plasmonics: Fundamentals and Applications, *Springer New York*, 2007.

Д.Н. Бондаренко (асп., 2 год, СПбГУ),  
В.О. Гридчин (асп., 4 год, СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова),  
Р.Р. Резник (к.ф.-м.н., рук. лаб., СПбГУ),  
Г.Э. Цырлин (д.ф.-м.н., зав. лаб., СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова)

## ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ GaN/InGaN

Разработка микросветоизлучающих диодов на основе тройных соединений InGaN является актуальным направлением исследований в настоящее время. Такие полупроводники обладают, например, возможностью гибкой настройки длины волны излучения от ближнего УФ до ближнего ИК путем изменения химического состава [1]. Однако синтез однородных слоев InGaN в широком химическом диапазоне затруднен из-за значительного рассогласования параметров решеток InN и GaN [2], а также из-за отсутствия согласованных по решетке подложек по сравнению с InGaN. Одним из способов решения описанных выше проблем является синтез нитевидных нанокристаллов (ННК) [3], позволяющих синтезировать твердый раствор InGaN с любым требуемым химическим составом [4], используя различные подложки. В работе исследуются структурные и оптоэлектронные свойства ННК GaN с объемной активной вставкой структуры «core-shell» InGaN, выращенных на подложках n-Si (111) методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией (РА-MBE). Свойства образцов были охарактеризованы с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ), спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и измерением вольт-амперных характеристик (ВАХ) при комнатной температуре.

Результаты РЭМ показали, что морфология данных образцов представляет собой плотноупакованные ННК со средней длиной 1.5 мкм, диаметром у основания около 90 нм и у вершины - около 350 нм. Образцы демонстрируют спектр ФЛ в видимой области (450 – 650 нм) с максимумом около 536 нм. Результаты ПЭМ показывают, что объемная вставка InGaN имеет структуру «core-shell» с латеральными и вертикальными размерами около 230 нм и 200 нм, соответственно. Согласно результатам ФЛ и ПЭМ, содержание In в ННК составляет около 30%. Для измерений ВАХ разработаны прототипы светоизлучающих структур на основе ННК, покрытые полимером SU8. ВАХ образцов показали типичные диодные зависимости с напряжением открытия около 6В. Представленные результаты могут быть перспективны для создания зеленых светодиодов, выращенных на кремниевых подложках.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках исследовательского гранта № 92591131.

1. H.Q.T. Vui et al., *Micromachines*, **10** (8), 492 (2019).
2. I.H. Ho et al., *Appl. Phys. Lett.*, **69**(18), 2701 (1996).
3. R. Yan et al., *Nature photonics*, **3**(10), 569 (2009).
4. E. Roche et al., *Nanotechnology*, **29**, 465602 (2018).

В.О. Гридчин (м.н.с., СПбГУ),  
Р.Р. Резник (к.ф.-м.н., рук. лаб., СПбГУ),  
Г.Э. Цырлин (д.ф.-м.н., зав. лаб., СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова)

## НИТЕВИДНЫЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ InGaN СО СТРУКТУРОЙ «ЯДРО–ОБОЛОЧКА» НА КРЕМНИИ

Тройные соединения на основе InGaN представляют интерес для создания микросветодиодов и возобновляемых источников энергии благодаря возможности варьировать ширину запрещенной зоны от 0.7 до 3.43 эВ. Однако, в настоящее время выращивание однородных эпитаксиальных слоёв InGaN с высоким содержанием In (более 30% по In) является чрезвычайно сложной задачей из-за существенной разницы в межатомных расстояниях InN и GaN. Кроме того, выращивание эпитаксиальных слоёв InGaN осложняется отсутствием подложек с согласованными параметрами решетки и температурными коэффициентами расширения относительно растущего материала. Нитевидные нанокристаллы (ННК) привлекают особое внимание как один из подходов для преодоления указанных трудностей [1]. В представленной работе исследуется влияние ростовой температуры на формирование и физические свойства ННК InGaN.

ННК InGaN выращивались на подложках Si(111) методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота. Ростовые эксперименты проводились при температурах от 650 до 670 °С в азот-обогащенных условиях и при одинаковом соотношении потоков металлов III группы из молекулярных источников [2]. Было получено, что при температуре порядка 660-670 °С формируются нанокolonчатые слои. При этом In не встраивается в растущую структуру, что объясняется преобладанием скорости термического разложения InN и десорбцией In с ростовой поверхности над скоростью образования InGaN. При температурах порядка 650-660 °С морфология образцов существенно изменяется: образуются частично сросшиеся ННК InGaN. Понижая температуру роста до 650 °С, образуются пространственно-разделенные ННК. При этом разделенные ННК состоят из спонтанносформированной структуры типа «ядро-оболочка» с содержанием In в ядре ННК ~30-40%, а в оболочке – не более 4%, что было подтверждено результатами измерений методом просвечивающей электронной микроскопии. Все образцы демонстрируют фотолюминесценцию при комнатной температуре в диапазоне от 380 до 650 нм в зависимости от содержания In.

Полученные результаты могут быть интересны как для фундаментальных работ, связанных с исследованиями процессов роста ННК InGaN, так и для создания RGB микросветодиодных устройств на кремнии.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках исследовательского гранта № 92591131.

1. Kuykendall T. et al., *Nature materials*, **6**(12), 951 (2007).
2. Gridchin V. O. et al., *Nanotechnology*, **32**(33), 335604 (2021).

А. Кузнецов (асп., 1 год, Алфёровский университет, каф. ФитН),  
П. Рой (асп., 2 год, каф. Физики),  
Р.Р. Резник (к.ф.-м.н., рук. лаб., СПбГУ),  
В.М. Кондратьев (асп., 3 год, Алфёровский университет, каф. ФитН),  
В.В. Федоров (н.с., Алфёровский университет, лаб. ВИЭ),  
А.А. Воробьев (асп., 4 год, Алфёровский университет, лаб. ВИЭ),  
А.Д. Большаков (в.н.с., Алфёровский университет, лаб. ОГСиОМ)

## СУБМИКРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ СПЕКТРАЛЬНО МОДУЛИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ $GaP/GaP_xAs_{1-x}$

Объектом данного исследования являются гетероструктурированные нитевидные нанокристаллы (ННК)  $GaP/GaP_xAs_{1-x}$ , выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Выбор материала ННК - GaP обоснован низким поглощением, высоким показателем преломления в видимом диапазоне [1]. При этом внутри ННК были сформированы 7 вставок  $GaP_xAs_{1-x}$  толщиной 50 нм, а на конце была сформирована наночастица Ga. То есть появляется возможность создавать активные оптические элементы – источники излучения с высокой направленностью вывода и его спектральной модуляции. С помощью микроспектроскопии фотолюминесценции (ФЛ) и численного расчета был проанализирован оптический отклик от одиночных ННК. Благодаря высокому оптическому контрасту ННК и стеклянной подложки сигнал фотолюминесценции от вставок проникает в ННК, который выполняет роль резонатора Фабри-Перо [2]. Вблизи каждой наблюдается излучение, распространяющееся перпендикулярно боковой поверхности. Моделирование ФЛ демонстрирует уменьшение направленности излучения с увеличением длины волны. В результате была продемонстрирована спектральная модуляция отклика. ФЛ от вставок имеет анизотропный характер – отклик наблюдается как в их окрестности, так и с концов. Благодаря резонаторной геометрии, излучение, выходящее с концов ННК, подвержено спектральной модуляции. НЧ Ga в данной системе с одной стороны выступает как отражатель, а с другой как оптическая антенна, пропускающая в ННК излучение, поляризованное вдоль оси ННК более эффективно.

Синтез образцов был выполнен при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках исследовательского гранта № 92591131. Авторы также выражают благодарность Российскому научному фонду (проект № 20–72–10192) за поддержку исследований физических свойств экспериментальных образцов, Министерству науки и высшего образования РФ (грант № FSRM–2020–00011) за поддержку теоретической части работы и Программе стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Соглашение 075-02-2021-1316 30.09.2021) за поддержку проведения спектроскопии.

1. D. E. Aspnes, A. A. Studna, Phys. Rev. B Condens. Matter., **27**, 985 (1983).
2. P. Roy, A. D. Bolshakov, J. Phys. D Appl. Phys., **53**, 295101 (2020).

Е.В. Кулебякина (м.н.с., ФИАН),  
М.Л. Скориков (н.с., ФИАН),  
Е.В. Колобкова (д.х.н., проф., Университет ИТМО, СПбГТУ),  
М.С. Кузнецова (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ),  
В.В. Белых (к.ф.-м.н., с.н.с., ФИАН)

## НЕЭКСПОНЕНЦИАЛЬНАЯ ДИНАМИКА ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В НАНОКРИСТАЛЛАХ ПЕРОВСКИТОВ В МАТРИЦЕ ФТОРФОСФАТНОГО СТЕКЛА

В настоящее время большое внимание уделяется разработке высокоэффективных солнечных элементов, светоизлучателей, и приборов на их основе в связи с постоянно растущим спросом на более экологически чистую энергию по приемлемой цене. Металлогалогенидные перовскиты (МГП) – это, новый класс полупроводниковых материалов, обладающих выдающимися оптоэлектронными свойствами. МГП вызывают повышенный интерес у исследователей благодаря прямому межзонному оптическому переходу, высокой поглощающей способности (порядка  $10^4 \text{ см}^{-1}$ ), относительно высокой подвижности носителей заряда (более  $10 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ) по сравнению с органическими полупроводниками, большой длине диффузии неосновных носителей (1 мкм и более), низкой плотности ловушек (менее  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) и относительно простым и недорогим методом производства. Все вышеперечисленные свойства делают перовскиты отличными полупроводниками для изготовления не только солнечных элементов, но и лазеров, светодиодов и фотодетекторов.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование низкотемпературной экситонной динамики фотолюминесценции (ФЛ) в нанокристаллах перовскитов двух составов:  $\text{CsPb}(\text{Cl}_{0.5}\text{Br}_{0.5})_3$  и  $\text{CsPbBr}_3$  в матрице фторфосфатного стекла [1]. Образцы помещались в гелиевый оптический криостат с температурным контролем. Измерения проводились в широком диапазоне температур от 6 до 270 К. Возбуждение образца осуществлялось пикосекундными импульсами титан-сапфирового лазера. Динамика ФЛ экситонов проявляет сильно неэкспоненциальный характер и характеризуется двумя компонентами: быстрой и медленной. С ростом температуры вклад медленной компоненты увеличивается, а время ее затухания уменьшается. Наблюдаемые особенности в динамике ФЛ могут объясняться тем, что основное состояние экситона является «темным», т.е. безызлучательным, а рекомбинация происходит за счет термически активируемого перехода в «светлое» возбужденное состояние. Неэкспоненциальный характер медленной компоненты затухания ФЛ связан с неоднородным распределением энергетического расщепления между «темным» и «светлым» состояниями.

Работа поддержана проектом Минобрнауки (соглашение №075-15-2021-598 в ФИАН).

1. E. V. Kolobkova, M. S. Kuznetsova, N. V. Nikonov, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, 563, 120811.

Д.П. Марков (асп., 1 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
С.И. Павлов (к.ф.-м.н., н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Н.А. Феоктистов (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
А.В. Нащёкин (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
А.Б. Певцов (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ВЛИЯНИЕ МАССИВА ЗОЛОТЫХ НАНОДИСКОВ, УПОРЯДОЧЕННЫХ В ПРЯМОУГОЛЬНУЮ РЕШЕТКУ, НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЯ $\alpha$ -Si<sub>0.65</sub>:C<sub>0.35</sub>:H

Исследование и разработка планарных светоизлучающих устройств на основе кремния, получаемых методом газофазного осаждения, привлекают особое внимание благодаря их возможной применимости при создании кремниевых оптоэлектронных интегральных схем. Карбид кремния является перспективным материалом для оптоэлектронных приборов, так как имеет большой показатель преломления и малые потери света в видимом диапазоне длин волн. В пленках  $\alpha$ -Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H варьированием содержания углерода можно плавно изменять ширину запрещенной зоны в широком диапазоне от 1.8 до 3.6 эВ и, как следствие, варьировать спектральное положение максимума фотолюминесценции (ФЛ) от 2 до 3 эВ [1], при этом показатель преломления изменяется в диапазоне от 2 до 3 [2].

Создание на поверхности слоя  $\alpha$ -Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H упорядоченного массива металлических элементов приводит к возникновению оптических резонансов, кардинально влияющих на оптических отклик структуры. В частности, изменяется спектр и угловое распределение ФЛ светоизлучающего материала. Особый интерес такие наноструктуры представляют благодаря тому, что в них может возникать особый тип резонансных явлений – связанные состояния в континууме (ССК), а использование металлических элементов позволяет привести в систему эффекты локализованного плазмонного резонанса. Исследование оптических структур, сочетающих эффекты, характерные для ЛПП (сильная локализация электромагнитного поля), с особенностями ССК (крайне высокая добротность), позволит повысить эффективность существующих и потенциальных устройств оптоэлектроники [3].

В настоящей работе исследовались структуры, представляющие из себя двумерно-упорядоченный массив золотых нанодисков на тонком слое  $\alpha$ -Si<sub>0.65</sub>:C<sub>0.35</sub>:H. Методом спектральной Фурье-микроскопии были получены угловые зависимости спектров отражения и ФЛ для s- и p-поляризации. Особенности в спектрах, возникающие из-за возбуждения квазиволноводных резонансов, описаны в рамках приближения пустой решётки. При этом была продемонстрирована возможность управлять спектральным положением резонансов путём изменения периодов решётки в различных направлениях. Кроме того, в оптическом отклике наблюдались симметрично-защищённые ССК и ССК Фридриха-Винтгена.

1. Akaoglu B. et. al. *Optical Materials* —30. 1257-1267 (2008).
2. Ma T. et.al. *J. Appl. Phys.*— 88 6408 (2000).
3. Hsu C. et al. *Nat Rev Mater* — 1,16048 (2016).

И.А. Мельниченко (асп., 1 год, НИУ ВШЭ, лаб. квантовой оптоэлектроники),  
Н.В. Крыжановская (д.ф.-м.н., НИУ ВШЭ, лаб. квантовой оптоэлектроники)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ $\text{InP/InAsP/InP}$ НАНОВКЛЮЧЕНИЙ, МОНОЛИТНО ИНТЕГРИРОВАННЫХ В Si, В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

Создание эффективных  $A^{\text{III}}-B^{\text{V}}$  излучателей, монолитно интегрированных на кремнии и пригодных для использования в оптоэлектронных приборах, до сих пор является сложной и не решенной задачей [1]. Ожидается, что такая интеграция  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  на кремнии позволит расширить частотный диапазон современной электроники, используя хорошо развитые масштабируемые технологии обработки кремния [2]. Однако интеграция светоизлучающих устройств на основе  $A^{\text{III}}-B^{\text{V}}$  с платформой Si затруднена из-за несоответствия постоянных кристаллических решеток большинства материалов  $A^{\text{III}}-B^{\text{V}}$  и кремния, а также разницы в коэффициентах теплового расширения, которая приводит к высокой плотности дефектов в получаемых структурах. Такие дефекты представляют собой центры безызлучательной рекомбинации и негативно влияют на оптические свойства интегрированных материалов. В данной работе выполнено исследование фотолуминесценции (ФЛ) в диапазоне температур от 77 до 300 К одиночных нановключений  $\text{InP/InAsP/InP}$ , монолитно интегрированных в подложку Si(100). Нановключения  $\text{InP/InAsP/InP}$ , размером около 200 нм были выращены в предварительно протравленных ямках на поверхности подложки Si(100) с помощью оригинального метода, который сочетает в себе подходы капельной эпитаксии и селективного роста. Такой подход обеспечивает рост упорядоченных массивов нановключений  $\text{InP/InAsP/InP}$  на подложке Si. Величина расстояния между нановключениями в массиве 800 нм позволила нам исследовать ФЛ отдельно стоящих нановключений с помощью конфокального микроскопа. При комнатной температуре в образцах наблюдается линия ФЛ  $\text{InP}$  (~915 нм), и линия, соответствующая твердому раствору  $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ . В зависимости от параметров роста образцов и, соответственно, состава по мышьяку в слое  $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ , спектральное положение линии  $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$  варьировалось в диапазоне от 1200 нм до 1550 нм. Экспериментальные зависимости длины волны от температуры демонстрируют закономерный сдвиг  $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$  линии. Показано влияние эффекта переконденсации на свойства образцов. Подавление эффекта переконденсации при увеличении количества материала путем 5-ти кратного повторения этапов формирования  $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}/\text{InP}$  слоев позволило сформировать упорядоченный массив  $\text{InP/InAsP/InP}$  эмиттеров субмикронного размера на кремниевых подложках.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-22-20057, <https://rscf.ru/project/22-22-20057/> и гранта Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением от 15 апреля 2022 г. № 66/2022.

1. Luxmoore I J et al., *Sci. Rep.*, **3**, 1 (2013).
2. Bettotti P, *Adv. Opt.*, **2014**, 1 (2014).

М.А. Мкртчян (асп., 4 год, Российско-Армянский Университет, Ереван),  
 А.А. Саркисян (Российско-Армянский Университет, Ереван),  
 Э.М. Казарян, Д.Б. Айрапетян (Российско-Армянский Университет, Ереван),  
 Д.А. Фирсов, М.Я. Винниченко (СПбПУ, ВИФШ)

## ВНУТРИЗОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ ТЯЖЕЛЫХ ДЫРОК В ЛИНЗОБРАЗНОЙ КВАНТОВОЙ ТОЧКЕ Ge/Si ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Изучено поведение тяжелых дырок в сильносплюснутой линзообразной квантовой точке Ge/Si. В рамках адиабатического приближения описано нелинейное оптическое поглощение в двояковыпуклой асимметричной линзообразной квантовой точке (рис. 1).

Расчеты реализованы в приближении эффективной массы при наличии аксиального магнитного поля. Энергетический спектр и волновая функция частицы вычислены аналитически, с учетом возможности представления изучаемой системы в качестве наложения двух подсистем: медленной, в плоскости сечения квантовой линзы, и быстрой, вдоль аксиального направления перпендикулярной сечению квантовой линзы.

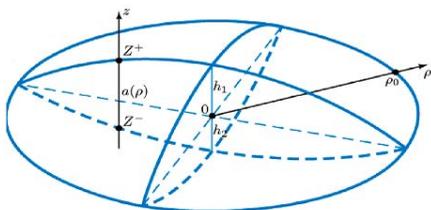


Рис. 1. Двояковыпуклая асимметричная линзообразная квантовая точка

Ранее в работе [1] было изучено межзонное оптическое поглощение в двояковыпуклой асимметричной квантовой линзе. Были определены пороговые частоты поглощения, также найдены правила отбора. В данной работе нами рассмотрены нелинейные оптические переходы в зоне тяжелых дырок. Были изучены линейное и нелинейное оптическое поглощения, а также генерации второй и третьей гармоник. Так были рассмотрены зависимости коэффициентов линейного и нелинейного поглощений от энергии падающего света с учетом влияния температуры и внешнего аксиального магнитного поля. Помимо этого, также были изучены влияния температуры и напряженности магнитного поля на восприимчивости генерации второй и третьей гармоник. Также изучены зависимости вышеперечисленных оптических эффектов от геометрических размеров двояковыпуклой асимметричной линзообразной квантовой точки (радиусов сечения и высот (см. рис. 1)).

1. M.A. Mkrтчyan, D.B. Hayrapetyan, E.M. Kazaryan, H.A. Sarkisyan, M.Y. Vinnichenko, V.A. Shalygin, D.A. Firsov, L.S. Petrosyan, *Nanomaterials*, **12**(1), 60 (2021).

И.М. Моисеенко (к.ф.-м.н., СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),  
В.В. Попов (д.ф.-м.н., СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),  
Д.В. Фатеев (к.ф.-м.н., СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

## ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ГРАФЕНЕ НА ДИСПЕРСИЮ И УСИЛЕНИЕ ГРАФЕНОВЫХ ПЛАЗМОНОВ

В настоящее время активно исследуются структуры на основе графена, в том числе из-за его плазмонных свойств, для усиления и детектирования терагерцевого (ТГц) излучения [1, 2]. Усиление ТГц плазмонов в графене с постоянным током было исследовано теоретически [3, 4], а также продемонстрировано экспериментально [5]. Дисперсия плазмонных мод в графене с постоянным током, сонаправленным с волновым вектором плазмонов, исследована в работе [6], где также показано ТГц плазмонное усиление, связанное с эффектом Черенкова.

В настоящей работе исследована дисперсия и усиление ТГц плазмонов в графене с постоянным током в зависимости от его направления относительно направления распространения плазмонов. Исследуемая структура состоит из слоя графена, лежащего между двух полубесконечных диэлектриков. Графен описывался проводимостью, полученной в тензорном виде в рамках гидродинамического приближения.

В данной работе показано, что при малых углах ( $\alpha < 10^\circ$ ) между скоростью дрейфа носителей заряда в графене и волновым вектором плазмонов, их дисперсия определяется, в основном, диагональным элементом тензора проводимости (ДЭТП) графена, входящим в дисперсионное уравнение для продольных поверхностных ТМ волн, а недиагональные элементы вносят незначительный вклад. При превышении некоторой пороговой скорости дрейфа носителей заряда в графене, действительная часть ДЭТП графена может становиться отрицательной на ТГц частотах. Это приводит к усилению плазмонов. В случае  $\alpha > 10^\circ$  вклад недиагональных элементов тензора проводимости становится весомым и приводит к усилению плазмонов даже на частотах, где действительная часть ДЭТП графена положительна.

Таким образом, исследована дисперсия и усиление ТГц плазмонов в графене в зависимости от направления постоянного тока относительно направления волнового вектора плазмонов. Показано, что недиагональные элементы тензора проводимости графена могут вносить существенный вклад в дисперсию и усиление ТГц плазмонов в графене.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-79-00262.

1. F.H. L. Koppens et al., *Nature Nanotech* **9**, 780 (2014).
2. V. Ryzhii, T. Otsuji T and M. Shur, *Appl. Phys. Lett.*, **116** 140501 (2020).
3. I.M. Moiseenko, V. V. Popov, and D.V. Fateev, *Phys. Rev. B*, **103**, 195430 (2021).
4. D. Svintsov, *Phys. Rev. B*, **100**, 195428 (2019).
5. S. Boubanga-Tombet et al., *Phys. Rev. X*, **10**, 031004 (2020).
6. О.В. Полищук, Д.В. Фатеев, В.В. Попов, ФТП, **55** (10), (2021).

А.М. Ромшин (асп., 3 год, ИОФ РАН),  
А.М. Грициенко (асп., 3 год, ФИАН, МФТИ),  
А.С. Ильин (к.ф.-м.н., м.н.с., ИРЭ РАН, МФТИ),  
Р.Х. Баграмов (к.ф.-м.н., с.н.с., ИФВД),  
В.П. Филоненко (к.т.н., в.н.с., ИФВД),  
А.Г. Витухновский (д.ф.-м.н., в.г.н.с., ФИАН, МФТИ),  
И.И. Власов (к.ф.-м.н., зав. лаб., ИОФ РАН)

## УСИЛЕНИЕ ОДНОФОТОННОЙ ЭМИССИИ ЦЕНТРОВ «КРЕМНИЙ–ВАКАНСИЯ» В НАНОАЛМАЗАХ НА ЗОЛОТОЙ ПЛЕНКЕ

В последние десятилетия наблюдается активное развитие оптических квантовых сетей в направлении обработки и передачи информации [1]. В их основе лежат источники одиночных фотонов (ИОФ), удовлетворяющие требованиям высокой спектральной чистоты, яркости и направленности излучения. Одним из наиболее перспективных твердотельных ИОФ является алмазный центр окраски «кремний-вакансия» (SiV), который обладает интенсивной и узкой бесфононной линией на 738 нм, а также высокой спектральной и временной стабильностью [2]. Скорость спонтанной эмиссии ИОФ может быть существенно повышена за счет увеличения локальной плотности оптических состояний, что достигается обычно при взаимодействии источника с диэлектрическими микрорезонаторами и плазмонными наноструктурами.

В настоящей работе исследовалась однофотонная эмиссия SiV-центров в наноалмазах, расположенных на золотой пленке. Алмазные наночастицы, синтезированные НРНТ-методом (high pressure high temperature), первоначально изучались на покровном стекле, а затем при помощи стеклянного нанокапилляра перемещались на золотую пленку. Для каждой из частиц при помощи конфокального микроскопа записывался спектр, измерялись кривые насыщения и кинетика флуоресценции. Анализ кривых насыщения обнаруживает увеличение числа регистрируемых фотоотсчетов в диапазоне от 3 до 10 раз для разных частиц. Широкий разброс, очевидно, связан с ориентацией дипольного момента SiV-центров относительно нормали к поверхности золотой пленки, а также размером алмазной наночастицы. При этом измеренное время жизни флуоресценции сокращается на 30-40% для большинства эмиттеров. Полученные результаты объясняются взаимодействием одиночных SiV-центров в наноалмазах с плазмонными квазичастицами.

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда № 22-19-00324.

1. Н.-К. Lo et al., *Nat. Photonics*, **8**, 595–604, (2014).
2. I.I. Vlasov et al., *Advanced Materials*, **21**(7), 808-812 (2009).

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПЕРОВСКИТНЫХ  
НАНОКРИСТАЛЛОВ ВО ФТОРОФОСФАТНОЙ МАТРИЦЕ

В данной работе исследовалась кинетика фотолюминесценции нанокристаллов (НК)  $\text{CsPbX}_3$ , где  $X=\text{Br, I}$ , в стеклянной фторфосфатной матрице [1] в зависимости от температуры.

Для возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) использовались импульсы длительностью 1 мкс. Примеры результатов измерений представлены на рис. 1. На рис. 1(a) показаны спектры ФЛ НК  $\text{CsPbBr}_3$ , измеренные при различных температурах. На рис. 1(b) представлена кинетика затухания ФЛ в области максимума самого интенсивного пика при различных температурах образца. На вставке дополнительно показано время затухания ФЛ в зависимости от температуры. Видно, что характерное время жизни ФЛ при температуре жидкого гелия составляет микросекунды. Это можно объяснить тем, что электрон и дырка пространственно разделены. Предполагается, что дырка локализована внутри НК, а электрон на поверхности НК [2]. С увеличением температуры электрон переходит на свободное состояние, где быстро рекомбинирует с дыркой.

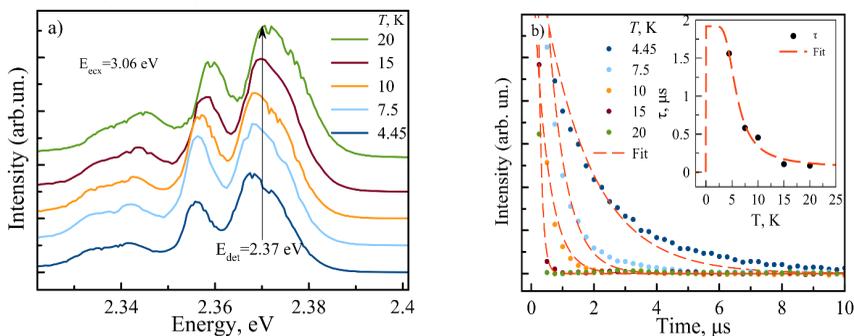


Рис. 1. (а) ФЛ НК  $\text{CsPbBr}_3$  при различных температурах образца. (б) Кинетика ФЛ НК  $\text{CsPbBr}_3$ . Пунктирными линиями показана аппроксимация экспериментальных данных (синие точки) экспоненциальной функцией. На вставке показано время затухания ФЛ как функция температуры. Штриховая кривая - аппроксимация формулой Аррениуса

Авторы благодарят Санкт-Петербургский Государственный Университет за финансовую поддержку в рамках гранта № 91182694.

1. Кузнецова М.С., Батаев М.Н., Чукаев М.А., Ростовцев Н.Д., Вербин С.Ю., Игнатьев И.В., Давыдов В.Ю., Смирнов А.Н., Елисеев И.А., Колобкова Е. В., Оптика и спектроскопия, принято в печать (2022).

2. X. Ma, F. Pan, H. Li, P. Chen, C. Ma, L. Zhang, H. Niu, Y. Zhu, S. Xu, and H. Ye, J. Phys. Chem. Lett., **10**, 5989 (2019). DOI:10.1021/acs.jpcclett.9b02289.

СОЗДАНИЕ АКСИАЛЬНЫХ И РАДИАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ  
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ МАССИВОВ САМОИНДУЦИРОВАННЫХ НИТЕВИДНЫХ  
НАНОКРИСТАЛЛОВ АРСЕНИДА ИНДИЯ (InAs)

InAs является полупроводником с узкой шириной запрещенной зоны (0,35 эВ) и отличается высокой подвижностью носителей заряда ( $10,000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ), большой величиной насыщения дрейфовой скорости носителей заряда и времени жизни неосновных носителей заряда, именно поэтому он нашёл широкое применение в СВЧ-транзисторах [1] и фотодетекторах коротковолнового ИК-диапазона (1,2-3,6 мкм) [2]. Объектом данного исследования были выбраны гетероструктуры с радиальной и аксиальной геометрией InP/InAs и InAs/InAsP/InAs, соответственно, созданные на основе эпитаксиальных массивов InAs нитевидных нанокристаллов (ННК), формирующихся по самоиндуцированному механизму, что благоприятно сказывается на электрофизических свойствах данных соединений. Формирование ННК по самоиндуцированному механизму исключает встраивание инородного материала (например Au) в структуру ННК, однако накладывает ограничения на диапазон возможных ростовых параметров и, как следствие, морфологию формируемых массивов ННК.

Целью данной работы было показать возможность создания аксиальных и радиальных гетероструктур на основе эпитаксиального массива самоиндуцированных InAs ННК, формирующихся в процессе молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках Si (111) р-типа с разориентацией  $4^\circ$  в плоскости [11-2]. Морфология массивов ННК исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии. Кристаллическая структура и химический состав полученных структур исследовались с помощью методов просвечивающей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Была продемонстрирована возможность создания наногетероструктур с радиальной (InP/InAs) и аксиальной (InAsP/InAs) геометрией на основе эпитаксиальных массивов самоиндуцированных InAs ННК. Помимо этого в данной работе была продемонстрирована возможность селективной эпитаксии InAs ННК на паттернированной подложке Si(111), подготовленной методом оптической литографии через монослой самоупорядоченных микросферических линз.

Работа выполнена при поддержке РФФ № 22-19-00494.

1. H. Yonezu et. al., *J. Cryst. Growth* **310** 4757–62 (2008).
2. I. Lucci et. al., *Phys. Rev. Mater.* **2** 060401 (2018).

## ПОЛЯРИМЕТРИЯ ВОЛНОВОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С «КВАНТОВЫМИ ЯМА-ТОЧКАМИ»

На сегодняшний день большой интерес представляет исследование квантоворазмерных гетероструктур, занимающих промежуточное положение между квантовыми ямами и квантовыми точками [1]. Одной из таких структур являются квантовые яма-точки (КЯТ), представляющие собой InGaAs/GaAs квантовую яму (КЯ), модулированную по толщине и составу, или сверхплотный массив мелких InGaAs квантовых точек (КТ). КЯТ лишены некоторых недостатков как КЯ, так и КТ, но сохраняют их ключевые особенности. К примеру, КЯТ обладают значительно большим усилением (поглощением) по сравнению с КТ InAs/GaAs, но позволяют выращивать более 15 складированных слоев бездислокационно, что недоступно для КЯ InGaAs/GaAs [2].

В работе [3] было проведено поляризационно-разрешённое исследование поглощения света в КЯТ методом анализа фототока. Было обнаружено, что с увеличением длины волновода поляризационная селективность поглощения на основном состоянии КЯТ сильно ослабевает. Было предположено, что такое поведение вероятнее всего может быть объяснено деполяризацией излучения в волноводе.

В данной работе методом поляриметрии исследовано влияние волновода и активной области лазерных гетероструктур на проходящее излучение. Экспериментально исследовалась поляризация проходящего через волновод излучения, вводимого в торец лазерного чипа с различными углами линейной поляризации (ЛП). Лазерный чип при этом работал в режиме фотодиода. Установлено, что волноводные структуры с КЯТ практически не оказывают влияния на чистую ТЕ или ТМ поляризации света. Однако, при вводе излучения с промежуточной ЛП, выходящее излучение представляет собой смесь эллиптически поляризованного и неполяризованного света. Измерение параметров Стокса выходящего излучения позволило разделить эти составляющие. Исследования чипов разной длины, с различным количеством слоев активной области и на различных длинах волн позволили оценить влияние на проходящее излучение волновода и активной области. В частности, обнаружено, что деполяризация излучения максимальна, когда угол поляризации входящего излучения составляет 45 градусов; деполяризация спадает с увеличением числа слоев КЯТ; а без поглощения активной области волновод ведет себя как волновая пластинка. Полученные результаты важны для понимания поляризационных эффектов взаимодействия излучения с волноводом и активной областью в волноводных детекторах и торцевых лазерах, что может оказаться полезным для проектирования этих устройств на основе КЯТ.

1. M.V. Maximov et al., Appl. Sci. 10, 1038 (2020).
2. S.A. Mintairov et al., Electron. Lett. 51, 1602 (2015).
3. A.A. Kharchenko, et al., " Nano-Structures & Nano-Objects 25 100628. (2021).

Э.О. Чиглинец (асп., 1 год, МФТИ, каф. РКЦ),  
М.И. Пауков (студ., 6 курс, МФТИ),  
М.Г. Бурданова (к.ф.-м.н., МФТИ, ИФТГ РАН),  
П. Мишра (к.ф.-м.н., МФТИ),  
К.А. Брехов (к.ф.-м.н., РГУ МИРЭА, РКЦ),  
А.А. Арсенин (к.ф.-м.н., МФТИ),  
В.С. Волков (к.ф.-м.н., МФТИ),  
А.И. Чернов (к.ф.-м.н., МФТИ)

## НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕРАГЕРЦОВАЯ ГЕНЕРАЦИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Углеродные нанотрубки (УНТ) являются материалом с замечательными физическими свойствами. Популярность УНТ связана с возможностью изменения ширины запрещенной зоны совместно с квази-одномерным транспортом зарядов, высокой проводимостью и короткими временами жизни носителей зарядов в сравнении с двумерными и объемными аналогами. С недавнего времени терагерцовая спектроскопия с временным разрешением является эффективным методом изучения свободных носителей зарядов в УНТ. Было показано, что терагерцовая проводимость УНТ связана с делокализованными носителями (описываемыми моделью Друде), а также аксиальным движением плазмонов [1]. Когда УНТ образуют расширенную сеть, ожидается заметный вклад как Друде компоненты, так и вклад плазмонов с чувствительным к длине УНТ пиком.

В данной работе был изучен транспорт свободных носителей заряда различных УНТ в терагерцовых полях различной мощности. Независимо от длины УНТ и их диаметра было обнаружено изменение поведения делокализованных носителей заряда при увеличении мощности терагерцового излучения (проявление Друде), в то время как плазмонный вклад оставался неизменным для всех измеренных образцов. Такое поведение может свидетельствовать о генерации дополнительных свободных носителей заряда в мощных терагерцовых полях. Чтобы изучить влияние междолинного рассеяния, было оценено отношение концентрации носителей заряда к их эффективной массе ( $N/m^*$ ) в зависимости от напряженности поля (от 15 до 60 кВ/см). Изменение энергетических уровней под действием сильного электрического поля, ведущее к увеличению числа свободных носителей, может быть качественным механизмом, объясняющий изменение проводимости в УНТ. Также было исследовано поведение свободных носителей зарядов в УНТ различного типа. При максимальной амплитуде терагерцового поля отношение  $N/m^*$  увеличивается в 1.5 раза для длинных нанотрубок с большим диаметром, и в 6 раз для коротких с меньшим диаметром при напряженности электрического поля около 60 кВ/см.

Высокая подвижность электронов и увеличение Друде проводимости в мощных электрических полях указывают на перспективность использования УНТ для приложений в нанoeлектронике терагерцового диапазона.

1. Qi Zhang et al., Nano Letters, 13 (12), 5991-5996 (2013).

Т.М. Шугабаев (асп., 1 год, СПбГУ, лаб. новых п/п материалов для квант. инф. и телеком.),  
В.О. Гридчин (м.н.с., СПбГУ, лаб. новых п/п материалов для квант. инф. и телеком.),  
К.П. Котляр (м.н.с., СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова),  
И.А. Мельниченко (асп., НИУ ВШЭ Санкт-Петербург),  
Н.В. Крыжановская (д.ф.-м.н., зав. лаб. квантовой оптоэлектроники  
НИУ ВШЭ Санкт-Петербург),  
Г.Э. Цырлин (д.ф.-м.н., зав. лаб. эпитаксиальных нанотехнологий  
СПб АУ РАН им. Ж.И. Алферова)

## ГИБРИДНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ InGaN И ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

Нитевидные нанокристаллы (ННК) InGaN являются многообещающими наноструктурами для создания RGB и белых микросветодиодов [1]. Основным преимуществом данных ННК является возможность их роста с любым химическим составом, что позволяет получать светоизлучающие ННК во всем видимом диапазоне [2]. Однако внутренняя квантовая эффективность твердых растворов InGaN даже в модификации ННК не превышает 15 % в красной области спектра [3]. В тоже время, явление локализованного плазмонного резонанса (ЛПР) в металлических наночастицах (НЧ) в сочетании с полупроводниковыми материалами может значительно увеличить люминесцентные свойства последних [4].

Данная работа посвящена созданию гибридных наноструктур на основе ННК InGaN и Ag НЧ и исследованию их оптических свойств. Массив ННК InGaN был выращен на подложке Si технологией молекулярно-пучковой эпитаксии. Максимум ФЛ InGaN ННК соответствовал красной области спектра (620-640 нм). НЧ серебра с оболочкой оксида кремния были синтезированы методом коллоидной химии. Длина волны ЛПР НЧ была близка к длине волны лазера, возбуждающего ФЛ (532 нм). Для исследования оптических свойств ННК были перенесены на стекло, покрытое слоем оксида индия-олова. Измерения спектров микро-ФЛ от одиночных ННК показали, что декорирование их поверхности наночастицами приводит к усилению ФЛ в 2-3 раза в сравнении с исходными структурами.

Таким образом, впервые показано, что повышение эффективности излучения ННК InGaN может быть достигнуто путем их интеграции с Ag НЧ. Полученные результаты могут представлять интерес для создания RGB микросветодиодов на основе InGaN ННК и Ag НЧ.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках исследовательского гранта № 92591131.

1. Ra Y.H. et al., *ACS Photonics*. **6(10)**, 2397-2404. (2019).
2. Kuykendall T. et al., *Nature materials*. **6(12)**, 951-956. (2007).
3. Murotani H. et al., *Journal of Applied Physics*. **114(15)**, 153506. (2013).
4. Jia C. et al., *Advanced Energy Materials*. **6(17)**, 1600431. (2016).

К.М. Афанасьев (студ., 6 курс, СПбПУ, ИЭиТ),  
П.А. Балунов (студ., 6 курс, СПбПУ, ИЭиТ),  
А.М. Минтаиров (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ КВАНТОВОЙ ТОЧКИ InP/GaInP<sub>2</sub>

Двухмерные электронные системы в перпендикулярном магнитном поле, локализованные в квантовых точках (КТ), могут представлять собой энионную вигнеровскую молекулу в режиме дробного квантового эффекта Холла [1]. Энионное состояние (ЭС) соответствует образованию бездиссипативных завихрений электронной плотности (вихрей-антивихрей) [2], что приводит к генерации встроенного магнитного поля и появлению дробного заряда. Особый интерес вызывает тот факт, что в ЭС с ненулевым угловым моментом электрона генерируются моды Майораны (вихрь-антивихрь), которые могут быть использованы для создания топологического квантового затвора [3]. Ранние наблюдения ЭС в КТ InP/GaInP<sub>2</sub> проводились при низких температурах 4–10 К, а теоретические оценки указывают, что состояние ЭС может сохраняться и при более высоких температурах, что вызывает большой интерес для изучения.

В работе представлены измерения ЭС в КТ InP/GaInP<sub>2</sub> в спектрах магнито-фотолюминесценции (магнито-ФЛ), которые демонстрируют сохранение ЭС при температуре 30 К и переход спонтанного ЭС (СЭС) в индуцированное ЭС (ИЭС).

Самоорганизованные КТ InP/GaInP<sub>2</sub> выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке GaAs (001) при температуре 725 °С. Были измерены спектры магнито-ФЛ в установке ближнепольной сканирующей оптической микроскопии (БСОМ) одиночной КТ в магнитном поле в диапазоне 0–10 Тл при температуре 30 К.

На спектрах ФЛ при 0 Тл наблюдается 6 пиков каждого допированного электрона с характерным s-p расщеплением 2,7 мэВ, данное состояние описывается как молекулярное СЭС с встроенным полем 8 Тл. Увеличение магнитного поля до 4 Тл приводит к слиянию отдельных пиков в один широкий, что свидетельствует о разрушении молекулярной СЭС и переводом его в ИЭС, для которой характерно размытие состояний. ИЭС характеризуется s-p расщеплением 4,5 мэВ и может быть описано подгонкой спектров Фока-Дарвина в диапазоне 4–10 Тл, по которой данное состояние характеризуется встроенным полем 4Тл и дробным зарядом 2/3. Увеличение s-p (сравнивая спектры при 0 Тл и 4 Тл) расщепление объясняется изменением диаметра электронной плотности, что связано с генерацией и уничтожением вихрей-антивихрей, приводящих к изменению заряда электрона.

1. Mintairov, A.M., Lebedev, D.V., Vlasov, A.S. *et al. Sci Rep* **11**, 21440 (2021).
2. Mintairov, A.M.; Lebedev, D.V.; Vlasov, A.S.; Blundell, S.A. *Nanomaterials* 2022, 12, 1016.
3. Kitaev, A. Y. Fault-tolerant quantum computation by anyons. *Ann. Phys.* 303, 2–30 (2003).

### ЭКСИТОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНИЧЕСКОЙ КВАНТОВОЙ ТОЧКЕ

Конические квантовые точки (ККТ) представляют собой нульмерные системы с нетривиальной геометрией [1, 2]. Аналитическое описание ККТ является чрезвычайно сложной задачей [3]. С другой стороны, наличие многих геометрических параметров в этих системах позволяет гибко манипулировать энергией уровни носителей заряда. Здесь такими параметрами являются радиус  $R$  и высота конуса  $H$ . Очевидно, что, изменяя эти параметры, можно манипулировать энергетическими уровнями и волновыми функциями электронов и дырок. Важной особенностью таких структур является асимметрия направление роста, которое влияет на физические свойства таких структур.

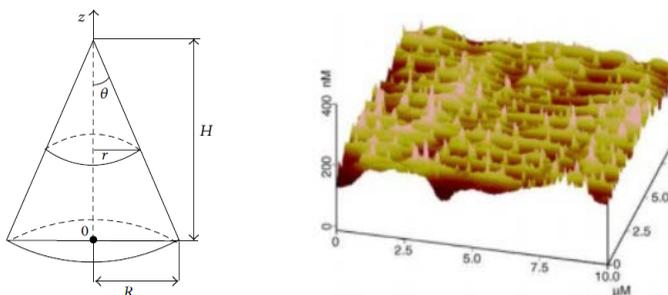


Рис. 1. Схематическое изображение ККТ и АСМ изображение ансамбля ККТ из работы [1,3].

В работе будут рассмотрены экситонные состояния в ККТ когда длина и радиус конуса сравнительные величины. Это означает, что задача не решается аналитически, и должны применяться или приближенные методы, или численные методы для решения задачи. Как известно, задачу нахождения экситонных состояний в КТ можно разделить на три типа, в зависимости от соотношений энергий кулоновского взаимодействия между электроном и дыркой, а также энергией размерного квантования. Выделяются следующие три режима квантования: режим сильного размерного квантования, когда  $E_{SQ} \gg E_{SQ}$ , режим слабого размерного квантования, когда  $E_{SQ} \ll E_{SQ}$ , и, наконец, режим промежуточного размерного квантования, когда  $E_{SQ} \sim E_{SQ}$ .

1. A. Medvid et al., *Nanoscale Research Lett.* **8** 1 (2013).
2. V Lozovski et al., *Theor. Nanoscience* **8** 2335 (2011).
3. D. Hayrapetyan et al., *J. Nanomaterials* **2015** 6 (2015).

Е.И. Дерибина (студ., 2 курс маг., СПбГУ, каф. Фотоники),  
 Ю.П. Ефимов (к.ф.-м.н., вед. спец., СПбГУ, каф. Фотоники),  
 С.А. Елисеев (к.ф.-м.н., вед. спец., СПбГУ, каф. Фотоники),  
 В.А. Ловцос (к.ф.-м.н., вед. спец., СПбГУ, каф. Фотоники),  
 Ю.В. Капитонов (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ, каф. Фотоники)

## КАПЕЛЬНАЯ ЭПИТАКСИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК GaAs/AlGaAs И ИХ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

С помощью капельной молекулярно-пучковой эпитаксии были выращены квантовые точки (КТ) GaAs/AlGaAs. В отличие от самоорганизованных индиевых КТ, в таких КТ отсутствуют напряжения, связанные с рассогласованием постоянных решеток точки и барьеров, что делает их привлекательным объектом для исследований. На подложке арсенида галлия были контролируемо осаждены капли галлия. Преобразование капель в GaAs в присутствии паров мышьяка сопровождается травлением подложки. На рис. 1(а) показан массив полученных nanoотверстий. Далее был выращен барьер  $\text{Al}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}$ , отверстия были заполнены GaAs и закрыты вторым барьером  $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ . Так был получен массив nanoобъектов с поверхностной плотностью менее  $1 \text{ мкм}^{-2}$ . На рис. 1(б) показаны спектры микрофотолюминесценции (ФЛ) и отражения от образца при температуре 4 К. В диапазоне 1.55 - 1.65 эВ в спектре ФЛ наблюдаются отдельные пики от КТ, образующие три ансамбля (А, В, С). По данным микроскопии распределение размеров nanoобъектов одномодально, поэтому мы связываем отличия в ансамблях (А, В, С) с тремя различными областями локализации в nanoобъектах.

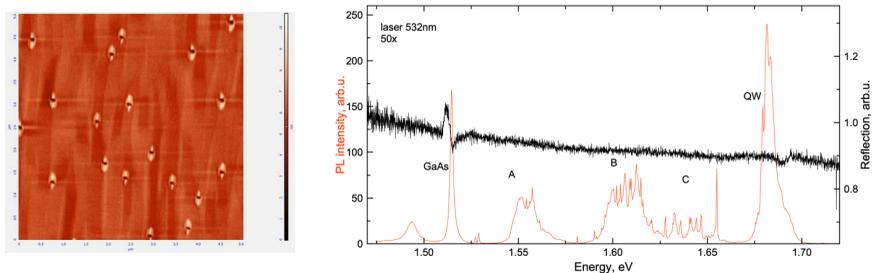


Рис.1. (а) Снимок АСМ nanoотверстий. (б) Микрофотолюминесценция и отражение от образца с квантовыми точками при температуре 4 К.

Работа была выполнена на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ «Нанофотоника». Работа поддержана Министерством науки и Высшего образования (Мегагрант № 075-15-2022-112).

Е.С. Завьялова (студ., 3 курс бак., Алфёровский университет, каф. ФиТН),  
Р.П. Ересько (студ., 3 курс бак., Алфёровский университет, каф. ФиТН),  
А. Кузнецов (асп., 1 год, Алфёровский университет, каф. ФиТН),  
А.Д. Большаков (зав. лаб., МФТИ, лаб. Функциональных наноматериалов)

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ И 2D ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Объектом данной работы является гибридная система на основе ННК фосфида галлия (GaP) и 2D дихалькогенидов переходных металлов (TMDC). Перспективы исследования данных материалов обусловлены излучательными свойствами монослоев MoSe<sub>2</sub> и MoS<sub>2</sub>, а также волноводными и резонаторными свойствами ННК GaP, связанными с низким поглощением почти во всем видимом и ИК диапазонах [1]. Использование ННК на основе GaP в качестве субмикронных волноводов позволяет в значительной мере увеличить направленность вывода фотолюминесценции от монослоев MoSe<sub>2</sub> и MoS<sub>2</sub>, что дает возможность интегрирования данной гибридной системы в оптические чипы. В данной работе методами численного моделирования была исследована система со следующей геометрий и параметрами: на подложке Si со слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 300 нм находится монослой MoS<sub>2</sub> (MoSe<sub>2</sub>) толщиной 0.7 нм, поверх которого расположена часть ННК GaP длиной 6 мкм. Расчеты проводились для диаметров ННК 300, 250, 200 и 150 нм. Для анализа взаимодействия лазера накачки с рассматриваемой системой использовался модельный Гауссов пучок с длиной волны 532 нм. Фотолюминесценция (ФЛ) от монослоев TMDC была смоделирована с помощью дипольных источников, спектральный диапазон излучения которых составлял 625-725 нм и 740-860 нм для MoS<sub>2</sub> и MoSe<sub>2</sub>, соответственно [2]. Анализ модельных данных показывает: 1) с уменьшением диаметра ННК и увеличением длины волны наблюдается снижение локализации поля волны внутри ННК GaP и растет локализация на интерфейсе ННК/TMDC, и для лучшего проникновения излучения TMDC в ННК GaP необходимо использовать ННК с диаметром более 200 нм; 2) локализация поля ФЛ в объеме ННК выше в случае поляризации в плоскости, перпендикулярной оси ННК, чем в случае поляризации в направлении оси параллельной; 3) с уменьшением диаметра ННК GaP добротность падает, что свидетельствует о более сильной делокализации э/м волн внутри него.

Работа поддержана программой стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Соглашение 075-02-2021-1316 30.09.2021).

1. D.E. Aspnes, A.A. Studna, Phys. Rev. B Condens. Matter., **27**, 985 (1983).

2. G. Kioseoglou, A.T. Hanbicki, M. Currie, A. L. Friedman & B.T. Jonker Optical polarization and intervalley scattering in single layers of MoS<sub>2</sub> and MoSe<sub>2</sub> // SCIENTIFIC REPORTS.

Published: 26 April 2016. <https://www.nature.com/articles/srep25041.pdf>

Д.А. Караулов (студ., 4 курс бак., СПбПУ, ВИФШ),  
И.А. Норватов, Р.В. Устименко, М.Я. Винниченко, Д.А. Фирсов (СПбПУ, ВИФШ),  
В.В. Федоров, А.М. Можаров, И.С. Мухин (СПбАУ)

### ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ InAs(P, N)/Si

Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы (ННК)  $A^3B^5$  имеют большие перспективы в качестве наноразмерной платформы для эффективных электронных устройств. Создание светоизлучающих и фотопреобразующих устройств на основе ННК является перспективной и актуальной задачей [1]. ННК на основе InAs обладают рядом преимуществ среди нанонитей группы  $A^3B^5$  в силу высокой подвижности и малой эффективной массы электронов, малой  $E_g$ , а также большой энергии спин-орбитального взаимодействия.

Методом МПЭ на подложках Si(111) было изготовлено несколько массивов ННК с пассивацией поверхности, имеющих структуру InAs-ядро/InP-оболочка и InAs-ядро/CaF<sub>2</sub>-оболочка, а также ранее не синтезировавшиеся ННК азотосодержащего твёрдого раствора InAsN и InAsN-ядро/InP-оболочка. Пассивация поверхности эффективно устраняет поверхностные состояния в ННК [2], которые в силу высокого соотношения поверхности к объёму оказывают существенное влияние на оптические свойства InAs ННК [3].

В настоящей работе были получены спектры фотолюминесценции (ФЛ) в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне при различных уровнях оптической накачки и различных температурах при помощи вакуумного Фурье-спектрометра, работающего в пошаговом режиме. На спектрах ННК InAs-ядро/InP-оболочка был обнаружен пик в области 450 мэВ, а также небольшое плечо в диапазоне 350 – 400 мэВ. В образцах с большим покрытием InP и меньшим объемом ядра пик ФЛ сдвигается в сторону больших энергий вплоть до 480 мэВ, что может быть объяснено деформацией решётки ядра ННК за счёт сжатия оболочкой, что приводит к увеличению  $E_g$ . На образцах InAs-ядро/CaF<sub>2</sub>-оболочка был обнаружен широкий пик в районе 375 мэВ, повторяющий низкоэнергетическое плечо в спектрах других образцов. В спектрах ФЛ образца ННК InAsN виден пик при энергии 370 мэВ. В образце InAsN-ядро/InP-оболочка пик ФЛ сдвигается в сторону меньших энергий до 340 мэВ. Следует отметить, что  $E_g$  InAs при комнатной температуре равна 350 мэВ, при добавлении азота ожидалось увидеть смещение пика межзонной ФЛ в сторону больших длин волн.

Также были изучены спектры поглощения ННК при разных температурах, полученные при помощи Фурье-спектрометра, работающего в режиме быстрого сканирования. У образца ННК с добавлением азота был обнаружен пик поглощения в области 550 мэВ, который объясняется расщеплением зоны проводимости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00494.

1. X. Tengfei et al., *Nanotechnology*, **31**, 294004 (2020).
2. P. Jurczak, et. al., *Nano letters.*, **17**(6), 3629 (2017).
3. S. A. Dayeh, *Semicond. Sci. Technol.*, **25**, 024004 (2010).

Г.А. Клименко (студ., 2 курс маг., МГУ, каф. ФППиКЭ),  
Н.Б. Коновалов (студ., 1 курс маг., МГУ, каф. ФППиКЭ),  
А.М. Смирнов (к.ф.-м.н., с.н.с., МГУ, каф. ФППиКЭ),  
М.В. Козлова (к.ф.-м.н., с.н.с., МГУ, каф. ФППиКЭ)

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОПЛАСТИН СЕЛЕНИДА КАДМИЯ В КОЛЛОИДНОМ РАСТВОРЕ НА НЕЛИНЕЙНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ

В настоящее время особый интерес среди различных наноструктур представляет исследование свойств коллоидных нанопластинок CdSe, которые могут найти применение в биофизике, лазерной технике, солнечной энергетике и др. [1, 2].

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию особенностей нелинейного поглощения в коллоидном растворе с различной концентрацией полупроводниковых нанопластин в случае резонансного стационарного возбуждения наносекундными лазерными импульсами. Объектом исследования были выбраны коллоидные растворы нанопластин CdSe двух толщин: CdSe393 и CdSe463 с толщинами 2,5 монослоя (1,2 нм), и 3,5 монослоя (1,5 нм), соответственно (цифра в обозначении образцов указывает на длину волны экситонного перехода, связанного с тяжёлыми дырками 1hh-1e). Нанопластины обладают кристаллической структурой сфалерита.

Для определения модуляции поглощения коллоидных нанопластин был применен метод накачки и зондирования. Возбуждение образцов осуществлялось импульсами третьей гармоники Nd<sup>3+</sup>:YAP-лазера (360 нм,  $\tau=10$  нс), зондирование – фотолюминесценцией органических красителей (BBQ для образца CdSe393, Coumarin-120 для образца CdSe463), время релаксации которых на порядок меньше длительности импульса третьей гармоники лазера. Интенсивность возбуждающего излучения  $I_{pump}$  изменялась в пределах от 0,3 до 2,5 МВт/см<sup>2</sup> при помощи нейтральных оптических фильтров. В ходе работы были измерены спектры пропускания невозбуждённого и возбуждённого лазерными импульсами коллоидных растворов нанопластин селенида кадмия различной концентрации. По измеренным спектрам пропускания были рассчитаны спектры дифференциального пропускания  $DT(I, \lambda) = (T(I, \lambda) - T_0(\lambda))/T_0(\lambda)$ , где  $T(I, \lambda)$  и  $T_0(\lambda)$  — спектры пропускания возбужденного и невозбужденного образцов, соответственно.

Обнаружен рост амплитуды дифференциального пропускания и интенсивности насыщения поглощения на длинах волн экситонных переходов 1hh-1e для обоих образцов CdSe393 и CdSe463 при увеличении концентрации нанопластин в коллоидном растворе, что объяснено процессом заполнения фазового пространства экситонов. Для коллоидных растворов нанопластин высокой концентрации выявлена область отрицательных значений дифференциального пропускания при достаточно высокой интенсивности накачки и объяснена переходом от режима насыщения поглощения к режиму оптического усиления [3].

1. F. Zhang, S. Wang, et al., *Nanoscale*, **8**, 12182-12188 (2016).
2. V. Colvin et al., *Nature*. **370**, 354-357 (1994).
3. A.M. Smirnov, A.D. Golinskaya, et al., *Results in Physics*, **32**, 105120 (2022).

## InAs КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ В КРЕМНИИ: СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Использование оптоэлектронных интегральных схем (ОИС) может повысить производительность вычислительных систем и снизить их энергопотребление [1], поэтому разработка новых ОИС представляет значительный интерес. Один из перспективных подходов к созданию ОИС основан на синтезе излучающих  $A^3B^5$  структур непосредственно на кремниевой платформе. Высокую технологическую сложность при этом представляет формирование буферных  $A^3B^5$  слоев на кремнии [2]. В свою очередь, возможным способом преодоления данной проблемы является формирование гетероструктур на основе  $A^3B^5$  квантовых точек (КТ), интегрированных в кремниевую матрицу.

Настоящая работа посвящена синтезу структур на основе InAs КТ в кремнии методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) и исследованию оптических свойств таких гетероструктур.

Синтез образцов осуществлялся методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке МПЭ 21EB200 Riber. Предростовая подготовка подложек кремния включала химическую обработку модифицированным методом Ширази и высокотемпературный отжиг в камере установки МПЭ. На подготовленные подложки при температуре  $600^\circ\text{C}$  осаждался буферный слой Si толщиной 50 нм. После этого температура понижалась до  $400^\circ\text{C}$ , и осуществлялся рост InAs КТ. После этого производилось двухэтапное осаждение покровного слоя Si толщиной 30 нм. Исследование оптических свойств выращенных структур осуществлялось с помощью метода низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ).

В результате выполненных работ была продемонстрирована возможность формирования InAs КТ на кремнии и их последующего зарастивания. Показано, что сформированные таким образом гетероструктуры могут демонстрировать ФЛ в области 1.6 мкм. Кроме того, было обнаружено, что уменьшение размеров КТ приводит к увеличению интенсивности ФЛ и сдвигу положения пика ФЛ в длинноволновую область. Таким образом полученные гетероструктуры представляют высокий интерес для создания новых оптоэлектронных устройств на кремнии.

1. X. Chen et al., *Proceedings of the IEEE*, **106**(12), 2101-2116 (2018).
2. M. Sobolev et al., *IOP Publishing*, **1410**(1), 012040 (2019).

## ЭЛЕКТРОННАЯ СПИНОВАЯ ДИНАМИКА В КОЛЛОИДНЫХ НАНОПЛАСТИНАХ CdSe

Химический синтез коллоидных нанокристаллов является распространенным методом создания полупроводниковых структур. Данный метод позволяет производить структуры различной формы и размера. В недавнем времени нанопластины CdSe толщиной в несколько атомных слоёв (монослоёв) привлекли значительный интерес. Их фотофизические и оптические свойства определяются толщиной, которая при синтезе контролируется с высокой точностью. Коллоидные нанопластины является удобной моделью для исследования двумерных систем. Однако, их спиновые свойства до сих пор слабо изучены по сравнению с другими системами, такими как эпитаксиально выращенные двумерные квантовые ямы и квантовыми точки.

Спин электрона атома, помещённого в магнитное поле  $B$ , совершает прецессию вокруг этого поля с частотой Лармора  $\Omega = g\mu B/\hbar$ , которая позволяет определить  $g$  фактор. Релаксация продольной компоненты спина описывается временем  $T_1$ , за которое происходит переход с верхнего зеемановского уровня на нижний. Потеря фазы прецессии поперечной компоненты спина происходит за время  $T_2$ . На практике в большинстве случаев исследуется не одиночный спин электрона, а ансамбль, поэтому появляется неоднородное уширение спектра частот прецессии, и поперечная релаксация описывается временем  $T_2^* < T_2$ .

В настоящей работе спиновая динамика в нанопластинах CdSe толщиной 3 и 4 МС исследуется с помощью метода накачка-зондирование с измерением фарадеевского вращения. В данном методе один луч (луч накачки) используется для создания спиновой поляризации, а второй луч (луч зондирования), который идёт с контролируемой задержкой относительно первого, предназначен для измерения степени спиновой поляризации в образце. Такой подход помогает измерять спиновую динамику на временах порядка 5 нс. Измерения проводились в криостате при температурах от 10 до 300 К.

Затухающие осцилляции спинового сигнала позволяют определить  $g$ -фактор и времена спиновой релаксации. При комнатной температуре  $g$ -фактор близок к 2 и 1.8 для нанопластин 3 и 4 МС, соответственно. При уменьшении температуры величина  $g$ -фактора монотонно убывает. Данный результат является неожиданным и может быть связан с тем, что в нанопластинах при изменении температуры значительно меняется не только ширина запрещенной зоны, но и другие параметры зонной структуры. Также показано, что время  $T_2^*$  убывает при нагревании образца и имеет наносекундные значения при комнатной температуре. Время  $T_1$  оказалось длиннее, чем максимальная задержка между импульсами накачки и зондирования. Таким образом, величина  $T_1$  больше 10 нс при комнатной температуре, что является недостижимым для многих других известных полупроводниковых систем.

Работа поддержана грантом РФФ №18-72-10073-П.

Д.С. Папылев (студ., 2 курс маг., Университет ИТМО, ИПСПД),  
А.В. Бабичев (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОЛИУМИНЕСЦЕНЦИИ InGaAs/GaAs КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 980 НМ

В последнее время возрос интерес к использованию лазеров с вертикальным микрорезонатором с оптической схемой накачки для нейроморфных вычислений за счет формирования фотонных нейронных сетей [1,2]. Благодаря возможности прецизионного изменения диаметра микролазеров с активной областью на основе квантовых точек (КТ) удастся реализовать плотный массив спектрально-однородных микролазеров, излучающих в частотной полосе шириной порядка 50 ГГц, требуемых для резервуарных вычислений.

В работе представлены результаты по сравнительному анализу поведения спектров фотолюминесценции (ФЛ) InGaAs КТ, выращенных двумя эпитаксиальными методами по механизму Странски-Крастанова: газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ), а также молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).

При комнатной температуре однослойный массив  $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$  КТ толщиной 2.5 монослоя (МС), выращенных методом МОГФЭ демонстрирует ФЛ вблизи 1060 нм. В свою очередь, максимум ФЛ однослойного массива  $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$  КТ толщиной 2.6 МС, выращенных методом МПЭ, соответствует длине волны излучения 1090 нм. Данный сдвиг по длине волны излучения обусловлен различием в размерах и форме КТ в структурах, полученных в рамках двух технологий, связанных с эпитаксиальными условиями. Показано, что структура, выращенная методом МОГФЭ, демонстрирует большую пиковую интенсивность ФЛ от КТ в сравнении со структурой, выращенной методом МПЭ.

Проведен сравнительный анализ поведения спектров микро-ФЛ КТ, выращенных в рамках двух технологий. При температуре 77 К ансамбль  $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$  КТ, полученных методом МОГФЭ, демонстрирует микро-ФЛ, соответствующую оптическим переходам между основными состояниями в ансамбле КТ (вблизи 990 нм) с характерной полушириной спектра ФЛ порядка 60 мэВ. Было обнаружено достаточно слабое падение (в 1.9 раза) величины интегральной интенсивности микро-ФЛ при повышении температуры с 77 К до 290 К, что характеризует высокое оптическое качество сформированных КТ и перспективность их использования для формирования компактных массивов лазеров с микрорезонаторами с оптической схемой накачки для нейроморфных вычислений.

Финансирование работы: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00221, <https://rscf.ru/project/22-19-00221/>.

1. D. Marković et al., *Nat. Rev. Phys.*, **2**, 499 (2020).

2. T. Heuser et al., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **26**, 1 (2020).

Д.С. Папылев (студ., 2 курс маг., Университет ИТМО, ИПСПД),  
А.В. Бабичев (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МИКРОЛАЗЕРОВ С InGaAs/GaAs КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 980 НМ

Для повышения максимального оптического усиления активных областей в лазерах спектрального диапазона 980 нм на основе квантовых точек (КТ), требуемых для нейроморфных вычислений [1,2], применяются подходы, направленные на снижение неоднородного уширения в ансамбле КТ. Первый из подходов состоит в использовании субмонослойной эпитаксии (формирование субмонослойных слоев InAs/(In)GaAs). Второй подход включает использование метода частичного прикрытия и высокотемпературного отжига КТ.

В работе представлены результаты по эпитаксиальному росту и исследованию оптических свойств InGaAs КТ, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с использованием метода частичного прикрытия и высокотемпературного отжига КТ. Показано, что уменьшение толщины слоя КТ с 5.3 до 2.6 монослоев (МС) приводит к коротковолновому сдвигу положения максимума интенсивности спектра ФЛ, снижению интенсивности линии, соответствующей переходам через основные состояния. С целью повышения усиления лазеров с вертикальным микрорезонатором с оптической накачкой сформирована структура с тремя слоями туннельно-несвязанных КТ толщиной 2.6 МС. Показано, что интенсивность фотолюминесценции данного класса КТ выше в сравнении с результатами для однослойных КТ толщиной 2.6 МС. На основе активной области с тремя слоями InGaAs КТ выращена гетероструктура вертикального микрорезонатора длиной  $1\lambda$ , сформированного нижним и верхним распределенными брэгговскими отражателями. Метод сухого ионного травления использован для создания микролазеров с оптической накачкой. Проведено исследование спектров спонтанного и стимулированного излучения микролазеров. При температуре 77 К в микролазерах наблюдается сверхлинейный ход зависимости интегральной интенсивности излучения от уровня оптической накачки наряду с сужением полуширины линий FWHM вблизи 982 нм (до величины FWHM порядка 0.3 нм/370 мкэВ). Как результат, можно сделать вывод о наличии лазерной генерации в исследуемых микролазерах, что соответствует переходам через возбужденные состояния в ансамбле InGaAs КТ. Пороговая мощность оптической накачки при 77 К составила  $\sim 6$  мВт для микролазеров диаметром 5 мкм и порядка 4 мВт для микролазеров диаметром 4 мкм.

Финансирование работы: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00221, <https://rscf.ru/project/22-19-00221/>.

1. T. Heuser et al., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **26**, 1 (2020).
2. L. Andreoli et al., *Opt. Express*, **29**, 9084 (2021).

М.В. Парфенов (студ., 1 курс маг., НИУ ВШЭ, каф. т. ф. при ИТФ им. Л.Д. Ландау),  
И.С. Бурмистров (д.ф.-м.н., зам. дир., ИТФ им. Л.Д. Ландау),  
В.Ю. Качоровский (д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ИНДУЦИРОВАННЫЙ БЕСПОРЯДКОМ ПЕРЕХОД В ТРУБЧАТУЮ ФАЗУ В АНИЗОТРОПНЫХ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ

В последние годы особое внимание научного сообщества сосредоточено на изучении двумерных материалов. Основное развитие данного направления было связано с изучением свойств графена. С точки зрения теории упругости, свободно подвешенный лист графена оказывается идентичным изотропной двумерной пластине. В терминах формализма функционала Гинзбурга-Ландау было получено множество результатов, основной из которых это аномальная упругость - степенная зависимость изгибной жесткости графена от размера системы [1]. На основании этого, сравнивая влияние тепловых флуктуаций и аномальной упругости, можно получить, что при конечной температуре (или конечной силе беспорядка для «грязного» случая) мембрана переходит в смятую фазу [2]. Для анизотропных материалов в «чистом» случае, было получено, что при некоторой конечной температуре происходит переход в трубчатую фазу. Также было показано существование бесконечного числа анизотропных плоских фаз, которые характеризуются эллиптическими анизотропными изгибной жесткостью и модулем Юнга [3].

В нашей работе [4] развита теория аномальной упругости для двумерных гибких материалов с орторомбической кристаллической структурой и замороженным беспорядком. Аналогично «чистому» случаю, мы предсказываем наличие бесконечного числа плоских фаз с анизотропными изгибной жесткостью и модулем Юнга, которые показывают степенной скейлинг при увеличении размеров системы, который контролируется той же критической экспонентой, что и в чистом изотропном случае. Под воздействием температуры или беспорядка плоские фазы разрушаются посредством перехода скомкования (crumpling transition). Аналогичный переход для чистых материалов происходит при аномально высоких температурах, тогда как трубчатая фаза, переход в которую вызван беспорядком, может существовать при комнатных температурах. Результаты данной работы применимы к анизотропным монослоям, допированным адатомами или подвергнутым бомбардировке тяжелыми атомами.

1. Nelson, D.R., and L. Peliti. "Fluctuations in membranes with crystalline and hexatic order." *Journal de physique* 48.7 (1987): 1085-1092.
2. Paczuski, Maya, Mehran Kardar, and David R. Nelson. "Landau theory of the crumpling transition." *Physical review letters* 60.25 (1988): 2638.
3. Burmistrov, I. S., et al. "Emergent continuous symmetry in anisotropic flexible two-dimensional materials." *Physical Review Letters* 128.9 (2022): 096101.
4. Parfenov, M.V., V.Yu Kachorovskii, and I.S. Burmistrov. "Disorder-driven transition to tubular phase in anisotropic two-dimensional materials." *arXiv preprint arXiv:2209.04790* (2022).

А.В. Перетокин (студ., 6 курс, ННГУ им. Лобачевского, каф. Общей Физики),  
М.В. Степихова (к.ф.-м.н., ИФМ РАН), А.В. Новиков (д.ф.-м.н., ИФМ РАН),  
С.А. Дьяков (к.ф.-м.н., Сколковский институт науки и технологий)

## ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЗОННОЙ СТРУКТУРОЙ ДВУМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ С НАНООСТРОВКАМИ Ge(Si)

Одна из актуальных задач современной фотоники заключается в создании источников излучения ближнего ИК диапазона на кремнии. Одним из перспективных вариантов решения данной проблемы является использование SiGe структур с наноструктурами Ge(Si) [1], но данные структуры не обладают достаточной излучательной способностью. Для решения данной проблемы в таких структурах формируют двумерные фотонные кристаллы (ФК), что позволяет добиться усиления сигнала ФЛ наноструктур Ge(Si) более чем на два порядка, в том числе за счёт эффекта Парселла [2].

Наибольшее усиление сигнала ФЛ наноструктур Ge(Si) достигается при спектральном совпадении максимума фотолуминесценции (ФЛ) наноструктур с выделенной модой фотонного кристалла. Основным методом управления спектральным положением мод ФК является изменение параметров решетки ФК: периода ( $a$ ) и соотношения  $r/a$ , где  $r$  – радиус отверстий ФК. Но здесь требуется высокая точность изготовления ФК, что не всегда возможно, а также отсутствует возможность выделения в спектре одной наиболее интенсивной моды.

Можно рассмотреть два подхода к управлению спектральным положением мод в двумерных ФК. Это – (i) модификация формы отверстий решётки ФК, а также (ii) - изменение глубины травления отверстий ФК. Первый подход интересен тем, что позволяет добиться выделения одной локальной моды ФК, спектрально коррелирующей с диапазоном излучения наноструктур Ge(Si). Во втором подходе, варьирование глубины травления приводит к появлению новых особенностей зонной структуры ФК, в частности, появлению связанных состояний в континууме (ВКС) при ненулевых значениях волновых векторов, что интересно как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Более того, преимуществом второго подхода является возможность использования глубин травления существенно меньших, по сравнению с глубиной залегания активного слоя (наноструктур Ge(Si)), что должно положительно сказываться на его излучающих свойствах.

В данной работе экспериментально и теоретически будут проанализированы оба этих подхода, показано хорошее соответствие экспериментальных данных, полученных методом спектроскопии микро-ФЛ, с данными теоретических расчетов, выполненных Фурье-модальным методом в формализме матрицы рассеяния [3].

Работа поддержана РНФ (проект #19-72-10011).

1. C. Dais et al., *J. Appl. Phys.* **105**, 122405 (2009).
2. S.A. Dyakov et al., *Laser Photonics Rev.* **15**, 2000242 (2021).
3. S.G. Tikhodeev et al., *Phys. Rev. B.* **66**, 045102 (2002).

Д.И. Сарыпов (студ., 1 курс маг., НГУ, каф. физики полупроводников),  
Д.А. Похабов, А.Г. Погосов, Е.Ю. Жданов, А.К. Бакаров (ИФП СО РАН, НГУ)

## БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В КВАНТОВЫХ ТОЧЕЧНЫХ КОНТАКТАХ ТРАНШЕЙНОГО ТИПА

Несмотря на долгую историю изучения квантовых точечных контактов (КТК), ряд явлений, выходящих за рамки традиционного целочисленного квантования кондактанса, остаются слабоизученными. К ним относится и эффект многоканальности, заключающийся в образовании внутри КТК нескольких проводящих каналов, квантующиеся кондактансы которых дают независимый вклад в общий кондактанс. Этот эффект можно обнаружить путём асимметричного смещения потенциала КТК при помощи разных напряжений на боковых затворах [1, 2]. Для наблюдения многоканальности используют КТК траншейного типа (создаваемые с помощью литографических траншей, отделяющих каналы от двух боковых затворов), позволяющие прикладывать большие разности затворных напряжений.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию многоканальности. В ней представлены измерения кондактанса КТК, демонстрирующие это явление, и предложен лежащий в его основе физический механизм, состоящий в скоррелированном перераспределении электронов двумерного газа, а также заряженных доноров и X-долинных электронов. С помощью численного моделирования показано формирование многоямного потенциала в КТК [3].

Для экспериментального изучения многоканальности, помимо стандартных измерений кондактанса, применялась техника магнитной фокусировки, позволяющая явно рассмотреть, присутствующие в КТК каналы за счёт разделения их вкладов в измеряемый сигнал по шкале магнитных полей. Для этого использовались два отделённых друг от друга на расстояние 4 мкм параллельных КТК, один из которых является инжектором электронов, а другой — детектором. В данной работе было исследовано влияние суммы ( $\Sigma V_G$ ) и разности ( $\Delta V_G$ ) затворных напряжений на спектр магнитной фокусировки.

Напряжение на детекторе демонстрирует пик в магнитном поле, соответствующем циклотронному диаметру, равному расстоянию между коллектором и детектором. Установлено, что уменьшение ширины детектора с помощью  $\Sigma V_G$  приводит к увеличению высоты пика, а прикладывание  $\Delta V_G$  на инжектор приводит к его смещению. Высота пика экспоненциально подавляется с ростом квадрата температуры, что указывает на физическую природу затухания, связанную с электрон-электронным взаимодействием [4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант №22-12-00343).

1. D.A. Pokhobov et al., *Appl. Phys. Lett.*, **118**, 012104 (2021).
2. D.A. Pokhobov et al., *Appl. Phys. Lett.*, **115**, 152101 (2019).
3. Д.И. Сарыпов и др., *Письма в ЖЭТФ*, **116**, 350 (2022).
4. A. Gupta et al., *Nat. Commun.*, **12**, 5048 (2021).

В.А. Смирнова (студ., 6 курс, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),  
 Г.Ф. Глинский (д.ф.-м.н., проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

## РАСЧЕТ ДЫРОЧНЫХ СОСТОЯНИЙ В СВЕРХРЕШЁТКАХ ИЗ КВАНТОВЫХ ПРОВОЛОК В АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ В РАМКАХ ОДНОЗОННОЙ $\Gamma_8$ ( $\Gamma_8^+$ )-МОДЕЛИ

Расчёт дырочных состояний в структурах, содержащих одиночные квантовые проволоки и сверхрешётки на их основе, в настоящее время является важной задачей в связи со значительными успехами, достигнутыми в области технологии их создания. Обычный подход к решению этой проблемы в рамках метода эффективной массы требует решения системы дифференциальных уравнений с большим числом граничных условий, накладываемых на огибающие волновые функции [1]. В настоящей работе предлагается новый метод решения этой задачи, который базируется на решении систем алгебраических уравнений [2].

В рамках однозонной  $\Gamma_8$  ( $\Gamma_8^+$ ) – модели дырочный гамильтониан в алмазоподобных полупроводниках в блоховском базисе имеет вид:

$$H_{\pm}(\mathbf{k}, \mathbf{k}') = E_{\pm}^{\Gamma_8}(\mathbf{k})\delta_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} + f(\mathbf{k} - \mathbf{k}')\Delta E_v,$$

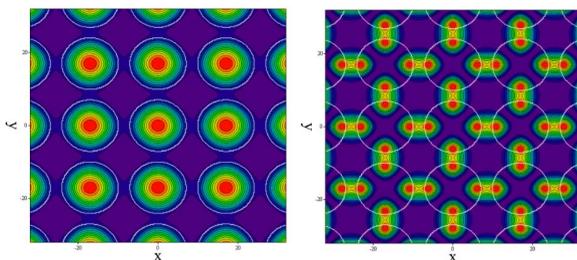
$$\text{где: } E_{\pm}^{\Gamma_8}(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2}{2 \cdot m_0} \cdot \left[ \gamma_1 \cdot k^2 \pm \sqrt{4 \cdot \gamma_2^2 \cdot k^4 + 12 \cdot (\gamma_3^2 - \gamma_2^2) \cdot (k_y^2 \cdot k_z^2 + k_z^2 \cdot k_x^2 + k_x^2 \cdot k_y^2)} \right] \quad - \quad \text{закон}$$

дисперсии лёгких (+) и тяжёлых (-) дырок в зонах  $\Gamma_8$  и  $\Gamma_8^+$ ;  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  - параметры Латтинжера;

$f(\mathbf{k} - \mathbf{k}')$  - фурье-образ характеристической функции  $f(\mathbf{a})$ ,  $\Delta E_v$  - разрыв валентной зоны [3].

На рисунках представлены результаты расчёта распределений плотности дырочных состояний

$|F_n(x, y)|^2$  в плоскости  $(x, y)$  для сверхрешётки с цилиндрическими квантовыми проволоками,  $a - n = 0$ ,  $b - n = 3$ .



1. А.Д. Андреев, Р.А. Сурис Метод слабой связи для расчёта спектра носителей в гетероструктурах // ФТП. 1996. Т. 30. №3. С. 520-535.
2. Г.Ф. Глинский Простой численный метод определения энергетического спектра носителей заряда в полупроводниковых гетероструктурах // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. №6. С. 17-24.
3. Глинский Г.Ф. Полупроводники и полупроводниковые наноструктуры: симметрия и электронные состояния. СПб.: Технолит, 2008. 324с.

УДК 538.958

Н.А. Фоминых (асп., 4 год, Алфёровский университет, лаб. нанофотоники),  
Н.В. Крыжановская (д.ф.-м.н., Алфёровский университет, лаб. нанофотоники)

### ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОДИСКОВЫХ ЛАЗЕРОВ С ОПТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫМ ВОЛНОВОДОМ

Использование оптической передачи данных на микрочипе вместо электронной позволяет добиться повышения скорости, лучшей устойчивости к помехам, снижению энергопотреблению и тепловыделению устройств [1, 2]. Одним из перспективных решений в качестве источника оптического излучения для передачи данных на микрочипе являются полупроводниковые микродисковые (МД) лазеры с резонатором, реализующим моды шепчущей галереи (МШГ) [3]. За счет аксиальной симметрии резонатора МД лазеры не обладают выделенным направлением в диаграмме направленности выходного излучения. Высокая добротность (до десятков миллионов для Si МШГ резонаторов, до  $10^5$  для  $A^3B^5$  микролазеров диаметром около 30 мкм) приводит к сильной локализации мод в объёме резонатора и малым потерям на вывод излучения [4]. Для успешной реализации оптической связи на микрочипе необходим эффективный направленный вывод излучения МД лазеров. Одним из способов реализации этого вывода является оптическая связь с магистральным волноводом (диэлектрическим или полупроводниковым).

В данной работе выполнено исследование вывода излучения  $A^3B^5$  МД лазеров в сопряженный волновод, сформированный из той же гетероструктуры в планарной геометрии. Исследуемые гетероструктуры получены методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке  $p^+-GaAs$ . В качестве активной области были использованы 5 слоев  $InGaAs/GaAs$  квантовых яма-точек. Электронная литография и плазмохимическое травление применялись для формирования волноводов и МД резонаторов (диаметром 15 - 40 мкм), а также узких зазоров между ними (0 - 200 нм). Изучался вывод излучения в прямоугольные волноводы с различной величиной зазора, и волноводы с секцией, огибающей МД лазер (углы огибания составляли 20 и 45 градусов). Выполнено исследование спектров электролюминесценции и порога лазерной генерации при комнатной температуре в зависимости от параметров пристыкованного волновода. Проведено исследование эффективности вывода излучения в волновод в зависимости от параметра связи МД-волновод.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-12-00287.

1. Koseki S. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **94** (5), 0511102009 (2009).
2. Arakawa Y. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **40** (11), 939–941 (1982).
3. Kryzhanovskaya N.V. et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **54** (45), 453001 (2021).
4. Savchenkov A.A. et al. *Opt. Express*, **15** (11), 6768 (2007).

А.И. Баранов (к.ф.-м.н., Алфёровский университет, лаб. ВИЭ),  
А.С. Гудовских (д.т.н., Алфёровский университет, лаб. ВИЭ),  
Е.И. Теруков (д.т.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, лаб. ФХСП)

## ДЕГРАДАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ a-Si/c-Si И mc-Si/c-Si ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ

В настоящее время, рекордный КПД=26.6% для однопереходного солнечного элемента (СЭ) на подложке Si достигнут с использованием тонкого (менее 5 нм) слоя аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H), покрытого высоколегированным слоем a-Si [1]. Однако, существенным недостатком применения a-Si и микрокристаллического кремния (mc-Si) является эффект светоиндуцированной деградации Стаблера-Вронского, приводящий к существенному падению КПД на величину от 10% до 30% от исходного значения [2]. Стабильность приборов особенно важна для космических применений, а с развитием запусков коммерческих спутников потребность в СЭ будет расти, поэтому необходимо подробнее исследовать влияние космического излучения на фотоэлектрические свойства СЭ с HJT-архитектурой, выращенных методом плазмохимического осаждения в ФТИ им. Иоффе, а также понять механизмы дефектообразования в них, приводящие к ухудшению их свойств, что и было проведено в текущей работе.

В рамках исследований были выращены слои a-Si и mc-Si на разных кремниевых подложках: n-типа, p-типа, легированной бором, и p-типа, легированной галлием. После формирования p-i-n перехода на лицевой стороне подложек и изотипного гетероперехода на тыльной на обе стороны наносились антиотражающие покрытия из слоев ИТО, далее были сформированы серебряные контактные сетки и отожжены. Далее, часть подложек подверглась облучению потоком электронов с 1 МэВ и дозой  $5 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$  и  $1 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$ . В результате, во всех образцах после облучения уменьшилась квантовая эффективность в длинноволновой области спектра, но в образце с n-подложкой ток короткого замыкания упал почти в два раза при максимальном облучении относительно исходного значения в отличие от p-типа, где он упал на 20%. Фотоэлектрические свойства подложек p-типа, легированных галлием, чуть лучше, чем легированных бором, но после облучения они практически идентичны. Различия в разных уровнях деградации времени жизни в подложках объясняется большей стойкостью p-Si, что приводит к меньшему дефектообразованию в объеме подложки. Это следует из результатов исследований гетеропереходов методом спектроскопии адмиттанса и нестационарной спектроскопии глубоких уровней до и после облучения, что будет представлено на конференции.

Работа была выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект номер FSRM-2020-0004).

1. K. Yoshikawa et al. 2017 *Nat. Energy* **2**(5) 17032.
2. D.I. Stabler, C.R. Wronski. 1977 *Appl. Phys. Lett.* **31** 292.

Д.С. Березина (асп., 3 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
А.Н. Семенов, М.М. Кулагина, И.П. Смирнова, Ю.М. Задиранов, Д.В. Нечаев, С.И. Трошков,  
В.Н. Жмерик (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отд. ЦФН)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОЛНЕЧНО-СЛЕПЫХ ( $\lambda < 290$ нм) ДИОДОВ ШОТТКИ С ВЫСОКОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

Для создания солнечно-слепых диодов Шоттки используются гетероструктуры на основе широкозонных твердых растворов AlGaN с шириной запрещенной зоны, варьируемой от 3.4 до 6.1 эВ (210–365 нм). В фотодиодах с рабочей длиной волны менее 290 нм необходимо использовать  $n$ -легированные слои  $Al_xGa_{1-x}N$  ( $x \geq 0.6$ ). В таких слоях с ростом содержания Al существенно возрастает как слоевое, так и контактное сопротивление [1], что затрудняет формирование омических контактов. При этом оказывается, что разработанные технологии формирования омических контактов к GaN и слоям  $Al_xGa_{1-x}N$  ( $x < 0.5$ ) не могут быть просто перенесены на слои AlGaN ( $x \geq 0.6$ ) в силу сложного характера взаимодействия металлов с полупроводником и образованием композиционных интерметаллических соединений.

В настоящей работе исследовалось влияние различных технологических режимов формирования омических контактов Ti/Al/Ti/Au на величину контактного и удельного сопротивления слоев  $Al_xGa_{1-x}N:Si$  ( $0.5 \leq x \leq 0.8$ ), выращенных методом плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии. Для формирования омических контактов использовалось быстрое термическое вжигание многослойных контактов с различной толщиной Al-слоя Ti(25 нм)/Al(80–250 нм)/Ti(60 нм)/Au(100 нм), которые наносились методом магнетронного напыления. Температура и время вжигания контактов варьировались в диапазоне 700–1000°C и 30–180 секунд, соответственно. Значения удельного ( $r_c$ ), контактного ( $R_c$ ) и слоевого ( $R_s$ ) сопротивлений измерялись с помощью линейного TLM-метода. Поверхность образцов исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). На основании полученных результатов методом контактной литографии были изготовлены диоды Шоттки с различным диаметром мез 30–400 мкм. В качестве контакта Шоттки напылялись слои металлов Ni(30 нм)/Au(100 нм).

В ходе оптимизации технологии формирования омических контактов для образцов  $Al_{0.6}Ga_{0.4}N:Si$  были получены следующие значения сопротивлений:  $R_c=10 \Omega \times mm$ ,  $R_s=800 \Omega/\square$ ,  $r_c=10^{-3} \Omega \times cm^2$ , а для образцов  $Al_{0.8}Ga_{0.2}N:Si$ :  $R_c=30 \Omega \times mm$ ,  $R_s=1000 \Omega/\square$ ,  $r_c=7 \times 10^{-3} \Omega \times cm^2$ , которые сопоставимы с лучшими мировыми результатами. Фотодиод Шоттки продемонстрировал максимум фоточувствительности на длине волны 279 нм, при этом величина чувствительности составила 50 мА/Вт при нулевом смещении.

1. Y.-H.Liang and E.Towe. Appl. Phys. Rev. 5 011107 (2018).

## СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЙ ДИОД С МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫМИ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ И ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Комбинирование дискретных элементов спинтроники для отработки их взаимодействия и получения новых приборов является актуальной задачей. Так функциональное совмещение магниторезистивного элемента и спинового светодиода позволит получить устройство, в котором посредством приложения магнитного поля будет возможность задавать одно из четырёх устойчивых состояний для одной информационной ячейки. Такой подход позволит удвоить информационную емкость устройств спинтроники. В области исследования комбинированного магниторезистивного элемента и светодиода можно назвать работы [1,2], в которых изучались структуры с управлением интенсивностью оптического сигнала внешним магнитным полем. В данной работе сообщается об устройстве с независимым изменением как интенсивности излучения, так и степени циркулярной поляризации.

Магниторезистивный спиновый светодиод представляет собой комбинацию светоизлучающей части на основе полупроводниковой гетероструктуры с квантовой ямой InGaAs/GaAs и спиновым инжектором CoPd и спинового клапана, состоящего из последовательно соединенных слоев Cr/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/Cu/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>.

При приложении к такой структуре продольного магнитного поля наблюдается изменение интенсивности электролюминесценции (ЭЛ), связанное с изменением сопротивления магниторезистивного контактного слоя. При токе 36 мА структура работает в ключевом режиме: в магнитном поле  $\pm 50$  мТл относительная интенсивность принимает максимальные значения; в нулевом магнитном поле, а также в поле выше 100 мТл она равна нулю. Наиболее вероятный механизм увеличения интенсивности ЭЛ такого комбинированного устройства в продольном магнитном поле представлен в [3]. При приложении поперечного магнитного поля ЭЛ становится частично циркулярно-поляризованной. Максимальное значение  $P_{EL}$  составило 0,4%.

В результате был изготовлен образец, в котором можно задавать не два, а четыре независимо управляемых состояниях (высокая интенсивность с правой и левой циркулярной поляризацией и низкая интенсивность с правой и левой циркулярной поляризацией).

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства “Приоритет 2030” Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-20186).

1. Appelbaum I., et. al., 2003 Appl. Phys. Lett. 83 4571.
2. Saha D., Basu D., Bhattacharya P. 2008 Appl. Phys. Lett. 93 194104.
3. Ved M., et. a., 2021 Appl. Phys. Lett. 118 092402.

Е.А. Вячеслава (асп., 3 год, Алфёровский университет, лаб. ВИЭ),  
А.В. Уваров, А.А. Максимова, А.И. Баранов (Алфёровский университет, лаб. ВИЭ),  
А.С. Гудовских (д.т.н., Алфёровский университет, лаб. ВИЭ)

## ФОРМИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ВЕРТИКАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СТРУКТУР С РАДИАЛЬНЫМ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОМ ДЛЯ ГИБКОЙ ФОТОВОЛЬТАИКИ

В наземной фотоэлектрической промышленности по-прежнему доминируют солнечные элементы (СЭ) на основе кристаллического кремния (с-Si) из-за их эффективности, стабильности и изобилия кремния [1]. В последнее время наноразмерные кремниевые структуры, такие как нановолокна (SiNWs), привлекают значительное внимание ученых из разных отраслей науки [2,3]. Массив SiNWs может предоставить новые возможности для разработки СЭ с радиальным *p-i-n* переходом из аморфного кремния (*a*:Si-H). SiNWs обеспечивают широкополосное просветление и обладают хорошим эффектом улавливания света, что может увеличить оптическое поглощение солнечного излучения в активных слоях *a*:Si-H и общую производительность СЭ. Однако, на данный момент нет определенного представления о требуемой геометрии (диаметр, периодичность и высота) SiNWs для нанесения (*i*)*a*-Si:H/(*p*)*a*-Si:H слоев с точным контролем толщины.

В данной работе мы изготовили пять типов структур SiNWs, которые отличаются геометрией (диаметром, высотой) для последующего нанесения *p-i-n a*-Si:H структур. Для оценки качества перехода *a*-Si:H/c-Si также были изготовлены планарные структуры СЭ. В качестве подложек были использованы кремниевые 100 мм пластины с удельным сопротивлением 0.08 Ом\*см, легированные сурьмой. SiNWs были получены с использованием наносферной литографии и сухого травления в газовой смеси SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> при криогенных температурах ( $\leq 100$  °C). Подробную информацию о формировании SiNWs можно найти в наших ранее опубликованных работах [4,5]. Для нанесения *p-i-n a*-Si:H структур на SiNWs использовался метод плазмохимического осаждения (PECVD).

Были исследованы фотоэлектрические свойства полученных структур. Значение плотности тока короткого замыкания ( $J_{sc}$ ) структуры на SiNWs (4.8 мА/см<sup>2</sup>) в 1.5 раза превосходит  $J_{sc}$  планарного элемента (3.2 мА/см<sup>2</sup>). Также наблюдается расширение спектров квантовой эффективности в коротковолновой области в случае перехода на основе SiNWs.

Нам также удалось создать гибкую конструкцию SiNWs с радиусом изгиба 25 мм. Для этого была разработана технология заполнения пространства между SiNWs фоторезистом Su-8. Затем подложку с тыльной стороны утоняли механически, а затем в плазме.

1. M.A. Green et al., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **65**, 9-16 (2001).
2. S. Kato et al. *Nanoscale Res. Lett.*, **14**, (2019).
3. Liu Dong et. al. *RSC Advances*, **9**, 23554-23559, (2019).
4. I.A. Morozov et al., *Phys. Stat. Sol.* **217**, 1900535 (2019).
5. E.A. Vyacheslavova et al., *Phys.: Conf. Ser.* **1697**, 012188 (2020).

А.Е. Иванов (ст. лаборант, НТЦ микроэлектроники РАН),  
 Н.А. Тальнишних (м.н.с., НТЦ микроэлектроники РАН),  
 А.Е. Черняков (к.ф.-м.н., доц., СПбГЭТУ «ЛЭТИ»),  
 А.Л. Закгейм (к.т.н., зав. лаб., НТЦ микроэлектроники РАН)

### ТОКОВЫЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНОГО AlGaN СВЕТОДИОДА ГЛУБОКОГО УФ ДИАПАЗОНА ( $\lambda=270$ нм)

Экспериментально исследованы электрооптические характеристики мощных AlGaN светодиодов (СД) «флип-чип» конструкции глубокого УФ диапазона. Токковые и температурные зависимости спектров и мощности излучения, внешнего квантового выхода  $\eta_{QE}$  и КПД были получены в диапазоне токов от единиц миллиампер до десятков ампер (в последнем случае в импульсном режиме) и температур  $220 \div 320$  К. На основе анализа полученных зависимостей в рамках ABC-модели сделаны выводы о соотношении значений внутреннего квантового выхода  $\eta_{QE}$  и коэффициента вывода излучения  $\eta_{ext}$ , в совокупности определяющих энергетическую эффективность СД.

В работе исследовались УФ СД с излучающим кристаллом «флип-чип» конструкции размером  $1280 \times 1160$  мкм<sup>2</sup> (Bolb, Inc.) [1], монтируемым на теплопроводную AlN плату-носитель с помощью пайки. Пиковая длина волны излучения  $\lambda_{peak}=270 \div 275$  нм.

Были получены зависимости спектров и мощности излучения от тока при трех температурах р-п-перехода, и на их основе рассчитаны токковые зависимости  $\eta_{QE}$ . Температура задавалась криостатом закрытого типа Janis. Полная мощность и спектры излучения регистрировались с помощью измерительного комплекса OL 770-LED [2].

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости  $\eta_{QE}$  от тока при различных температурах в области малых и умеренных токов. Как видно из рис.1 (кривые 1,3,5) картина

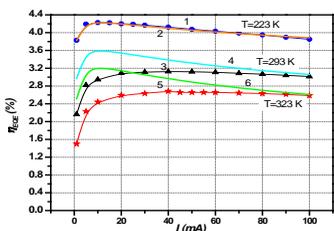


Рис. 1. Экспериментальные (1, 3, 5) и расчетные зависимости (2, 4, 6)  $\eta_{QE}$  от тока при трех температурах.

с ярко выраженным максимумом  $\eta_{QE}$  наблюдается лишь при пониженной температуре  $T=223$  К. Такой вид зависимости позволяет использовать ABC-модель [3], для ее аппроксимации и определения основных внутренних параметров СД:  $\eta_{QE} = 0,87$  и  $\eta_{ext} = 0,048$ . Из сравнения кривых 1 и 2 следует хорошая корреляция эксперимента и расчёта при этих значениях для пониженной температуры. Основным фактором низкой эффективности УФ СД, по сравнению с

аналогичными синими СД [4], является малое значение  $\eta_{ext}$  – единицы процентов, обусловленное поглощением генерируемого излучения в объеме кристалла и на контактах.

1. UV-C LED bare chip, [Online]. Available: <https://bolb.co/ucv-led-brochure/>
2. A. Zakgeim and A. Chernyakov 2013 *LIGHT & ENGINEERING* **21** (4) 64-70.
3. S. Yu. Karpov 2015 *Opt. Quantum Electron.* **47** (6) 1293-1303.
4. А.Л. Закгейм и др. 2022 Письма в ЖТФ **48** (13) 33-40.

М.С. Иванов (асп., 4 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
А.В. Рожков (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
П.Б. Родин (д.ф.-м.н., в.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

## БИПОЛЯРНЫЕ ИОНИЗИРУЮЩИЕ ДОМЕНЫ ГАННА И ЭФФЕКТ «ЗАЛИПАНИЯ» ОБРАТНОСМЕЩЕННЫХ GaAs ДИОДОВ В ПРОВОДЯЩЕМ СОСТОЯНИИ

Ударная ионизация в сильных электрических полях позволяет за субнаносекундные времена создать в обратносмещенном Si или GaAs высоковольтном диоде электронно-дырочную плазму и перевести его в проводящее состояние [1,2]. Для того, чтобы поддерживать проводимость диода после сверхбыстрого переключения, электрическое поле в базе должно быть достаточным для ударной ионизации, компенсирующей дрейфовую экстракцию и рекомбинацию носителей. Для кремниевого диода это означает, что напряжение должно быть близким к порогу стационарного лавинного пробоя  $U_b$ . В нашей работе показано, что в GaAs диоде достаточная для поддержания проводящего состояния ударная ионизация может иметь место при обратном напряжении, почти на порядок меньшем  $U_b$ . Это достигается за счет расслоения электронно-дырочной плазмы: в ней спонтанно возникают узкие ионизирующие области сильного поля. Эти области – так называемые коллапсирующие домены Ганна [3] – двигаются от катода к аноду со скоростью, близкой к скорости дрейфа электронов, и характеризуются иррегулярной пространственно-временной динамикой.

В нашем эксперименте [4,5] к  $p^+p^0-i-n^0-n^+$  GaAs диодной структуре с напряжением стационарного лавинного пробоя  $U_b = 400$  В и диаметром 500 мкм прикладывался прямоугольный импульс обратного напряжения с временем нарастания 300 пс, амплитудой до 800 В и длительностью до 100 нс. После переключения диод оставался в проводящем состоянии на протяжении всего приложенного импульса и проводил постоянный ток  $\sim 10$  А, определяемый последовательной нагрузкой 50 Ом. Остаточное напряжение составляло  $\sim 90$  В. Ток протекал по узким каналам, общая площадь которых не превышает 1/100 полной площади структуры [5]. Соответствующая плотность тока оценивается как 1 МА/см<sup>2</sup>. Численное моделирование [4,6] показывает, что проводимость GaAs диода поддерживается ударной ионизацией в коллапсирующих доменах Ганна толщиной около 1 мкм и амплитудой до 350 кВ/см, а также квазистационарных катодном и анодном доменах. Время самоподдержания проводящего состояния ограничивается только Джоулевым саморазогревом проводящих каналов (5 К/нс) и лежит в субмикросекундном диапазоне.

1. I.V. Grekhov and A.F. Kardo-Sysoev, *Sov.Tech.Phys. Lett.* **5**, 395 (1979).
2. Zh.I. Alferov et al., *Sov. Tech.Phys.Lett.* **13**, 454 (1987).
3. S.N. Vainshtein, V.S. Yuferev, J.T. Kostamovaara, *J. Appl. Phys.* **97**, 024502 (2005).
4. A. Rozhkov, M. Ivanov, P. Rodin, *Solid State Commun.*, **354**, 114895 (2022).
5. А.В. Рожков, М.С. Иванов, П.Б. Родин, *Письма в ЖТФ*, **48** (16), 25 (2022).
6. М.С. Иванов, А.В. Рожков, П.Б. Родин, *Письма в ЖТФ*, **48** (20), 31 (2022).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ГЕНЕРАЦИИ КОРОТКИХ ОПТИЧЕСКИХ  
ИМПУЛЬСОВ МОЩНЫМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЛАЗЕРОМ

Мощные полупроводниковые лазеры активно используются в современной науке и технике. Наиболее часто такие лазеры применяются при создании лидаров и систем измерения дальности, в которых накачка лазеров осуществляется в импульсном режиме. Актуальной задачей является исследование принципов генерации коротких лазерных импульсов с высокой пиковой оптической мощностью.

В работе проводились исследования мощных полупроводниковых торцевых лазеров полосковой конструкции на основе двойной AlGaAs/GaAs гетероструктуры раздельного ограничения с шириной полоска 100 мкм, излучающих на длине волны 850 нм с целью определения принципов формирования субнаносекундных оптических импульсов с высокой пиковой мощностью на высокой частоте.

В процессе исследования было определено, что наиболее эффективным способом получения коротких оптических импульсов является обеспечение работы лазера в режиме первой осцилляции. Для получения такого режима работы была разработана электрическая схема, обеспечивающая импульс токовой накачки длительностью 1-3 нс с амплитудой 1-5 А на частотах до 100 кГц. В дальнейшем электрическая схема была реализована в приборе формирования импульсов.

Модернизация электрической схемы прибора, в ходе которой место монтажа лазерного чипа было перенесено прямо на плату накачки для сокращения длины проводников и уменьшения индуктивности цепи, позволила повысить пиковую оптическую мощность и частоту следования импульсов при сохранении субнаносекундной длительности. Также была повышена помехоустойчивость схемы и улучшен отвод тепла. В результате были получены оптические импульсы длительностью 250 пс, на частоте 10 МГц с пиковой оптической мощностью 3 Вт. На частоте 1 МГц пиковая мощность составила 4 Вт. (рис. 1).

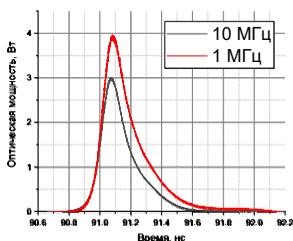


Рис. 1. Форма полученных оптических импульсов.

## ФОТОПРОВОДЯЩИЕ ДИПОЛЬНЫЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКООМНОГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ (HR-GaAs:Cr), ОБЛУЧЕННЫЕ ЭЛЕКТРОНАМИ, ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Фотопроводящая дипольная антенна (ФДА) является наиболее эффективным устройством для генерации и детектирования терагерцового излучения. Благодаря своим параметрам и характеристикам ФДА используется в системах терагерцовой спектроскопии, беспроводной передачи данных, безопасности и др. Процессы, от которых зависят генерационные и детектирующие характеристики антенны, являются быстропротекающими и зависят от комплекса параметров. Наилучшим сочетанием параметров фотопоглощающего слоя является минимальное время жизни и максимальная подвижность носителей заряда, а для обеспечения возможности подачи больших напряжений смещения и уменьшения шумов материал фотоактивной среды должен обладать высоким темновым сопротивлением. Поскольку низкое время жизни связано с наличием рекомбинационных дефектов в кристаллической структуре, которые снижают подвижность носителей заряда, эти характеристики, как правило, труднодостижимы в одном материале. Для получения эффективного устройства необходим баланс всех параметров фотопоглощающего слоя.

В настоящей работе проведено экспериментальное и теоретическое исследование влияния параметров полупроводниковой основы, а также влияние формы и размера металлической структуры на спектр генерации терагерцового излучения. Исследование проводилось на антеннах в основе которых использовались HR-GaAs:Cr и LT-GaAs полупроводниковые основы. Фотовозбуждение производилось импульсным и непрерывным лазерными источниками на длине волны 780 нм, что позволило получить импульсное и непрерывное терагерцовое излучение. Было проведено модельное исследование процессов генерации, протекающих в ФДА, при различной комбинации параметров активной среды. Представлена методика улучшения характеристик ФДА путем облучения готовой антенны высокоэнергетическими электронами.

Анализ экспериментальных и модельных данных позволил определить механизм генерации терагерцового излучения фотопроводящими антеннами на основе материала с большим временем жизни носителей зарядов ( $>10$  нс). Изготовленные антенны позволили получить импульсное терагерцовой излучение с шириной спектра до 3 ТГц. Облучение электронами готовой антенны привело к увеличению мощности генерации до 200% на различных участках спектра генерации.

1.N. Burford, M. El-Shenawee. Review of terahertz photoconductive antenna technology // *Optical Engineering*, 2017, vol. 56. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.1.010901>.

Я.Н. Ковач (асп., 1 год, ИТМО, м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
С.А. Блохин (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
А.В. Бабичев (к.ф.-м.н., с.н.с., Университет ИТМО),  
М.А. Бобров (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
А.А. Блохин (м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
А.Г. Гладышев (к.ф.-м.н., ст. спец. по эпитаксии, ООО «Коннектор Оптикс»),  
И.И. Новиков (к.ф.-м.н., с.н.с., Университет ИТМО),  
Л.Я. Карачинский (д.т.н., вед.н.с., Университет ИТМО),  
К.О. Воропаев (нач. группы Отдел 1. Разработка ИЭТ, АО «ОКБ-Планета»),  
А.Ю. Егоров (д.ф.-м.н., тех. директор, ООО «Коннектор Оптикс»)

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПЕРЕДАТЧИК СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 1.55 МКМ НА ОСНОВЕ ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЛАЗЕРА, ИЗГОТОВЛЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ СПЕКАНИЯ ПЛАСТИН

Растущие с каждым годом требования к центрам обработки данных (ЦОД) по объему хранения и передачи данных стимулируют одновременное применение оптических каналов передачи данных на основе многомодовых (MMF) и одномодовых волокон (SMF) современных крупномасштабных ЦОД. Однако, несмотря на значительный прогресс в области ВИЛ спектрального диапазона 0.85 мкм на основе системы материалов InAlGaAs/GaAs, разработка длинноволновых (спектральный диапазон 1.3/1.55 мкм) ВИЛ на основе системы материалов InAlGaAs/GaAs и/или InAlGaAsP/InP сопряжена с рядом фундаментальных и технологических проблем [1]. Одним из перспективных направлений решения является гибридная интеграция оптического резонатора на основе системы материалов InAlGaAsP/InP с распределенными брэгговскими отражателями на основе системы материалов AlGaAs/GaAs в рамках технологии спекания пластин (далее СП-ВИЛ).

В настоящей работе проведены комплексные исследования характеристик оптоволоконного оптического передатчика на основе СП-ВИЛ спектрального диапазона 1.55 мкм [2]. Продемонстрирован одночастотный (фактор подавления боковых мод >50 дБ) режим лазерной генерации с пороговым током 1.4 мА и максимальной оптической мощностью на выходе волокна более 1.4 мВт. Частота эффективной модуляции (по уровню -3 дБ) растет с током со скоростью ~3.8 ГГц/мА<sup>0.5</sup> и достигает ~12 ГГц. Согласно экспериментам по токовой модуляции в режиме большого сигнала (формат NRZ, PRBS 2<sup>7</sup>-1) максимальная скорость передачи данных достигает 30 Гб/с (короткая линия связи). Однако по мере увеличения протяженности оптоволоконного канала на основе SMF-28 паразитная частотная модуляция лазера (чирпинг-эффект) и хроматическая дисперсия оптоволоконна SMF-28 усиливают межсимвольную интерференцию, что и ограничивает предельную дальность передачи данных на уровне 1 км и 5 км на скорости 25 и 10 Гб/с, соответственно.

1. Padullaparthi B.D. et al., VCSEL Industry: Communication and Sensing (Wiley, 2021).
2. Blokhin S.A. et al., Semiconductors 53, 1104-1109 (2019).

К.В. Лихачев (асп., 1 год, м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, отд. ФТТ),  
А.В. Анкудинов (д.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
А.Н. Анисимов (к.ф.-м.н., и.о. н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## РАЗРАБОТКА СЕНСОРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ SiC ГЕКСАГОНАЛЬНОГО ПОЛИТИПА, СОВМЕЩЕННЫХ С АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИЕЙ

Спиновые дефекты в полупроводниках широко используются для измерения магнитных полей и токов с нанометровым пространственным разрешением. Наиболее ярким примером является азотно-вакансионный NV-центр в алмазе. Сенсоры на основе NV-центра нашли применение для визуализации магнитных доменов и электрических токов. Принцип обнаружения основан на оптически детектируемой магнитно-резонансной спектроскопии (ОДМР) и требует применения резонансных микроволновых полей с одновременной регистрацией изменения интенсивности флуоресценции [1]. Алмазные зонды, как правило, фабрикуются вручную и устанавливаются на обычные кантилеверы атомно-силового микроскопа (АСМ), изготовленные из других материалов.

Собственные дефекты в карбиде кремния (SiC) стали серьезными кандидатами для применений в измерении магнитных полей и токов. Семейства спиновых центров, образованных этими дефектами, обнаружены при помощи ОДМР. Они обладают возможностью устойчивой работы при комнатной температуре, высокими временами когерентности, яркой люминесценцией и спиновым выстраиванием при оптической накачке [2]. На основе нанокристалла SiC и АСМ-кантилевера возможно реализовать сканирующие датчики с высоким пространственным разрешением, допускающие полностью оптическую магнитометрию без применения микроволнового излучения. Ожидается, что такие датчики позволят проводить измерения в электропроводящих средах, таких как интегральные схемы и биологические растворы без возникновения побочных токов или нагревания.

В работе демонстрируется метод изготовления датчиков на основе нанокристаллов SiC и АСМ. Вакансионные центры в SiC со спином  $S = 3/2$  были созданы при помощи облучения ионами гелия. Их наличие подтверждается спектрами фотолуминесценции. Получены карты пространственного распределения фотолуминесценции наночастиц, нанесенных на подложку кремния. Получены спектры ОДМР наночастиц. Изготовлены датчики потенциально применимые для сканирующей квантовой магнитометрии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №20-52-76010 ЭРА\_т.

1. Zhou T.X., Stöhr R.J., Yacoby A. Scanning diamond NV center probes compatible with conventional AFM technology // Applied Physics Letters. – 2017. – Т. 111. – №. 16. – С. 163106.
2. Солтамов В.А. и др. Точечные дефекты в карбиде кремния как перспективная основа для спектроскопии одиночных дефектов с контролируемыми квантовыми состояниями при комнатной температуре // Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57. – №. 5. – С. 877-885.

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ПАРОВ ХЛОРОВОДОРОДА ОДИНОЧНЫМ ГАЛОГЕНИДНЫМ ПЕРОВСКИТНЫМ НАНОЛАЗЕРОМ

Галогенидные перовскитные нитевидные нанокристаллы (ННК) представляют собой многофункциональные материалы для современных оптоэлектронных устройств и оптически накачиваемых лазерных структур. Последние показывают высокочастотное лазерное излучение во всем видимом диапазоне (ННК поддерживают резонансы Фабри-Перо) с низким порогом генерации. Превосходные лазерные характеристики ННК делают их подходящими кандидатами для оптического сенсинга. До недавнего времени было продемонстрировано применение ННК лазеров для создания тензометрических и газовых (органических аналитов) сенсоров. Тем временем, летучие аналиты, такие как галогениды водорода (НХ, X = Cl, Br, I), легко взаимодействуют с галогенидными перовскитами посредством анионного обмена между молекулами аналита и кристаллической решеткой перовскита. Вместо органических молекул, которые меняют показатель преломления окружающей среды ННК лазера, изменение химического состава кристаллической решетки перовскита должно вызвать заметный оптический отклик (спектральный сдвиг лазерной линии) в ННК лазерах, взаимодействующих с парами галогенидов водорода даже при их низкой концентрации. Поскольку изменение состава кристаллической решетки происходит аккумулятивным образом, на основе перовскитных ННК лазеров возможно создавать эффективные сверхчувствительные сенсоры для детектирования даже незначительных концентраций паров аналитов НХ, что является актуальной проблемой для обеспечения безопасности труда на химических производствах.

В данной работе представлено оптическое детектирование паров HCl с помощью перовскитных нитевидных нанолазеров CsPbBr<sub>3</sub>, синтезированных на наноструктурированной подложке Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Установлено, что реакция анионного обмена между ННК и молекулами аналитов приводит к формированию структуры типа ядро-оболочка CsPbBr<sub>3</sub>-CsPb(Cl,Br)<sub>3</sub>. Поскольку показатель преломления оболочки меньше, чем у ядра, ее формирование уменьшает удержание поля в перовскитном Фабри-Перо резонаторе. В связи с этим, собственные лазерные моды, сохраняющие свою пространственную локализацию, вынуждены увеличивать свою собственную частоту (претерпевают синий спектральный сдвиг). Данное явление подтверждено согласованными результатами измерений, полученными методами XPS спектроскопии, XRD анализа, EDX анализа, микрофотолюминесценции, числового моделирования диффузии ионов Cl<sup>-</sup>, и моделирования величины спектрального сдвига собственной моды резонатора, зависящего от толщины смешанно-галогенидной оболочки. Экспериментально наблюдаемый оптический отклик позволяет детектировать газ HCl при его концентрации от 5 до 500 ppm.

П.Е. Копытов (студ., 2 курс маг., Университет ИТМО),  
Н.Ю. Харин, А.Д. Петрук (асп., СПбПУ, ВИФШ),  
Г.В. Вознюк (к.т.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Е.С. Колодезный (к.ф.-м.н., Университет ИТМО)

## КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА И УВЕЛИЧЕННОЙ ВЕЛИЧИНОЙ СВЯЗЫВАНИЯ

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) представляют интерес для создания перспективных систем детектирования химических элементов [1]. Применение конструкции кольцевого резонатора позволяет исключить дополнительные оптические потери на зеркалах, присутствующие в полосковых лазерах. Использование дифракционной решетки второго порядка позволяет осуществить поверхностный вывод излучения в лазерах на межподзонных переходах. В отличие от ККЛ в геометрии фотонного кристалла [2], использование конструкции кольцевого резонатора позволило реализовать поверхностную одночастотную генерацию в непрерывном режиме токовой накачки [3].

В работе представлены результаты по формированию и исследованию ККЛ с кольцевым резонатором. Формирование гетероструктуры ККЛ проведено методом молекулярно-пучковой эпитаксии [4]. После изготовления кристалла ККЛ сформирована дифракционная решетка на всей поверхности кольцевого резонатора методом прямой литографии сфокусированным ионным пучком. Использована конструкция с наличием двойного резкого фазового сдвига на величину  $\pi$ . Глубина травления штрихов составила  $2.8 \pm 0.5$  мкм. Согласно численному расчету коэффициента связывания, увеличение глубины травления штрихов дифракционной решетки до 2.8 мкм позволяет реализовать величину (coupling strength)  $\sim 1$ . Пороговый ток  $I_{th}$  в созданных лазерах составил  $\sim 100$  мА ( $\sim 0.4$  кА/см<sup>2</sup>) при 77К, а пороговое напряжение  $U_{th}$  около  $\sim 12$  В. Спектр лазерной генерации вблизи порогового значения представлен тремя линиями (модами) шепчущей галереи вблизи 7.6 мкм. По величине межмодового расстояния для мод шепчущей галереи проведена оценка величины группового показателя преломления  $n_{gr} = 3.36$ . Увеличение уровня токовой накачки до 1.0 А приводило к возникновению дополнительных азимутальных мод высшего порядка, что подтверждалось появлением дополнительных спектральных линий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10285, <https://rscf.ru/project/20-79-10285/>.

1. R. Szedlak et al., *Opt. Eng.*, **57**, 011005 (2017).
2. Z. Wang et al., *Opt. Express*, **27**, 22708 (2019).
3. D. H. Wu et al., *APL Mater.*, **5**, 035505 (2017).
4. А.В. Бабичев и др., *ФТП*, **56**, 908 (2022).

## ДВУХУРОВНЕВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ИНЖЕКЦИОННЫХ МИКРОДИСКАХ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ InAs/InGaAs

Микролазеры с дисковыми и кольцевыми резонаторами поддерживают распространение высокочастотных мод шепчущей галереи, обладают малыми латеральными размерами, а также возможностью вывода излучения в плоскости структуры, что определяет перспективу для их реализации в фотонных интегральных схемах. Использование массивов квантовых точек (КТ) в качестве активной области лазеров позволяет достичь малых пороговых токов, стабильной работы при высоких температурах, а также уменьшения влияния дефектов и поверхностной рекомбинации. Примечательным свойством КТ является возможность осуществления одновременной лазерной генерации через основной и возбужденный оптические переходы – т.н. двухуровневая генерация [1]. Особенности двухуровневой лазерной генерации обширно исследованы для полосковых лазеров с КТ, в то время как для инжекционных микродисковых (МД) лазеров такие исследования практически не проводилось. В связи с этим, настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям реализации двухуровневой лазерной генерации в МД лазерах с КТ.

В работе исследовались МД лазеры различных диаметров (9, 20, 24, 28 мкм) с самоорганизованными InAs/InGaAs КТ, выращенные методом МПЭ на подложках  $n^+$ -GaAs. Структура содержала 10 слоёв КТ, разделённых между собой слоями GaAs толщиной 35 нм. Слои с КТ были заключены между широкозонными эмиттерными слоями  $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$   $n$ - и  $p$ -типа легирования. Измерение спектров электролюминесценции (ЭЛ) микролазеров производилось при различных температурах с использованием решеточного монохроматора с охлаждаемой InGaAs ПЗС-матрицей.

В исследованиях МД лазеров большого диаметра лазерная генерация возникала при переходах с основного состояния КТ. При увеличении тока инжекции и достижении некоторого порогового значения возникает генерация на возбуждённом переходе КТ, что соответствует двухуровневой генерации. При дальнейшем росте тока накачки интенсивность ЭЛ на основном переходе начинает падать. Уменьшение диаметра МД лазеров приводит к росту пороговых токов для основного перехода, и соответствующему спаду для возбужденных переходов. Такая зависимость обусловлена ростом потерь при уменьшении диаметра МД из-за роста влияния дефектов и рекомбинации носителей заряда на границах. Кроме того, в работе были изучены температурные зависимости пороговых токов для лазерной генерации с участием основного и возбужденного состояний КТ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-00028.

1. A. Markus et al., *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1818 (2003).

А.С. Кудряцева (студ., 1 курс маг., НИУ МИЭТ, каф. КФН),  
Н.П. Некрасов (асп., 3 год, НИУ МИЭТ, каф. КФН),  
В.К. Неволин (д.ф.-м.н., проф., НИУ МИЭТ)

## ФОТОСЕЛЕКТИВНЫЕ КАНАЛЫ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ КОНЬЮГАТОВ ЗЕЛЕННЫХ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ БЕЛКОВ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Полупроводниковые однослойные углеродные нанотрубки (УНТ) и зеленые флуоресцентные белки (ЗФБ) являются перспективными элементами оптоэлектронных устройств [1]. Нанотрубки чувствительны и реагируют с окружающей средой, а их цилиндрическая форма позволяет минимизировать площадь контакта с белком, т.е. сохранить его структуру и избежать «тушения» флуоресценции. В возбужденном состоянии ЗФБ влияют на проводимость УНТ, именно таким образом нанотрубки преобразуют оптический сигнал в электрический.

В качестве канала полевого транзистора использовались полупроводниковые одностенные углеродные нанотрубки, выращенные методом химического осаждения из газовой фазы. С помощью фотохимической реакции к углеродным нанотрубкам были ковалентно присоединены предварительно генетически модифицированные зеленые флуоресцентные белки [2]. Хромофор, находящийся в ЗФБ, поглощает свет длиной волны 470 нм. Это приводит к возбуждению электрона и его дальнейшему туннелированию в нанотрубку. В зависимости от конфигурации места пришивки белка наблюдаются разные фотоотклики. В случае модификации ЗФБ остатком azF132 проводимость не восстанавливается после прекращения облучения, с конфигурацией azF204 система возвращается в исходное состояние. Такой эффект связан с разным расстоянием между хромофором и УНТ, влияющим на эффективность переноса заряда, а также наличием молекул воды, захватывающих электроны около остатка с конфигурацией azF132. Факторы, приводящие к денатурации белка [3], также влияют на светочувствительность конъюгата. Дегидрирование ЗФБ воздушной средой или атмосферой аргона приводит к потере оптического управления транзистором. Восстановление системы происходит путем повышения уровня влажности.

Облучение полевого транзистора светом длиной волны 470 нм приводит к заметному снижению проводимости на порядок за счет компенсации основных носителей заряда в нанотрубке фотогенерированными в белке электронами. Расстояние между хромофором и углеродной нанотрубкой влияет на восстановление системы. Так, транзисторы, модифицированные белком с остатками azF132 и azF204 можно рассматривать в качестве оптического элемента памяти и фоточувствительного элемента, соответственно.

1. Q. Ou et al., *Small*, **17**, 2007241 (2021).
2. S. K. Thomas et al., *Bioconjugate Chemistry*, **31**, 584-594 (2019).
3. R. Ando, H. Mizuno, A. Miyawaki, *Science*, **306**, 1370-1373 (2004).

М.И. Пауков (студ., 6 курс, МФТИ), Д.В. Красников (к.ф.-м.н., СколТех), Ю.Г. Гладуш (к.ф.-м.н., СколТех), А.Г. Насибулин (д.т.н., СколТех), С.С. Жуков (к.ф.-м.н., МФТИ), Б.П. Горшунов (д.ф.-м.н., МФТИ), Г.А. Командин (д.ф.-м.н., ИОФРАН), Дж. Ллойд-Хьюз (к.ф.-м.н., Институт Уорика), А.В. Арсенин (к.ф.-м.н., МФТИ), В.С. Волков (к.ф.-м.н., МФТИ), М.Г. Бурданова (к.ф.-м.н., МФТИ, ИФТТ)

## РАСТЯГИВАЕМЫЕ ПЛЕНКИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК КАК ОПТО-МЕХАНИЧЕСКИ КОНТРОЛИРУЕМЫЕ МОДУЛЯТОРЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Терагерцовое излучение нашло применение в различных сферах жизни, начиная от детектирования взрывоопасного оружия и заканчивая исследованием опухолей. Обладая широкой пропускной способностью и малым затуханием, терагерцовые волны способны обеспечить безопасную связь, что делает их надёжным кандидатом для высокоскоростной передачи данных. Модуляция сигнала – это важная характеристика, которая должна быть учтена при разработки таких коммуникаций. Она определяется проводимостью среды, через которую проходит терагерцовое излучение. Это позволяет контролировать параметры модуляции оптически, термически или электростатически.

Традиционные полупроводниковые материалы, такие как GaAs, Ge and Si, имеют либо высокую глубину модуляции, либо высокую скорость модуляции (сотни ГГц). По сравнению с трёхмерными аналогами, оптически контролируемые низкоразмерные материалы, например, графен, дихалькогениды переходных металлов, углеродные нанотрубки (УНТ) [1] показывают одновременно высокие глубину и скорость модуляции. При этом растягиваемых модуляторов с такими высокими показателями не найдено.

В данной работе изучались параметры оптической модуляции терагерцового сигнала при прохождении через тонкие плёнки одностенных УНТ, нанесённых на растягиваемую подложку, методом спектроскопии оптической накачки терагерцовой пробы. Такие образцы зарекомендовали себя как потенциальные кандидаты для перестраиваемой оптоэлектроники [2]. Тем не менее, одновременное опто-механическое модулирование терагерцового сигнала прежде не изучалось. С этой целью, было проведено исследование поведения фотопроводимости в зависимости от ряда параметров: относительного удлинения и сжатия плёнки, расположения по отношению к поляризации терагерцового излучения, толщины плёнки. Мы представили интерпретацию изменения параметров фотопроводимости в зависимости от растяжения, отметив факторы, влияющие на изменение фотопроводящих путей. Полученные модуляторы также были охарактеризованы с практической точки зрения: были отмечены широкий диапазон глубины модуляции (от 5 до 100%) и малое время релаксации фотовозбуждённых носителей зарядов (порядка 10 пс), Данное исследование позволяет создавать устройства перестраиваемой оптоэлектроники перспективные в терагерцовых системах передачи информации.

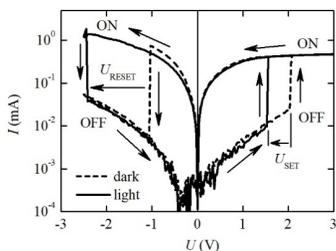
1. P. Gilshteyn et. al., *ACS Applied Materials and Interfaces* **11** (30) (2019) 27327–27334.
2. M. G. Burdanova et.al., *Carbon* **173** (2021) 245–252.

М.А. Рябова (студ., 4 курс, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Физический факультет),  
 Д.О. Филатов (д.ф.-м.н., в.н.с., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, НОЦ ФТНС).

## ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫЙ МЕМРИСТОР НА ОСНОВЕ ПЛЕНКИ $ZrO_2(Y)$ С НАНОЧАСТИЦАМИ Au

Мемристор – элемент энергонезависимой компьютерной памяти нового поколения на основе конденсаторной структуры, сопротивление диэлектрика в котором может изменяться под действием электрического напряжения, приложенного к обкладкам [1]. В последнее время усилился интерес к мемристорам, сопротивление которых может меняться под действием света. Развитие данного направления может в перспективе составить основу новой отрасли науки и техники – *мемристивной оптоэлектроники*.

В настоящей работе получены и исследованы лабораторные макеты оптически переключаемых мемристоров на основе плёнок  $ZrO_2(Y)$  ( $\approx 12\%$  мол. Y) толщиной 20 нм с массивами наночастиц (НЧ) Au диаметром 2-3 нм и плотностью  $\sim 10^{12}$  см<sup>-2</sup>, сформированными методом послойного магнетронного осаждения на подложки Si с подслоем Pt с последующим отжигом [2]. Размеры активной области составляли  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>. Верхние электроды выполнялись на основе прозрачных электропроводящих плёнок ИТО, чтобы обеспечить доступ излучения к активному слою НЧ Au в диэлектрике.



Обнаружено смещение напряжений переключения мемристора из состояния OFF в состояние ON и обратно ( $U_{SET}$  и  $U_{RESET}$ , соответственно) при фотовозбуждении лазерным диодом с длиной волны излучения 650 нм, соответствующей плазмонному резонансу в НЧ Au (рис. 1). Эффект связан с зарядением НЧ Au вследствие внутренней фотоэмиссии электронов из НЧ в матрицу  $ZrO_2(Y)$ , усиленной плазмонным резонансом [3]. Это приводит к перераспределению электрического поля вблизи НЧ и, как следствие, к сдвигу  $U_{SET}$  и  $U_{RESET}$ .

Рис. 1. Циклические ВАХ мемристора в темноте и при фотовозбуждении.

Результаты настоящей работы демонстрируют возможность создания оптически управляемых мемристоров на основе плёнок  $ZrO_2(Y)$  со встроенными массивами НЧ Au.

Работа выполнена при поддержке Министерства высшего образования и науки РФ (проектная часть государственного задания № 0729-2020-0058).

1. J. Zhu, T. Zhang, Y. Yang, R. Huang, *Appl. Phys. Rev.* **7**, 011312 (2020).
2. O. Gorshkov et al, *Adv. Mat. Sci. Eng.* 1759469 (2017).
3. A.S. Novikov et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54**, 485303 (2021).

**ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫЕ СУПЕРРЕЗОНАНСНЫЕ СОСТОЯНИЯ В МЕТАПОВЕРХНОСТЯХ  
НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ С ФАЗОВОЙ ПАМЯТЬЮ**

Решение задачи об эффективном удержании электромагнитных волн в среде имеет большой прикладной потенциал для создания сенсоров, лазеров и модуляторов. В настоящее время активно изучают связанные состояния в континууме (ССК), являющиеся идеальными резонансами с бесконечной добротностью. ССК могут существовать только в бесконечно протяженных системах. В реальных структурах существуют высокодобротные суперрезонансные моды [1], имеющие такой же механизм возникновения. Метаповерхности из высокоиндексных композитных материалов на основе соединения Ge-Sb-Te (GST) могут поддерживать устойчивые ССК, обусловленные резонансами Ми, возникающие в отдельных структурных элементах [2]. При комнатной температуре GST могут находиться в двух фазах, -кристаллической и метастабильной аморфной, с существенно отличающимися значениями диэлектрической проницаемости. Переключение фазы наиболее изученного соединения  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  в инфракрасном диапазоне сопровождается скачком диэлектрической проницаемости от 15 (аморфная фаза) до 35 (кристаллическая), как следствие включением и выключением суперрезонансного состояния.

В данной работе мы рассматриваем метаповерхность, состоящую из параллельных наноблоков с квадратным сечением размером  $50 \times 50 \text{ нм}^2$  и периодом решетки  $a=1 \text{ мкм}$ . Такая структура, изготовленная из композитного материала  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , поддерживает ССК на длине волны порядка 2 мкм, на которой поглощение материала низкое. Мы исследуем переключение суперрезонансной моды при изменении фазы GST. Физику данной трансформации удобно описывать при плавном переходе значений диэлектрической проницаемости от  $\epsilon=35$  (кристаллическая фаза) до  $\epsilon=15$  (аморфная фаза), хотя в реальной системе изменение фазы GST происходит скачком. Было обнаружено, что по мере уменьшения диэлектрической проницаемости резонансный пик смещается в высокочастотную область, а его добротность уменьшается. При достижении диэлектрической проницаемости критического значения пик исчезает, и структура перестает работать как метаповерхность.

Таким образом, было показано, что использование материалов с фазовой памятью позволяет создавать структуры, в которых наблюдаются переключаемые высокодобротные суперрезонансные состояния, поддерживаемые в режиме метаповерхности.

1. Han S. et al. All-Dielectric Active Terahertz Photonics Driven by Bound States in the Continuum //Advanced Materials. – 2019. – Т. 31. – №. 37. – С. 1901921.

2. Kodigala A. et al. Lasing action from photonic bound states in continuum //Nature. – 2017. – Т. 541. – №. 7636. – С. 196-199.

ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ДИНАМИКА РЕШЕТКИ  $\text{Li}_7\text{MnN}_4$  АНОДНОГО  
МАТЕРИАЛА ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

На сегодняшний день, литий-ионные аккумуляторы являются наиболее востребованными приборами хранения энергии. В коммерческих батареях, как правило, используются катоды на основе слоистых оксидов таких как  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNi}_{1-y-z}\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ ,  $\text{LiNiCoAlO}_2$ , шпинели  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$  и др [1]. Однако, при использовании графита в качестве анодного материала существует опасность - металлизация лития на поверхности анода, что может привести к существенным рискам безопасности использования этих аккумуляторов [2]. В качестве альтернативного анодного материала могут быть использованы структуры из семьи тернарных литий - переходный металл - азот соединений.  $\text{Li}_7\text{MnN}_4$  (LMN) является, по ряду причин, одним из наиболее перспективных соединений для применения в литий-ионных аккумуляторах в качестве анодного материала.

Твердофазной реакцией был синтезирован порошкообразный образец LMN и изучен экспериментально. С помощью метода уточнения структуры Ритвелда были получены структурные параметры, которые хорошо согласуются с результатами из опубликованных ранее работ, что говорит о высоком качестве синтезированных структур.

В рамках теории функционала плотности были изучены структурные параметры и электронная структура LMN. Структурная оптимизация надежно воспроизводит экспериментальные данные, тем самым подтверждая точность выбранного метода. Теоретический анализ электронной структуры показывает спиновое упорядочение электронных состояний. Получена величина ширины запрещённой зоны  $E_g = 0,95$  эВ, что хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными, что позволяет характеризовать это материал как узкозонный полупроводник.

Анализ фоновых состояний в Г-точке зоны Бриллюэна, дополненный расчётом рамановских интенсивностей колебательных мод структуры  $\text{LiMnN}$ , даёт хорошее согласие теории и эксперимента, благодаря чему выполнено надёжное отнесение всех наблюдаемых пиков в рамановском спектре. Было показано, что при использовании различных длин волны возбуждающего излучения можно наблюдать переход от нерезонансного к резонансному рамановскому спектру. Показано, что рамановская спектроскопия может быть использована как эффективный инструмент диагностики *in situ* для контроля деградации порошка LMN на открытом воздухе посредством наблюдения дополнительных полос в спектрах рамановского рассеяния. Таким образом, разработан неразрушающий метод контроля качества синтезированного материала.

1. Whittingham M.S., Chem. Rev. **104** (10) 4271-4301 (2004).

2. P. Münster, M. Diehl, J. EnnoFrerichs et al. Journal of Power Sources **484** 229306 (2021).

А.А. Скрылев (студ., 1 курс маг., ННГУ, ФПЭН),  
А. В. Нежданов (к.ф.-м.н., доц., ННГУ, ФПЭН), Д.В. Шестаков (ННГУ),  
А.И. Машин (д.ф.-м.н., проф., ННГУ), А.С. Маркелов (НИФТИ)

## ОПТИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК $ZnSnN_2$

В связи с увеличивающимся спросом на естественные, возобновляемые, нетоксичные и дешевые источники энергии, повысился интерес к преобразованию энергии солнечного излучения. Материалы на основе азотных соединений [1,2] в настоящее время вызывают особый интерес, а исследуемый в данной работе,  $ZnSnN_2$  (ZTN) является относительно новым и неизученным полупроводником из семейства Zn-IV-N<sub>2</sub>. Он является прямозонным с оптической шириной запрещенной зоны (ОШЗЗ) ~ 1,42 эВ [2], что согласно пределу Шокли-Кейссера позволяет получить практически максимальную эффективность солнечной ячейки (~34 %). В отличие от III-N, ZTN состоит из распространенных и нетоксичных элементов и обладает сильным поглощением в видимом диапазоне на порядок большим, чем поглощение c-Si. Описанные выше факты демонстрируют актуальность создания тонких, экологичных и дешевых пленок  $ZnSnN_2$ , благодаря которым может быть получена высокая эффективность солнечной ячейки. Также различные источники сообщают о потенциале применения ZTN в фотокатализе и оптоэлектронике.

Комплекс исследований выявил изменение оптических, структурных и электрических свойств плёнок  $ZnSnN_2$  при регулировке элементного состава. Исследуемые образцы были получены импульсным магнетронным распылением, а состав варьировался путем изменения мощности на источниках Zn или Sn и напуском азота в камеру. С увеличением содержания Zn уменьшалась концентрация основных носителей заряда  $n$  за счет образования акцепторных дефектов при замещении атома Zn-на-Sn [3], а вместе с этим увеличивалась ОШЗЗ (эффект Бурштейна-Мосса). Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) в совокупности с рентгеновским фазовым анализом (РФА) свидетельствуют о наличии кристаллической фазы в плёнках, но с беспорядком в катионной подрешетке, что указывает на неупорядоченную вюрцитную структуру. Спектрофотометрия показывает высокие значения поглощения, а также экспоненциальный спад при энергиях меньше ШЗЗ (область Урбаха), связанный с наличием в запрещённой зоне локализованных состояний и высокой плотностью дефектов в плёнке. Рассчитанная энергия Урбаха подтверждает результаты КРС и РФА.

Таким образом, исследованные в данной работе основные эффекты в пленках ZTN, связанные с изменением элементного состава, и влияющие на эффективность и работоспособность фотоэлектрического преобразователя на его основе, демонстрируют потенциал развития данного полупроводника в солнечной энергетике.

1. B. Gil, Group III nitride semiconductor compounds: physics and applications, Clarendon Press, (1998).
2. Tula R. Paudel, Walter R. L. Lambrecht et al., *Phys. Rev. B* **78** 115204 (2008).
3. Yong Wang, Takeo Ohsawa et al., *Appl. Phys. Lett.* **115** 232104 (2019).

Р.Д. Харисова (студ., 2 курс маг., Университет ИТМО),  
К.С. Зырянова (вед. инж., Университет ИТМО),  
А.Н. Бабкина (к.ф.-м.н., доц., Университет ИТМО)

## УПРАВЛЕНИЕ ШИРИНОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ СМЕШАННЫХ БРОМИДНО-ЙОДИДНЫХ ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ В БОРОГЕРМАНАТНОЙ СТЕКЛООБРАЗНОЙ МАТРИЦЕ

С момента их первого синтеза в растворах в 2015 году [1] цезиевые свинцово-галлоидные перовскитные нанокристаллы успели захватить внимание многих научных групп, и уже получены лабораторные образцы различных устройств: лазеры с низким порогом генерации, светодиоды, фотодетекторы, однофотонные излучатели и солнечные батареи [2]. Такой интерес вызван набором полезных свойств: перовскиты являются прямозонными полупроводниками, имеют большие коэффициенты поглощения и излучения, узкие полосы люминесценции, а также возможность генерировать излучение в диапазоне от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного излучения, управляя составом нанокристаллов и их размером [3]. Однако, сами перовскитные нанокристаллы не устойчивы к воздействию окружающей среды, влажности и температуры, необходимы какие-либо защитные покрытия или носители. Стеклообразные матрицы выглядят одним из наиболее надежных материалов для инкапсуляции перовскитов, т.к. имеют высокие механическую и химическую прочность, а также стабильны в большом диапазоне температур.

В работе был синтезирован ряд борогерманатных стеклокерамик, содержащих смешанные нанокристаллы  $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{I}_{1-x})_3$ , где  $x = 1; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0$ . Были измерены спектры поглощения этих стеклокерамик при комнатной температуре и температуре кипения жидкого азота, спектры люминесценции, а также квантовый выход.

В результате получен ряд стеклокерамик, у которых полоса экситонной люминесценции сдвигается в длинноволновую область в диапазоне от 518 до 683 нм при замещении брома на йод. Подобный сдвиг испытывает и первый экситонный максимум поглощения. Кроме того, при замещении на ионы галогена большего радиуса наблюдается тенденция к увеличению абсолютного квантового выхода люминесценции. Длинноволновый сдвиг экситонных линий в нанокристаллах может быть связан в том числе с размерным эффектом, однако в случае наших объектов исследования размер кристаллов оставался довольно малым (менее 10 нм) для всего экспериментального ряда. Наличие кристаллов подтверждено результатами дифракции рентгеновских лучей. Таким образом, посредством эквимолярной замены ионов брома на ионы йода в нанокристаллах  $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{I}_{1-x})_3$  возможно осуществлять плавное изменение параметров кристаллической решетки и, вследствие этого, изменение оптических свойств материала в целом.

1. L. Protesescu et al., *Nano Lett.*, 15, 6, 3692–3696 (2015).
2. R.V. Aich, *Phys. Rev. Applied*, 11(3), 034042 (2019).
3. M.M. Stylianakis et al., *Materials*, 12(6), 859 (2019).

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

	<i>№ доклада</i>	<i>Стр.</i>			
Адамов Р.Б.	У-9	33	Кияницын С.Ю.	ГСКЯ-6	52
Авдеев П.Ю.	ГСКЯ-1	46	Клименко Г.А.	У-8	84
Аладинская Е.С.	ГСКЯ-2	47	Климов А.А.	У-39	100
Аланкина А.В.	ГСКЯ-3	48	Кобцев Д.А.	ПОиН-3	101
Амельчук Д.Г.	ПР-1	20	Ковач Я.Н.	У-33	102
Афанасьев К.М.	КТКН-1	79	Конюх Д.А.	ОСП-1	8
Баженов А.О.	У-24	49	Копытов П.Е.	У-40	105
Балунов П.А.	У-20	24	Костромин Н.А.	ПР-5	28
Баранов А.И.	ПОиН-1	94	Кудрявцева А.С.	У-50	107
Барсуков Л.А.	ПР-2	25	Кузнецов А.	У-3	67
Батаев М.Н.	У-7	63	Кулебякина Е.В.	У-14	68
Бегичев И.В.	У-10	50	Кункель Т.С.	ПР-6	21
Березина Д.С.	У-43	95	Кутузова А.А.	У-16	110
Богословский Н.А.	У-5	7	Лакунцова О.Е.	ОСП-2	14
Большаков В.О.	КТКН-2	64	Лендяшова В.В.	КТКН-6	85
Бондаренко Д.Н.	У-49	65	Лещенко Е.Д.	КТКН-7	62
Бурмистров Е.Р.	У-27	32	Литвяк В.М.	У-1	9
Бутюгина А.А.	У-4	51	Лихачев К.В.	У-37	103
Быков А.М.	ПД-1	5	Любомиров А.Д.	У-28	38
Ведь М.В.	У-30	96	Мажукина К.А.	У-48	53
Вейшторг И.П.	У-15	13	Майдэбура Я.Е.	ПР-7	19
Вячеславова Е.А.	У-41	97	Максимов М.А.	ГСКЯ-7	54
Гаваладжян С.П.	КТКН-3	80	Малых Д.А.	У-6	29
Граф С.В.	ГСКЯ-4	34	Мальков Д.А.	ПР-8	30
Гридчин В.О.	КТКН-4	66	Марков Д.П.	КТКН-8	69
Дашков А.С.	ГСКЯ-5	35	Мельниченко И.А.	КТКН-9	70
Дерибина Е.И.	У-47	81	Месяков С.Р.	У-36	86
Дмитриева О.А.	У-19	36	Мкртчян М.А.	КТКН-10	71
Завьялова Е.С.	КТКН-5	82	Моисеенко И.М.	У-32	72
Захарченко М.В.	У-23	37	Моняк А.А.	ПР-9	31
Здоровейцев Д.А.	ПР-3	26	Назаров Р.С.	У-44	15
Иванов А.Е.	ПОиН-2	98	Норватов И.А.	У-26	55
Иванов М.С.	У-17	99	Осинных И.В.	ОСП-3	10
Караборчев А.А.	У-45	106	Пантюхина П.А.	ГСКЯ-8	56
Караулов Д.А.	У-31	83	Папылев Д.С.	КТКН-11, У-13	87, 88
Кельнер О.А.	ПР-4	27	Парфенов М.В.	У-2	89

Пауков М.И.	У-22	108	Смирнова В.А.	КТКН-13	92
Перетокин А.В.	У-34	90	Снегирев А.В.	У-11	58
Петров А.С.	ГСКЯ-9	39	Соломникова А.В.	ОСП-6	12
Петрук А.Д.	ОСП-4	11	Стрыгин И.С.	ГСКЯ-12	43
Пихтин Н.А.	ПД-2	6	Султанов О.Ш.	У-38	59
Разова А.А.	У-21	40	Тальнишних Н.А.	ГСКЯ-13	44
Ракицкий М.А.	У-18	57	Татаринов Д.А.	ПР-11	23
Резник Р.Р.	ПР-10	22	Федина С.В.	КТКН-14	75
Ромшин А.М.	У-29	73	Фоминых Б.М.	ОСП-7	17
Ростовцев Н.Д.	КТКН-12	74	Фоминых Н.А.	У-46	93
Рудаков А.О.	У-12	41	Харисова Р.Д.	НМ-3	113
Рябова М.А.	ПОиН-4	109	Харченко А.А.	КТКН-15	76
Савельев В.В.	ГСКЯ-10	42	Чиглинцев Э.О.	КТКН-16	77
Савин А.В.	НМ-1	111	Чуманов И.В.	ГСКЯ-14	60
Сапожникова Е.В.	ПОиН-5	104	Шугабаев Т.М.	У-35	78
Сарыпов Д.И.	У-42	91	Яковлева А.А.	ОСП-8	18
Скворцов И.В.	ГСКЯ-11	45	Янцер А.А.	У-25	61
Скрылев А.А.	ОСП-5, НМ-2	16, 112			

# **ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОСТРУКТУР, ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

Тезисы докладов  
Всероссийской научной молодежной конференции

28 ноября – 2 декабря 2022 года

Санкт-Петербург

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

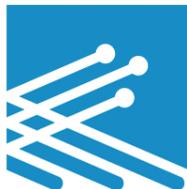
---

Подписано в печать 14.11.2022. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 7,25. Тираж 130. Заказ 4933.

---

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



# ТИДЕКС

НАУЧНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ ОПТИКА

**ОПТИКА ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ, FTIR И ТЕСТИРОВАНИЯ:** внеосевые параболические зеркала, делители-компенсаторы для FTIR, плоские и сферические зеркала, окна, призмы, голографические notch-фильтры, ИК-поляризаторы, ATR-элементы

**ОПТИКА ДЛЯ ПИРОМЕТРИИ И ТЕРМОГРАФИИ:** фронтальная оптика для тепловизионных ИК-систем: сферические и асферические линзы из Si, Ge (включая EMI-grade), ZnSe и ZnS, защитные стекла, обтекатели, иллюминаторы, ИК защитные окна для дронов



**ОПТИКА ДЛЯ СЕНСОРОВ И ДЕТЕКТОРОВ:** компоненты для высокотемпературных сенсоров, пиранометров, пиргеометров, для  $C_2H_2$ -,  $NH_3$ -,  $CO_2$ -, CO- и  $CH_4$ -детекторов

**ОПТИКА ДЛЯ МЕТРОЛОГИИ И КЛИМАТОЛОГИИ:** защитные колпаки для пиранометров, фильтры для пиргеометров, кварцевые рассеиватели, защитные колпаки с фильтрующим покрытием (фильтры нейтральной плотности)



**ТГц ПРИБОРЫ:** импульсный терагерцовый спектрометр ITS-2, детекторы Голея, комплекс для работы детекторов Голея с ПК, оптико-механический модулятор ОМС-1, комплекс калибровки детекторов Голея, ТГц сканирующий интерферометр Фабри-Перо, синхронный усилитель SU-1, электрооптический детектор импульсного ТГц излучения

**ТГц УСТРОЙСТВА:** дифракционные решетки, аттенуаторы, объективы, расширители пучка, изолятор, отрезающие и полосовые фильтры, кюветы

**ТГц ПОЛЯРИЗАТОРЫ:** плёночные поляризаторы, проволочные поляризаторы, проволочные поляризаторы микроволнового излучения, широкополосные фазовые преобразователи, перестраиваемый преобразователь поляризации, волновые пластинки

**ТГц ОПТИКА:** окна, линзы, асферические f-theta линзы, призмы, зеркала, эталон Фабри-Перо, спектроделители, лучеделители

**ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ:** просветляющие, диэлектрические отражающие, металлические, комбинированные, ИК-солнцезащитные, алмазоподобные, токопроводящие, ТГц просветляющие покрытия

**ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ:** Ge, Si (включая HRFZ-Si), ZnS, ZnSe, CaF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub>, сапфир (оптический и профилированный), LiNbO<sub>3</sub>, CdSe, KBr, NaCl, KCl, плавленый и кристаллический кварц, стекло, ситалл, TPX, ZEONEX

Система менеджмента качества, распространяющаяся на производство и реализацию продукции компании, сертифицирована по GOST R ISO 9001-2015 (ISO 9001:2015).

Информацию о продукции можно получить на вебсайте компании: [www.tydex.ru](http://www.tydex.ru).

ООО «ТИДЕКС», 194292 Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, д. 16.

Тел: (812) 334-67-01, (812) 331-87-02 Факс: (812) 309-29-58

E-mail: [optics@tydex.ru](mailto:optics@tydex.ru)



# ТИДЕКС

НОВАЯ ТЕРАГЕРЦОВАЯ ПРОДУКЦИЯ



**ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕРАГЕРЦОВЫЙ СПЕКТРОМЕТР ITS-2:** прибор для широкополосной терагерцовой спектроскопии во временной области (Terahertz Time-Domain Spectroscopy). С помощью ITS-2 можно получить спектральные характеристики и оптические свойства материалов в ТГц диапазоне частот. ITS-2 обладает высокой мощностью ТГц излучения и широким рабочим диапазоном частот. Прибор идеально подходит для научных исследований.  
**Основные параметры:** спектральный диапазон: 0.2+3 ТГц; динамический диапазон: не менее 40 дБ; максимальная временная задержка: 450 пс; спектральное разрешение: не более 40 ГГц.



**ПРОВОЛОЧНЫЕ ПОЛЯРИЗАТОРЫ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ:** предназначены для поляризации излучения от 2-3 ГГц до 300 ГГц. Они представляют собой опривленные в раму параллельные вольфрамовые проволоки диаметром 20 мкм без подложки.

**Основные параметры:** спектральный диапазон:  $\geq 600$  мкм; диаметр оправы: до 152 мм; рабочая апертура: до 136 мм; пропускание желательной поляризации K1:  $> 95\%$ ; пропускание нежелательной поляризации K2:  $< 0,1\%$ ; коэффициент экстинкции  $E=10^{\text{Log}(K1/K2)}$ :  $> 30$  Дб.



**ТГц ПРОВОЛОЧНЫЕ ПОЛЯРИЗАТОРЫ:** предназначены для поляризации излучения от 150 мкм до сантиметровых длин волн. Они представляют собой опривленные в рамку параллельные вольфрамовые проволоки диаметром 11 мкм без подложки.

**Основные параметры:** спектральный диапазон:  $\geq 150$  мкм; диаметр оправы: до 152 мм; рабочая апертура: до 136 мм; пропускание желательной поляризации K1:  $> 92\%$ ; пропускание нежелательной поляризации K2:  $< 0,1\%$ ; коэффициент экстинкции  $E=10^{\text{Log}(K1/K2)}$ :  $> 30$  Дб.



**НОВАЯ МОДИФИКАЦИЯ ТГц СКАНИРУЮЩЕГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО:** прибор предназначен для измерения длины волны и интенсивности узкополосного ТГц излучения.

**Основные параметры:** рабочий диапазон частот: 0.1+15 ТГц / 0.02+15 ТГц; световой диаметр: 26 мм / 52 мм; область свободной дисперсии: 0.1+1.8 ТГц; точность установки зазора:  $\pm 1.25$  мкм.



**ТГц ИЗОЛЯТОР:** невзаимное устройство, которое пропустит излучение только в одном направлении.

**Основные параметры:** рабочий диапазон частот: 0.2+0.65 ТГц; пропускание в прямом направлении: не ниже 20%; пропускание в нежелательном направлении: не более 10%; изоляция: не ниже 20 дБ; апертура: 25 мм (стандартная) или  $> 25$  мм (по запросу); длина 35 мм; диаметр: 60 мм.



**ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР ОМС-1:** предназначен для модулирования непрерывного или квазинепрерывного оптического излучения за счет перекрытия пучка излучения непрозрачным металлическим диском с отверстиями (CW2, CW10).

**Основные параметры:** частота модуляции: CW2 - 5+80 Гц / CW10 - 30+500 Гц; стабильность частоты модуляции: CW2 -  $\pm 0.03$  на 5 Гц,  $\pm 0.3$  на 80 Гц / CW10 -  $\pm 0.05$  на 30 Гц,  $\pm 0.5$  на 500 Гц; частота модуляции, автоматически устанавливающаяся при включении: CW2 - 20 Гц / CW10 - 100 Гц.

Система менеджмента качества, распространяющаяся на производство и реализацию продукции компании, сертифицирована по GOST R ISO 9001-2015 (ISO 9001:2015).

ООО «ТИДЕКС», 194292 Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, д. 16,  
тел.: (812) 334-67-01, (812) 331-87-02, факс: (812) 309-29-58,  
e-mail: [optics@tydex.ru](mailto:optics@tydex.ru), веб-сайт: [www.tydex.ru](http://www.tydex.ru)