

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

27 ноября – 1 декабря 2023 года

Санкт-Петербург



**ПОЛИТЕХ-ПРЕСС**

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

Санкт-Петербург

2023

ББК 22.3  
Ф48

**Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника** : тезисы докладов Всероссийской научной молодежной конференции, 27 ноября – 1 декабря 2023 г., Санкт-Петербург. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 116 с.

ISBN 978-5-7422-8329-4

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023

## ОРГАНИЗАТОРЫ И СПОНСОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

### Организаторы конференции

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

### Финансовая поддержка

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
(Госзадание Минобрнауки РФ №075-03-2023-004)  
ООО «Тидекс»  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

### Программный комитет

*Председатель* – Р.А. Сурис, академ. РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН  
*Заместитель председателя* – Д.А. Фирсов, СПбПУ, С.-Петербург

### Члены комитета:

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

М.С. Каган, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,  
Москва  
О.С. Комков, СПбГЭТУ "ЛЭТИ",  
С.-Петербург  
В.П. Кочерешко, ФТИ им. А.Ф. Иоффе,  
С.-Петербург  
А.А. Саркисян, Российско-армянский  
университет, Ереван, Армения  
Д.Р. Хохлов, МГУ, Москва  
Т.В. Шубина, ФТИ им. А.Ф. Иоффе,  
С.-Петербург

### Организационный комитет

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

### Члены организационного комитета:

Е.В. Владимирская, СПбПУ, С.-Петербург  
Т.А. Гаврикова, СПбПУ, С.-Петербург  
В.Э. Гасумянц, СПбПУ, С.-Петербург  
А.Ю. Егоров, Алфёровский университет,  
С.-Петербург  
В.А. Зыков, СПбПУ, С.-Петербург

В.П. Кочерешко, ФТИ им. А.Ф. Иоффе,  
С.-Петербург  
Г.А. Мелентьев, СПбПУ, С.-Петербург  
В.Ю. Паневин, СПбПУ, С.-Петербург  
А.А. Саркисян, РАУ, Ереван, Армения  
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)	21
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ, СВЕРХРЕШЕТКИ, КВАНТОВЫЕ ЯМЫ (ГСКЯ)	33
КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ, КВАНТОВЫЕ НИТИ И ДРУГИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ (КТКН)	61
ПРИБОРЫ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ (ПОиН)	83
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ (НМ)	106
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	114

**ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИМПУЛЬСЫ**

Непрерывное продвижение в укорочении электромагнитных, и прежде всего лазерных импульсов, диктуется предоставляемой короткими импульсами возможностью наблюдения динамики все более быстрых процессов. Если пико- и фемтосекундные импульсы позволяют отслеживать движение атомов в молекулах и при химических реакциях, то Нобелевская премия по физике 2023 г. «За экспериментальные методы генерации аттосекундных импульсов света для изучения динамики электронов в материи» знаменует прорыв в область внутриатомных процессов. В связи с этим актуален вопрос о пределах укорочения электромагнитных импульсов.

В докладе рассматриваются подходы к генерации аттосекундных импульсов, основанные, главным образом, на суммировании большого числа сфазированных гармоник лазерного излучения. Такие гармоники могут генерироваться в разреженных газах и в лазерной плазме. Длительность формируемых импульсов тем меньше, чем больше число гармоник с заметными и приблизительно равными амплитудами. Важно, что импульсы состоят из большого числа осцилляций электрической напряженности  $E$  с полуциклами противоположной полярности. В то же время, при исчерпании возможностей расширения спектра за счет увеличения гармоник, средства нелинейной оптики позволяют не только уменьшать число осцилляций поля, но и разделять импульс на изолированные полуциклы, в пределах которых полярность не меняется. Тем самым, предельно короткие импульсы оказываются униполярными. Основной характеристикой подобных импульсов служит электрическая площадь импульса  $S_E = \int E dt$ , где  $t$  – время.

Мы проанализируем основные электродинамические свойства импульсов с ненулевой электрической площадью. Мы продемонстрируем, что эффективность воздействия на объекты, содержащие электрические заряды, предельно коротких импульсов (с длительностью, меньшей характерных временных масштабов объекта) определяется именно электрической площадью импульса. Это вызвано однонаправленным воздействием на заряды униполярных импульсов, в отличие от биполярных с противоположным по знаку действием полуциклов противоположной полярности. Будут представлены экспериментальные свидетельства существования униполярных импульсов, обсуждены перспективы их приложений и возможные пути эффективной генерации.

## РАСПАД ВАКУУМА В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ КУЛОНОВСКОМ ПОЛЕ

Практически сразу после создания релятивистской квантовой теории в 30-х годах XX века в работах Заутера, Гейзенберга и Эйлера было предсказано спонтанное рождение электрон-позитронных пар стационарным электрическим полем при условии, что напряженность этого поля становится по порядку величины близкой или больше некоторой критической величины, которая в случае однородного поля составляет  $E_{cr} \sim 10^{16}$  В/см. Точная квантовоэлектродинамическая теория этого эффекта была сформулирована позднее в работах Швингера. Несмотря на огромный интерес к этому уникальному эффекту, до настоящего времени его экспериментальное наблюдение не представлялось возможным в силу огромного значения критической величины поля. Некоторые надежды в этом направлении были связаны с недавним прогрессом в развитии лазерных технологий. Однако даже самые оптимистические сценарии развития этих технологий предсказывают значение экспериментально достижимого поля сильно меньше критического значения.

Другая возможность создания сверхкритического поля возникает в медленных столкновениях тяжелых ионов, если суммарный заряд сталкивающихся ядер превышает критическое значение,  $Z_1 + Z_2 > Z_c = 173$  (например, при столкновении двух ядер урана). Спонтанное рождение электрон-позитронных пар в таких столкновениях было независимо предсказано в работах советских ученых Герштейна и Зельдовича, а также немецких ученых Грайнера и Пипера. В таком столкновении изначально нейтральный вакуум может самопроизвольно распадаться на заряженный вакуум и два позитрона. Экспериментальное обнаружение спонтанного рождения позитронов стало бы прямым доказательством этого фундаментального явления. Однако спонтанное рождение позитронов обычно сильно экранируется динамическим рождением позитронов, которое индуцируется быстро меняющимся во времени электрическим полем, создаваемым сталкивающимися ядрами. В течение 3-х десятилетий считалось, что распад вакуума можно наблюдать только в столкновениях с ядерным слипанием, когда ядра связываются на некоторое время из-за ядерных сил. Но на сегодняшний день нет никаких доказательств слипания ядер при таких столкновениях тяжелых ионов. В наших недавних работах [3-5] было показано, что вакуумный распад можно наблюдать без какого-либо слипания ядер. Это может быть сделано с помощью измерений вероятностей образования пар или спектров позитронов для заданного набора ядерных траекторий. Результаты этого исследования будут представлены в докладе.

1. С.С. Герштейн, Я.Б. Зельдович, ЖЭТФ **57**, 654 (1969).
2. W. Pieper and W. Greiner, Z. Phys. **218**, 327 (1969).
3. I.A. Maltsev, V.M. Shabaev, R.V. Popov et al., Phys. Rev. Lett. **123**, 113401 (2019).
4. R.V. Popov, V.M. Shabaev, D.A. Telnov et al., Phys. Rev. D **102**, 076005 (2020).
5. R.V. Popov, V.M. Shabaev, I.A. Maltsev et al., Phys. Rev. D **107**, 116014 (2023).

## ОБЪЕМНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ (ОСП)

УДК 537.9

А.В. Батуева (асп., 2 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОФТТ;  
САФУ им. М.В. Ломоносова, лаб. ДУМиСОЯШП),  
Р.А. Бабунц (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОФТТ),  
А.С. Гурин (к.ф.-м.н., н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОФТТ),  
К.В. Лихачев (асп., 2 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОФТТ;  
САФУ им. М.В. Ломоносова, лаб. ДУМиСОЯШП),  
Е.В. Единач (к.ф.-м.н., н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОФТТ),  
П.Г. Баранов (д.ф.-м.н., г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОФТТ)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАР Mn-Mn В ОБЪЕМНЫХ СЛОИСТЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ GaS:Mn И GaSe:Mn МЕТОДОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭПР

Слоистые материалы, в частности полупроводники GaS и GaSe, состоящие из квазидвумерных S-Ga-Ga-S и Se-Ga-Ga-Se слоев, имеющих гексагональную структуру, представляются крайне перспективными для применений в оптоэлектронике и спинтронике. Сильно анизотропная структура приводит к интересным свойствам, таким как простота формирования слоев с толщинами вплоть до монослоя и зонной структурой, резко отличающейся по сравнению с объемными образцами. Легирование переходными элементами позволяет создать полуизолирующие и магнитные материалы, формируя спиновые центры, которые могут использоваться как носители информации для устройств спинтроники. Детальное изучение парамагнитных центров, их зарядового состояния и особенностей встраивания в решетку является крайне важным для применения в устройствах нанoeлектроники.

В настоящей работе представлены результаты исследования пар Mn-Mn методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) на частотах 94 и 130 ГГц при температурах около 6 К на ЭПР/ОДМР спектрометре, разработанном в ФТИ им. А.Ф. Иоффе [1]. Определены параметры ферромагнитно связанных пар  $Mn^{2+}$ -  $Mn^{2+}$ , встроенных в позиции ковалентно связанных атомов  $Ga^{2+}$ , расположенных вдоль аксиальной оси кристалла GaS:Mn. Определены параметры тонкой структуры и параметр изотропного обменного взаимодействия. Для кристалла GaSe:Mn зарегистрированы спектры антиферромагнитно связанных аксиальных пар Mn-Mn со спином  $S=2$  двух типов. Для них определены параметры эффективного спинового гамильтониана [2] для центра с  $S=2$ . Как для GaS, так и для GaSe наблюдаются сигналы от одиночных центров  $Mn^{2+}$  с  $g \approx 2.0$  и  $S = 5/2$  в разных позициях. Для всех сигналов наблюдается хорошо разрешенная сверхтонкая структура – 6 линий для одиночных центров  $Mn^{2+}$  и 11 линий для пар  $Mn^{2+}$ -  $Mn^{2+}$ .

Исследование выполнено при поддержке государственного задания Российской Федерации № FSRU-2020-0008.

1. R.A. Babunts et al., Appl. Magn. Reson. **51**, 1125–1143 (2020).
2. A. Bencini and D. Gatteschi, Electron Paramagnetic Resonance of Exchange Coupled Systems (Springer, Heidelberg, 1990).

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

## ПРОЯВЛЕНИЕ ЯДЕРНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ В ОПТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Ядерные локальные поля в полупроводниках формируются за счет участия ядер в спиновых взаимодействиях, которые включают себя как межъядерные спин-спиновые взаимодействия, так и взаимодействия ядерных спинов (в случае, если изотопы имеют спин по величине больше  $\frac{1}{2}$ ) с градиентами электрических полей (ГЭП) [1]. Наличие ГЭП в полупроводниковых кристаллах приводит к увеличению локального поля (дает квадрупольный вклад) [2]. Для большинства полупроводников групп  $A^3B^5$  и  $A^2B^6$  к спин-спиновым взаимодействиям относятся магнитное диполь-дипольное взаимодействие, а также косвенные взаимодействия через валентные электроны (обменное и псевдодипольное) [3]. При этом ГЭП в полупроводниковых кристаллах могут быть вызваны как деформацией решетки [2], так и зарядовыми состояниями примесей [4]. Поэтому локальное поле можно считать некоторым “паспортом” изучаемого кристалла.

Локальное поле ядер является основной термодинамической характеристикой ядерной спиновой системы (ЯСС) полупроводника и играет важную роль в оптических экспериментах по детектированию ядерной намагниченности (в частности, в оптически-детектируемом ЯМР). Динамическая поляризация ЯСС оптически ориентированными по спину электронами [1] позволяет исследовать среднюю намагниченность ЯСС в слабых магнитных полях. В этих условиях спин-спиновые и квадрупольные взаимодействия ядер проявляются наиболее ярко [2,4]. Проявление ядерных взаимодействий в оптических экспериментах как в слабых (порядка локальных полей), так и в сильных внешних магнитных полях позволяет измерять величину локального поля и устанавливать природу его формирования [2-4]. Из ЯМР экспериментов известно, что локальные поля вносят вклад в ширину линии поглощения [1]. Одним из прямых методов измерения ядерного локального поля является размагничивание ЯСС, предварительно оптически охлажденной в сильном магнитном поле [2,4]. В данной работе представлен обзор оптических экспериментов по детектированию ядерной намагниченности, в которых проявляются ядерные локальные поля. Эксперименты были проведены на кристаллах  $n$ -GaAs и на квантовой яме CdTe/CdZnTe.

1. A. Abragam, *The Principles of Nuclear Magnetism* (1961).
2. V.M. Litvyak et al., *Phys.Rev.B*, **104**, 235201 (2021).
3. D. Paget et al., *Phys.Rev.B*, **15**, 5780 (1977).
4. V.M. Litvyak et al., *arXiv:2305.18912 [cond-mat.mtrl-sci]* (2023).



М.Д. Рагоза (асп., 2 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Н.В. Козырев (н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
С.В. Некрасов (к.ф.-м.н., и.о. м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Б.Р. Намозов (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Ю.Г. Кусраев (д.ф.-м.н., зав. лаб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ РАССЕЯНИЕМ ОПТИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В n-GaAs

Эффекты, связанные со спин-зависимым транспортом, помимо фундаментального имеют важное прикладное значение, поскольку они могут использоваться для передачи и обработки информации в устройствах спинтроники. Интерес к арсениду галлия в контексте спин-зависимого транспорта обусловлен как широким применением материала в современной электронике, так и хорошо изученными спиновыми свойствами. Спиновый транспорт в арсениде галлия, в отличие, например от кремния, исследован недостаточно подробно, что связано со значительно меньшими временами спиновой релаксации.

В настоящей работе мы сообщаем об эффекте спин-зависимого рассеяния в системе свободных и донорных электронов в объемных пленках GaAs легированных Si (концентрация доноров  $1.15 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). Спин-зависимое рассеяние проявляется в возникновении магнитосопротивления в слабых полях ( $B \sim 1 \text{ Гс}$ ) при условии оптической ориентации спинов электронов. Приложение магнитного поля перпендикулярно спинам электронов (вдоль направления проходящего через образец электрического тока) приводит к деполяризации спинов носителей и уменьшению электрического сопротивления материала.

Для исследования магнитосопротивления, образец помещался в криостат с температурой 1.5К, спины носителей ориентировались циркулярно-поляризованным лучом лазера. Полученная магнитолевая зависимость сопротивления имеет вид кривой Лоренца с полушириной в 1 Гс, что согласуется с шириной кривой эффекта Ханле. Зависимость магнитосопротивления чётна относительно поляризации накачки ( $\sigma^+/\sigma^-$ ). При линейно-поляризованном освещении эффект не наблюдался, что позволило сделать вывод о спиновой природе наблюдаемого явления. Амплитуда эффекта резонансно зависит от энергии фотовозбуждения, максимум соответствует энергии свободных экситонов, с ростом температуры и электрического тока амплитуда эффекта падает.

Экспериментальные данные были объяснены в рамках модели спин-зависимого рассеяния свободных и донорных электронов [1]. Наблюдаемое уменьшение сопротивления объясняется изменением синглетного и триплетного вкладов в сечение рассеяния зонных электронов на нейтральных донорах при спиновой деполяризации магнитным полем.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ № 23-12-00205.

1. R. Maxwell and A. Honig, Phys. Rev. Lett. 17, 188 (1966).

И.В. Шевченко (асп., 2 год, МГУ им. М.В. Ломоносова, каф. ФНТиСП),  
Е.П. Скипетров (д.ф.-м.н., проф., МГУ им. М.В. Ломоносова, каф. ФНТиСП)

### РЕЗОНАНСНАЯ ПРИМЕСНАЯ ЗОНА КОБАЛЬТА В СПЛАВАХ $Pb_{1-x}Sn_xTe$

Полупроводники  $A^4B^6$  с примесями 3d переходных металлов исследуются уже более 40 лет. В настоящее время наиболее изученными являются сплавы  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ , легированные хромом и ванадием, а материалы с примесями из второй половины этой группы, в особенности из ее конца, исследованы гораздо хуже. В то же время именно они вызывают повышенный интерес, т.к. в них примесные уровни могут находиться на фоне состояний «тяжелой»  $\Sigma$ -зоны, приводя к увеличению термоэлектрической эффективности сплавов [1].

В настоящей работе исследованы фазовый и элементный состав и гальваномагнитные свойства ( $4.2 \leq T \leq 300$  К,  $B \leq 0.07$  Тл) образцов из двух монокристаллических слитков  $Pb_{1-x-y}Sn_xCo_yTe$  ( $x=0.08$ ,  $y=0.01$  и  $y=0.02$ ), синтезированных методом Бриджмена. Установлено, что концентрации олова и кобальта увеличиваются вдоль слитков ( $x=0.06-0.14$ ,  $y < 0.01$ ). Все исследованные образцы характеризуются дырочной проводимостью. При увеличении концентрации олова удельное сопротивление при  $T=4.2$  К медленно уменьшается, а коэффициент Холла уменьшается в 3 раза и более, чем на порядок в образцах из двух слитков, указывая на значительное увеличение концентрации дырок. В то же время на температурных зависимостях коэффициента Холла  $R_H(T)$  наблюдается монотонный рост примерно в 2–2.5 раза. Подобное аномальное поведение величины  $R_H$  подробно исследовалось ранее в родственных сплавах  $Pb_{1-x-y}Sn_xFe_yTe$  р-типа [2,3] и объяснялось пиннингом уровня Ферми резонансным уровнем железа, расположенным в валентной зоне, и перераспределением электронов между уровнем и валентной зоной при изменении их взаимного расположения с ростом содержания олова и при увеличении температуры.

По экспериментальным данным в рамках двухзонного закона дисперсии Кейна получены зависимости концентрации дырок и положения уровня Ферми относительно потолка валентной зоны при  $T=4.2$  К от концентрации олова для образцов из каждого слитка. Показано, что непротиворечивое объяснение полученных результатов возможно в рамках модели, предполагающей появление в валентной зоне резонансной примесной зоны, емкость которой зависит от концентрации кобальта, а положение и степень заполнения электронами – от состава матрицы. Определена скорость движения примесной зоны относительно потолка валентной зоны при изменении содержания олова, оценены ее ширина и энергетическое положение в  $PbTe$ . Предложены диаграммы перестройки электронной структуры сплавов в условиях «мягкой» стабилизации уровня Ферми в примесной зоне при увеличении концентрации олова и температуры для образцов из двух исследованных слитков.

1. J.P. Heremans et al., *Science*, **321**, 554 (2008).
2. E.P. Skipetrov et al., *J. Alloys Compd.*, **775**, 769 (2019).
3. E.P. Skipetrov et al., *Semiconductors*, **53**, 1419 (2019).

Д.В. Бабин (студ., 4 курс, Академический университет им. Ж.И. Алферова),  
Д.А. Конюх (асп., 3 год, и.о. м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
И.О. Райков (студ., 6 курс, лаборант, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
Я.М. Бельтюков (к.ф.-м.н., и.о. зав. сек., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

## СТРУКТУРА МЯГКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ МОД В АМОРФНОМ КРЕМНИИ

Микроскопическая структура и природа аморфного состояния вещества в настоящее время является предметом интенсивных исследований, что связано, в том числе, с получением и синтезированием новых аморфных наноструктурированных материалов [1]. Одним из широко используемых на практике аморфных материалов является аморфный кремний, который применяется в солнечных элементах. Исследования методом нейтронного рассеяния и комбинационного рассеяния показывают наличие в аморфном кремнии избыточного количества низкочастотных колебательных возбуждений — характерной особенности аморфных веществ, называемой бозонным пиком [2, 3]. Низкочастотная часть бозонного пика связана с мягкими квазилокальными колебательными модами. Это долгоживущие колебания аномально мягких участков аморфных сред. Такие мягкие колебательные моды определяют основной вклад в рассеяние акустических фононов и существенно влияют на теплопроводность, теплоемкость и распространение звука в аморфных полупроводниках и диэлектриках. Однако исследование природы квазилокальных колебаний осложнено рядом факторов, в том числе влиянием структурного коррелированного беспорядка на их статистические свойства.

Для изучения структурных особенностей квазилокальных колебаний нами применены методы молекулярной динамики для аморфного кремния и методы теории коррелированных случайных матриц, эффективно описывающие бозонный пик и критерий Иоффе-Регеля в аморфных твердых телах [4, 5]. Результаты молекулярно-динамических расчетов показывают, что количество и структурные свойства квазилокальных колебаний сильно зависят от процессов и скоростей охлаждения, влияющих на образование аномально мягких участков системы. При этом пространственная структура мягких мод описывается уравнением диффузии на малых масштабах, соизмеримых с масштабом неоднородности. Этот результат согласуется с результатами теории случайных матриц, которая позволила определить наиболее важные статистические свойства пространственной структуры мод и показать, что они состоят из диффузионного ядра и упругого диполя на больших расстояниях.

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

1. N. Tambo et al. *Science Advances* **6**, eabc0075 (2020).
2. W.A. Kamitakahara et al., *Phys. Rev. B*, **36**, 6539 (1987).
3. C. Laermans, M. Coeck., *Physica B: Condensed Matter*, **263**, 280 (1999).
4. Y.M. Beltukov, V.I. Kozub, D.A. Parshin, *Phys. Rev. B*, **87**, 134203 (2013).
5. D.A. Conyuh, Y.M. Beltukov, *Phys. Rev. B*, **103**, 104204 (2021).

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННО-ЯДЕРНОЙ СПИНОВОЙ СИСТЕМЫ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ  
СЛОЯХ GaAs:Mn

Последние десятилетия активно обсуждается идея использования спиновых состояний носителей для обработки и хранения информации. Важную роль для спинтроники играет изучение характеристик электронно-ядерной спиновой системы, таких как времена электронной и ядерной спиновой релаксации.

В настоящей работе представлено экспериментальное исследование динамики электронно-ядерной спиновой системы в объемном GaAs:Mn при температуре 4,2 К. Ранее эксперименты показали, что при легировании GaAs акцепторами Mn наблюдается подавление механизма электронной спиновой релаксации Бира-Аронова-Пикуса [1].

Для изучения электронной спиновой динамики были измерены серии кривых Ханле и кривых восстановления электронной спиновой поляризации в продольном магнитном поле при модуляции знака циркулярной поляризации накачки при различной мощности возбуждения. Из анализа экспериментальных данных была получена зависимость времен электронной спиновой релаксации от мощности накачки. Зависимость ведет себя немонотонным образом. До некоторого значения мощности возбуждения время электронной спиновой релаксации возрастает до значений 200 нс, затем происходит убывание за счет механизма Бира-Аронова-Пикуса. Рост времени электронной спиновой релаксации связан с подавлением релаксации спина электрона, вызванной флуктуирующим полем дырок.

Для определения времен ядерной спиновой релаксации были измерены серии кривых изменения степени циркулярной поляризации люминесценции при адиабатическом размагничивании. Зависимости были измерены при различных величинах поперечного магнитного поля. Из анализа экспериментальных данных мы получили значения эффективного ядерного магнитного поля и времени ядерной спиновой релаксации –  $T_1$  в зависимости от величины приложенного внешнего поперечного магнитного поля.

Время ядерной спиновой релаксации возрастает в зависимости от величины внешнего магнитного поля и достигает максимального значения 12 секунд для исследуемого образца. Для p-GaAs [2] величина времени ядерной спиновой релаксации не зависит от величины приложенного поперечного поля и составляет 100 миллисекунд. Такое малое время обусловлено квадрупольной релаксацией в флуктуирующем поле дырок, прыгающих на заряженные акцепторы. В нашем случае вероятность прыжков дырок между центрами глубоких акцепторов Mn мала и время ядерной спиновой релаксации оказывается на порядок больше.

1. G.V. Astakhov et al., *Phys. Rev. Lett.*, **101** 076602 (2008).
2. M. Kotur et al., *Phys. Rev. B.*, **97** 165206 (2018).

И.П. Вейшторг (студ., 6 курс маг., ИТМО, ФТМФ; САФУ им. М.В. Ломоносова),  
А.М. Скоморохов (студ., 6 курс маг., ИТМО, ФТМФ; САФУ им. М.В. Ломоносова),  
М.В. Учаев (студ., 6 курс маг., ИТМО, ФТМФ; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ СПИНОВЫХ ЦЕНТРОВ В ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ И РОМБИЧЕСКИХ ПОЛИТИПАХ SiC МЕТОДОМ АНТИПЕРЕСЕЧЕНИЯ УРОВНЕЙ

Несмотря на высокую степень изученности основного состояния (ОС) вакансионных центров со спином  $S=3/2$ , спиновые свойства в возбужденном состоянии (ВС) не рассматривались до недавнего времени. ВС определяют природу оптического выстраивания. Поскольку ВС обладают малыми характерными временами жизни в пределах десяти нс, фиксировать их удаётся за счёт высокой чувствительности оптического метода детектирования и большей амплитуды микроволнового поля, обеспечивающего существенную вероятность перехода в течение времени жизни [1]. Понимание свойств системы энергетических уровней возбужденного состояния имеет решающее значение для разработки сверхбыстрых, полностью оптических методов управления спином.

В работе представлены сигналы антипересечения спиновых уровней (АПУ), зарегистрированные по изменению фотолюминесценции (ФЛ) в магнитном поле в основном и возбужденном состояниях для спиновых центров с  $S = 3/2$ . Наблюдаемая сильная температурная зависимость расщепления в нулевом поле в возбужденном состоянии позволяет сделать вывод о применимости рассматриваемых ВС центров в приложениях квантовых датчиков температуры. Благодаря тому что структура ВС определяет поляризацию излучаемой фотолюминесценции, исследование поляризационных зависимостей линий центров даёт информацию об их структуре. Эти эксперименты позволили определить параметры линий ВС и связать их с параметрами ОС.

Известно, что сверхтонкое взаимодействие в ВС в NV-центрах проявляется значительно интенсивнее [2]. В этой связи представляет интерес возможность динамической поляризации ядер, обусловленная перекрытием волновых функций. Представленные закономерности дают существенное представление о структуре излучающего возбужденного состояния, которое может быть использовано для обработки квантовой информации на основе SiC для высокоскоростных когерентных оптических манипуляций с одиночными спинами, а также для протоколов запутывания.

Исследование выполнено при поддержке государственного задания Российской Федерации № FSRU-2020-0008.

1. Anisimov A. N. et al. High-temperature spin manipulation on color centers in rhombic silicon carbide polytype 21R-SiC // JETP Letters. – 2020. – Т. 112. – С. 774-779.
2. Fuchs G. D. et al. Excited-state spectroscopy using single spin manipulation in diamond // Physical review letters. – 2008. – Т. 101. – №. 11. – С. 117601.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПИН-ЗАВИСИМОГО ФОТОННОГО ЭХА ДЛЯ АНСАМБЛЯ  
ИЗОЛИРОВАННЫХ ТРЕХУРОВНЕВЫХ СИСТЕМ

Изучение взаимодействия электромагнитного излучения с веществом является одним из фундаментальных аспектов физики. Исследование процессов, происходящих со средой под действием излучения, позволяет получить уникальную информацию о физических свойствах вещества, его составе, структуре. Это играет важную роль в нашем понимании природы [1]. В настоящее время активно применяются знания о взаимодействии излучения с веществом для развития технологий. Подтверждением тому являются успехи в электронике, создании новых способов работы с оптической информацией, разработка новых видов лазеров [2]. Таким образом, принципиально важной задачей является создание теоретических моделей. Несмотря на кажущуюся сложность всестороннего описания процессов, которые происходят в веществе под действием излучения, существуют модели, объясняющие важные явления за счет упрощения с физической точки зрения. Например, влияние излучения на многоэлектронные атомы в ряде случаев можно свести к рассмотрению переходов электронов между определенными уровнями, так как влияние остальных уровней гораздо менее существенно или даже пренебрежимо мало. Такие модели, в частности, позволяют описать эффекты четырехволнового смешивания и фотонного эха, которые имеют перспективу в качестве физической реализации квантовой памяти, лежащей в основе квантовой коммуникации.

В настоящей работе были изучена модель взаимодействия электромагнитного излучения с веществом на примере действия поляризованного прямоугольного лазерного импульса на трехуровневую систему. Было получено решение для нерезонансного возбуждения светом системы с вырожденными возбужденными энергетическими состояниями без учета релаксации. Была проанализирована зависимость вероятности нахождения системы в определенном состоянии от величин отстройки частоты и площади импульса. Полученные аналитические выражения были применены при моделировании сигнала двухимпульсного фотонного эха от ансамбля трехуровневых систем. Рассматривались последовательное действие двух коротких поляризованных лазерных импульсов на трехуровневые системы и динамика систем, описываемых уравнениями Блоха. Получены временные профили сигнала эха для протоколов возбуждения импульсами разной поляризации и разной мощности.

1. Аллен Л., Эберли Дж. «Оптический резонанс и двухуровневые атомы».
2. Мандель Л., Вольф Э. «Оптическая когерентность и квантовая оптика».

Д.А. Караулов (студ., 1 курс маг., СПбПУ),

А.А. Саркисян (РАУ, Армения),

Н.А. Костромин, Г.А. Мелентьев, М.Я. Винниченко, Д.А. Фирсов, В.А. Шалыгин (СПбПУ)

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА GaN, GaAs И InSb В СРЕДНЕМ И ДАЛЬНЕМ ИНФРАКРАСНЫХ ДИАПАЗОНАХ

Современные приборы опто- и наноэлектроники разрабатываются на основе различных полупроводников А<sup>III</sup>В<sup>V</sup>. Нитрид галлия, вследствие уникальной комбинации физических свойств, является перспективным материалом для создания оптических приборов не только видимого, но и инфракрасного диапазонов. Арсенид галлия является востребованным полупроводником для создания различных оптических приборов вследствие хорошо отлаженной технологии роста структур. Антимонид индия – полупроводник, демонстрирующий одно из самых больших значений подвижности электронов. Работа многих оптоэлектронных приборов сопровождается разогревом носителей заряда в электрическом поле, поглощение излучения на неравновесных носителях заряда существенно влияет на их функционирование. Для анализа поглощения излучения в электрическом поле необходима информация о поглощении в равновесных условиях. Цель настоящей работы – экспериментальное и теоретическое исследование равновесного поглощения излучения на свободных электронах в данных полупроводниковых материалах.

Экспериментально исследовано оптическое пропускание микроструктур на основе гексагонального нитрида галлия при  $T = 300$  К. Образцы представляли собой пленки *n*-GaN ( $n = 10^{17} - 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), выращенные на сапфире поверх нелегированного буферного слоя GaN. В среднем инфракрасном (СИК) диапазоне наблюдалась интерференционная картина, период которой позволил определить суммарную толщину буферного и легированного слоев (6.3–6.4 мкм в исследованных структурах). Было проведено моделирование спектров пропускания микроструктур методом матриц переноса. Учитывались два вклада в диэлектрическую проницаемость GaN: решеточный (модель однофононного резонанса) и электронный (модель Друде). Путем анализа экспериментальных спектров пропускания для дальнего инфракрасного (ДИК) диапазона в рамках рассмотренной модели найдены концентрации и подвижности свободных электронов в слоях *n*-GaN. Они отличаются от результатов холловских измерений в 1.5–2 раза, при этом удовлетворительно описывают спектры пропускания также и в СИК диапазоне. Показано, что модель Друде позволяет адекватно описать эксперимент и рассчитать коэффициент поглощения на свободных электронах для широкого диапазона концентраций в GaN. Аналогичные расчеты были проведены в GaAs и InSb. Для экспериментального исследования поглощения, в том числе в условиях разогрева носителей внешним электрическим полем, в СИК области удобно использовать CO<sub>2</sub>-лазер (длина волны излучения 10.6 мкм). На основе расчетов выбраны оптимальные концентрации и подвижности электронов, а также толщины слоев GaN, GaAs и InSb для проведения данных экспериментов. В качестве подложки целесообразно использовать кремний.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-12-00036).

Н.П. Пахольчук (студ., 4 курс бак., СПбГУ, каф. ФТТ),  
В.М. Литвяк (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ, Лаборатория Оптики Спина им. И.Н. Уральцева)

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНОЙ СПИНОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ОПТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ В СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

В твердых телах, в частности, в полупроводниках, ядра кристаллической решетки, которые имеют ненулевой спин, обладают магнитным моментом [1]. Магнитные моменты ядер малы по сравнению с магнитным моментом электрона. Это приводит к экспериментальным трудностям при изучении явлений, связанных с ядерным магнетизмом. В частности, при приложении магнитного поля не удастся получить значительную ядерную намагниченность. Для создания ядерной намагниченности применяют методы динамической поляризации ядер, заключающиеся в передаче электронной поляризации ядерным спинам. Например, с помощью эффекта Оверхаузера ядерная поляризация достигается за счет изменения поляризации электронов при приложении переменного поля на резонансной частоте электронных переходов. Другим методом является солид - эффект, заключающийся во взаимном перевороте ядерного и электронного спинов при поглощении энергии переменного магнитного поля на разностной частоте прецессии спинов. В этих методах требуется, чтобы образец находился в сильном магнитном поле. Однако, существует метод динамической поляризации ядер при оптической ориентации электронов, который эффективен в слабых магнитных полях, порядка ядерных локальных полей [2].

В *n*-легированных полупроводниках, находящихся в слабых магнитных полях (не превышающих локального поля ядер), ядерная спиновая поляризация (ЯСП) создается благодаря сверхтонкому взаимодействию ядерных спинов с локализованными на донорных центрах электронными спинами. Создание ЯСП (ядерного поля) сопровождается понижением температуры ядерной спиновой системы (ЯСС). При выключении внешнего магнитного поля ядерное поле равно нулю, а спиновая температура сохраняется на масштабах времен спин-решеточной релаксации ЯСС [2].

В данной работе будут представлены экспериментальная методика [3], позволяющая изучать характеристики, оптически охлажденной ЯСС, а также экспериментальные данные по детектированию изменения ядерного поля при различных условиях эксперимента. Информацию о температуре и поле ЯСС удастся получить, изучая влияние ядерного поля на электронную спиновую поляризацию.

1. A. Abragam, *The Principles of Nuclear Magnetism* (1961).
2. *Optical Orientation*, под ред. F. Meier, В.Р. Zakharchenya (1984).
3. V.M. Litvyak et al., *Phys. Rev. B*, 104, 235201 (2021).



В.А. Пшеничный (студ., 2 курс маг., МГУ им. М.В. Ломоносова),  
Т.В. Дубинина (к.х.н., в.н.с., МГУ им. М.В. Ломоносова),  
К.А. Дроздов (к.ф.-м.н., ст. преп., МГУ им. М.В. Ломоносова)

## РАЗРУШЕНИЕ ПРОВОДЯЩЕГО СОСТОЯНИЯ ПЕРЕМЕННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ В КОМПЛЕКСАХ НА ОСНОВЕ НАФТАЛОЦИАНИНОВ

На сегодняшний день полупроводники с элементами пониженной размерности активно используются для многих практических приложений. Одним из направлений является работа с эффектом резистивных переключений. Данный эффект заключается в возможности управляемого обратимого перехода между двумя состояниями с различными электросопротивлениями ( $R_{on}$  и  $R_{off}$ ). Одним из вариантов структуры с таким свойством является композит на основе органической матрицы, пронизанной металлическими нанонитями. Формирование нанонитей происходит в сильных электрических полях за счёт инъекции ионов металла из контакта и их самоорганизации. При протекании через нити тока происходит тепловыделение. При достижении критических токов происходит лавинообразный разрыв нитей.  $R_{on}$  отвечает ситуации, когда нанонити замыкают контакты,  $R_{off}$  – ситуации с многочисленными разрывами для каждой из нитей.

В настоящей работе использовались пленки толщиной 0,2, 1,0, 1,5 мкм на основе нафталоцианинатов с центральным атомом магния и серебряными нанонитями. Цель работы заключалась в определении механизмов, отвечающих за нарушение стабильности низкоомного состояния  $R_{on}$  переменным электрическим полем.

Экспериментально подтверждено наличие резистивных переключений в исследованных структурах ( $R_{on} \sim 1$  Ом,  $R_{off} > 1$  ГОм). Обнаружены метастабильные состояния с активными сопротивлениями  $R_m$  ( $R_m \ll R_{off}$ ) и реактивными емкостными сопротивлениями.

Показано, что в переменном электрическом поле для всех структур можно выделить 4 диапазона частот. В интервале  $[0, \omega_1]$  состояние  $R_{on}$  стабильно. В интервале  $[\omega_1, \omega_2]$  происходили кратковременные самопроизвольные переходы между  $R_{on}$  и  $R_m$ . С увеличением частоты величина  $R_m$  монотонно уменьшалась вплоть до значений  $R_{on}$ , а частота переходов  $R_m$ - $R_{on}$  увеличивалась. В интервале  $[\omega_2, \omega_3]$  наблюдалась стабилизация метастабильного состояния с сопротивлением  $R_m < R_{on}$ . Структуры устойчиво находились в метастабильном состоянии  $R_m$ . При частотах  $> \omega_3$  происходили кратковременные самопроизвольные переходы между  $R_{on}$  и  $R_m$ . С увеличением частоты величина  $R_m$  монотонно возрастала до значений, наблюдаемых при  $\omega_1$ , а частота переходов  $R_m$ - $R_{on}$  уменьшалась.

В работе обсуждаются механизмы, ответственные за возникновение эффектов на разных частотах внешнего электрического поля. Предлагается качественная модель, объясняющая всю совокупность наблюдаемых эффектов.

А.М. Скоморохов (студ., 6 курс маг., ИТМО, фак. ФТМФ; САФУ им. М.В. Ломоносова),  
И.П. Вейшторг (студ., 6 курс маг., ИТМО, фак. ФТМФ; САФУ им. М.В. Ломоносова),  
Р.А. Бабунц (к.ф.-м.н., с. н.с., ФТИ им А.Ф. Иоффе РАН, отд. ФТТ)

## СЕЛЕКТИВНАЯ ОДМР-РЕГИСТРАЦИЯ NV-ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ АЛМАЗА ПРИ ПОМОЩИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Уникальные свойства азотно-вакансионных (NV) центров позволяют осуществлять оптическое детектирование магнитного резонанса (ОДМР) при комнатной температуре в нулевом и малых магнитных полях. NV-центры активно применяются в качестве сенсоров магнитного поля и температуры. Они также могут служить источником одиночных фотонов и материальной платформой для реализации высокоточной квантовой запутанности. Для использования NV-центров в квантовых операциях и сенсорах необходимо учитывать время когерентности, которое зависит от времени спин-спиновой релаксации. Отрицательно заряженная азотная вакансия (NV<sup>-</sup>) содержит шесть электронов и имеет основное триплетное состояние, где спиновые уровни могут быть заселены оптическим излучением [1]. NV-центры в кристаллической решетке алмаза имеют четыре оси симметрии, которые разрешаются во внешнем магнитном поле.

В данной работе были изучены поляризационные свойства фотолюминесценции и ОДМР NV-центров в кристаллах алмаза. Эти свойства могут быть применены для выборочной регистрации сигналов ОДМР NV-центров в различных направлениях и повышения контраста ОДМР. Было также проведено исследование поляризационных свойств ОДМР в различных магнитных полях, которое демонстрирует анизотропию угловой зависимости степени линейной поляризации для NV-центров. Это может быть связано с кристаллографическими свойствами NV-центров и позволяет получать данные об ориентациях NV-центров и кристаллической симметрии кристалла, а также изучать заданные направления путем изменения линейной поляризации селективно.

Исследование выполнено при поддержке государственного задания Российской Федерации № FSRU-2020-0008.

1. Braukmann D. et al., Anisotropies in the linear polarization of vacancy photoluminescence in diamond induced by crystal rotations and strong magnetic fields // *Physical Review B*. – 2018. – Т. 97. – №. 12. – С. 125426.

М.Р. Шарнас (студ., 1 курс маг., СПбПУ, ВИФШ),  
Д.А. Пшенай-Северин (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## РАСЧЕТЫ РЕШЕТОЧНЫХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ CoSi ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

Моносилицид кобальта и твердые растворы на его основе являются перспективными термоэлектриками, так как обладают высоким термоэлектрическим фактором мощности и механической прочностью. Для повышения термоэлектрической эффективности данных материалов требуется снизить теплопроводность решетки. В работе исследуется возможность такого снижения с использованием метода твердых растворов. С помощью первопринципных расчетов получены фононные спектры, полная и проекционная плотности фононных состояний изоструктурных соединений RhSi, RhSn. Проведены расчеты температурной зависимости теплопроводности этих кристаллов, а также твердых растворов CoSi-RhSi и RhSi-RhSn. Результаты расчетов показали, что теплопроводность решетки при комнатной температуре в RhSi составила 4.9 Вт/(м К), а в RhSn - 3.6 Вт/(м К), что значительно ниже, чем в чистом CoSi (около 10.4 Вт/(м К)). За счет дополнительного рассеяния на атомах замещения в твердых растворах CoSi-RhSi теплопроводность может быть снижена более чем в 3 раза по сравнению с чистым CoSi, а в твердых растворах RhSi-RhSn – более чем в 3 раза по сравнению с чистым кристаллом RhSi.

Д.А. Здоровейцев (студ., 1 курс маг., каф. ФПЭН, ННГУ; инж., НИФТИ ННГУ),  
Ю.А. Данилов (к.ф.-м.н., доц., каф. ФПЭН, ННГ; в.н.с., НИФТИ ННГУ)

### ИЗОВАЛЕНТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ВИСМУТОМ

В настоящее время ведутся активные поиски приемов изменения свойств полупроводников  $A^3B^5$ , в частности, GaAs, для расширения круга их возможных применений в нанoeлектронике. Одним из таких способов может выступать легирование изовалентными мышьяку примесями, например, висмутом. Введение висмута в GaAs приводит к существенному изменению его свойств. Так, сообщается об уменьшении ширины запрещенной зоны при введении небольших концентраций висмута [1]. Также известно о влиянии Bi на свойства полупроводникового материала спинтроники – разбавленного магнитного полупроводника GaMnAs [2].

В данной работе применены два подхода к легированию арсенида галлия висмутом: ионная имплантация и импульсное лазерное нанесение в вакууме (ИЛН). Ионной имплантацией висмута на ускорителе «Радуга 3М» были получены структуры GaAs:Bi. Для устранения радиационных дефектов структуры подвергались двум видам отжига – быстрому термическому отжигу в среде аргона и импульсному лазерному отжигу (ИЛО) эксимерным KrF лазером. Методом ИЛН путем распыления лазером твердотельной мишени, состоящей из секторов GaAs, Mn и Bi, были получены образцы GaMnAs:Bi и GaMnAs для их прямого сравнения. Для электрической активации марганца и восстановления структуры слоев был проведен импульсный лазерный отжиг. На структурах, полученных методом ионной имплантации, исследовались спектры отражения и пропускания, электротранспортные характеристики, проводилось исследование распределения примеси по глубине методом вторичной ионной масс-спектрометрии. На структурах, полученных методом ИЛН, исследовались магнитополевые зависимости сопротивления Холла и магнетосопротивления в диапазоне температур 7 - 300 К.

Показана возможность легирования GaAs висмутом в процессах и ионной имплантации, и ИЛН. Было экспериментально показано уменьшение ширины запрещенной зоны в GaAs:Bi. Соединение GaMnAs:Bi, сформированное в процессе ИЛН, является ферромагнетиком с температурой Кюри около 50 К, демонстрируя аномальный эффект Холла с петлей гистерезиса и отрицательное магнетосопротивление. При сравнении GaMnAs:Bi и GaMnAs было выявлено, что при введении висмута уменьшается температура Кюри, увеличивается коэрцитивное поле и величина магнетосопротивления. Обсуждаются возможные механизмы наблюдаемых явлений.

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и Министерства образования и науки РФ (проект № FSWR-2023-0024).

1. A.R. Mohmad et al. // Phys. Status Solidi B. – 2014. – V.251, n.6. – P.1276–1281.
2. T. Andrearczyk et al. // Materials. – 2020. - V.13, n.23. – N.5507.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ ПО ДАННЫМ *IN-SITU* РЕФЛЕКТОМЕТРИИ: PROOF-OF-CONCEPT МОДЕЛИРОВАНИЕ

Современное эпитаксиальное оборудование практически немислимо без инструментов *in-situ* методов характеристики и контроля. Одним из таких методов является лазерная рефлекто-/дефлектометрия, позволяющая проводить измерения толщины, показателей преломления и поглощения растущих слоёв, а также кривизны подложки. В большинстве случаев для простоты принято считать, что подложка изгибается по сферической поверхности, характеризующейся единственным значением радиуса кривизны во всех сечениях, и поэтому обычно измеряется некое усреднённое значение кривизны, и по изменению данного значения в процессе роста можно делать выводы о характере роста, а также рассчитывать возникающие механические напряжения используя, например, формулу Стоуни. Однако неоднородности по температуре и/или пластическая деформация могут приводит к сильной несферичности, особенно при росте на подложках большого диаметра [1, 2], что приводит к нелокальной зависимости механических напряжений от изгиба структуры [3] и делает формулу Стоуни неприменимой.

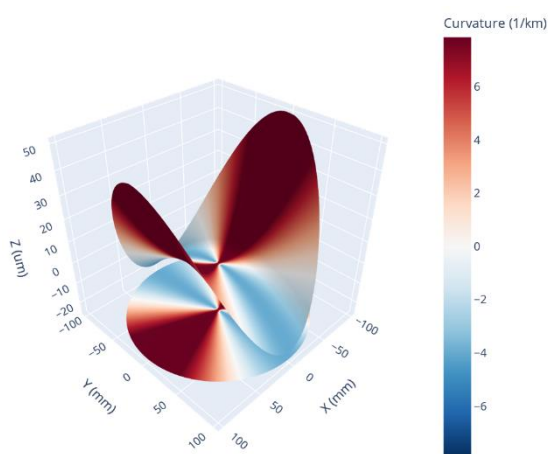


Рис. 1. Пример восстановленного трёхмерного профиля подложки.

В данной работе нами предложен алгоритм восстановления профиля поверхности подложки по данным многолучевой *in-situ* дефлектометрии. Для проверки работы алгоритма на основании законов геометрической оптики была проведена симуляция выходных данных измерений отклонения лазерных лучей в радиальном направлении  $r$  в случае соосного вращения подложки и подложкодержателя. Показано, что возможно восстановление трёхмерного профиля подложек

произвольной (в разумных пределах) формы и расчёт всех компонентов «кривизны»  $\kappa_{rr}$ ,  $\kappa_{\theta\theta}$  и  $\kappa_{r\theta}$  с хорошей точностью. Это позволит, по крайней мере частично, заменить проведение дополнительных *ex-situ* измерений геометрических параметров подложек, таких как изгиб и коробление, а также откроет возможности более подробно в динамике наблюдать эволюцию механических напряжений в процессе роста структур используя, например, подход из [3].

1. A. Dadgar *et al.*, *J. Cryst. Growth*, **370**, 278-281 (2013).
2. T. Thieme, K. Haberland, *ECS Trans.*, **44**(1), 1255, (2012).
3. D. Ngo *et al.*, *Int. J. Solids Struct.*, **44**(6), 1745-1754, (2007).

О.А. Гогина (асп., 3 год., СПбГУ, ЭТТ),  
Ю.В. Петров (к.ф.-м.н., доц., СПбГУ, ЭТТ),  
О.Ф. Вывенко (д.ф.-м.н., проф., СПбГУ, ЭТТ)

## КОМБИНИРОВАННОЕ ИОННОЕ И ЭЛЕКТРОННОЕ ОБЛУЧЕНИЕ КАК МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЕЙ В ГЕКСАГОНАЛЬНОМ НИТРИДЕ БОРА

В процессе роста монокристаллического гексагонального нитрида бора (*h*-BN) образуются собственные дефекты, природа которых на сегодняшний день остаётся неизвестной. Сейчас большое внимание уделено тем дефектам в *h*-BN, которые обладают люминесцентными свойствами, и рассматриваются как потенциальные источники одиночных фотонов (ИОФ) [1]. Гексагональный нитрид бора характеризуется тремя полосами люминесценции: 650 (1.9 эВ), 320 (3.9 эВ) и 215 нм (5.8 эВ), в видимом и ультрафиолетовом диапазонах длин волн оптического спектра.

На тонких монокристаллах *h*-BN на кремнии, представленных К. Ватанабе и Т. Танигучи (National Institute for Materials Science, Japan), было выполнено последовательное воздействие сфокусированным ионным пучком (ФИП) He<sup>+</sup> и облучение электронами. Для изучения кинетики электронного облучения были использованы монокристаллы *h*-BN производства Ossila Ltd. на кремниевой подложке. Ионное облучение с различными дозами выполнено на сканирующем ионно-гелиевом микроскопе Zeiss Orion с током пучка  $I=0.3$  Па и энергией  $E_{He}=30$  кэВ. Облучение сфокусированным пучком электронов и катодолюминесцентные (КЛ) исследования были проведены в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Zeiss Supra 40VP с системой регистрации Gatan Mono CL3+.

Облучение ФИП *h*-BN с дозами в диапазоне от  $5 \cdot 10^{13}$  до  $3.2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> приводит к гашению всех наблюдаемых полос люминесценции более чем на два порядка. Последующее длительное облучение электронами стимулирует рекомбинационно-усиленную миграцию дефектов, в результате которой образуются новые центры люминесценции, а в спектрах КЛ наблюдается быстрый рост интенсивности примесной полосы 1.9 эВ. Также показано управление люминесценцией полосы 3.9 эВ и полосы 5.8 эВ исключительно с помощью длительного электронного облучения. Такое воздействие приводит к нелинейному росту интенсивности полосы 3.9 эВ и к быстрому экспоненциальному гашению полосы 5.8 эВ с последующим насыщением. Варьируя параметры облучения электронным пучком, можно управлять характером роста и/или спада интенсивностей исследуемых полос.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-22-00067, <https://rscf.ru/project/23-22-00067/>. Экспериментальная часть выполнена на оборудовании междисциплинарного ресурсного центра по направлению “Нанотехнологии“ научного парка СПбГУ.

1. Aharonovich I., Englund D. and M. Toth., *Nature Photonics*, 10(10), 631-641, (2016).

И.В. Осинных (м.н.с., ИФП СО РАН, лаб. 18, асс., ВКИ НГУ, каф. ЕНД),  
Т.В. Малин (м.н.с., ИФП СО РАН, лаб. 18),  
В.Г. Мансуров (с.н.с., ИФП СО РАН, лаб. 18),  
Д.Ю. Протасов (н.с., ИФП СО РАН, лаб. 18),  
С.А. Пономарев (м.н.с., ИФП СО РАН, лаб. 20),  
Д.С. Милахин (м.н.с., ИФП СО РАН, лаб. 18),  
К.С. Журавлёв (д.ф.-м.н., в.н.с., ИФП СО РАН, лаб. 37)

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РОСТА СЛОЕВ GaN НА Si, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ АММИАЧНОЙ МЛЭ, НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ДОНОРОВ И ТОКИ УТЕЧКИ

На рынке мощной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники в последние годы растет доля транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктур AlGaN/GaN, которые вытесняют аналогичные приборы, созданные на основе Si и GaAs. Основным преимуществом гетероструктур на основе нитридов является большая ширина запрещенной зоны  $E_g$  ( $E_g=3.43$  эВ для GaN и  $E_g=6.2$  эВ для AlN против  $E_g=1.1$  эВ у Si и  $E_g=1.4$  эВ у GaAs), одним из важных следствий этого являются высокие напряжения пробоя исток-сток. Для высоких напряжений пробоя в HEMT важно получение высокого сопротивления буферного слоя GaN. Однако фоновые примеси из остаточной атмосферы ростовой камеры могут неконтролируемо встраиваться в GaN в процессе роста, основной из них является кислород, который приводит к n-типу проводимости буферного слоя. Управление содержанием фоновых примесей путем изменения ростовых условий – способ получения высокоомных слоёв GaN, лишенный риска ухудшения характеристик HEMT.

В данной работе исследовано влияние температуры роста на буферные токи утечки слоев GaN на подложках Si(111), выращенных методом аммиачной МЛЭ на установке Compact-21N в диапазоне температур 750–850°C. Токи утечки в выращенных структурах измерялись с помощью анализатора параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A; также структуры были исследованы методами фотолюминесцентной (ФЛ) спектроскопии; морфология поверхности была исследована методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Для возбуждения ФЛ использовались He-Cd лазер ( $\lambda_{\text{las}}=325$  нм) при измерении стационарной ФЛ и азотный лазер при измерении нестационарной ФЛ ( $\lambda_{\text{las}}=337$  нм) с длиной импульсов 7 нс и частотой повторений 1 кГц при комнатной температуре.

Показано, что наименьшими токами утечки обладают слои GaN, выращенные при повышенной температуре роста (температура роста 825 °С, буферный ток утечки 1 мА/мм при напряженности электрического поля 41 кВ/см), они также характеризуются наименьшей концентрацией центров безызлучательной рекомбинации. Оценена концентрация нейтральных доноров в слоях GaN из кинетики затухания желтой полосы ФЛ, обусловленной донорно-акцепторной рекомбинацией. Обнаружено, что снижение температуры роста может приводить к образованию инверсионных доменов в слоях GaN.

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ОБЛУЧЕНИЕМ  
УСКОРЕННЫМИ ИОНАМИ

В последние годы интенсивно проводятся исследования в области полупроводников, необходимых для создания нового поколения мощных электронных приборов и оптоэлектроники. Оксид галлия – один из многообещающих кандидатов, поскольку обладает следующими достоинствами: широкая запрещенная зона (4.4 – 5.3 эВ в зависимости от кристаллической фазы), высокие значения напряжения пробоя (8 МВ/см). Ионная имплантация широко используется в современной полупроводниковой технологии, в частности, при производстве электронных устройств. Известно, что облучение ионами всегда сопровождается образованием радиационных дефектов в мишени [1]. Мы проводим экспериментальное изучение влияния ионной бомбардировки на структурные и поверхностные свойства в  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Получены одни из первых данных по облучению  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ускоренными атомарными и молекулярными ионами с дозами от 5 до 45 ДПА. Рассмотрены процессы дефектообразования, а также прослежена поверхностная модификация облучаемой области. Ранее влияние на поверхность оксида галлия высокодозным облучением никем не исследовалось.

В рамках настоящей работы бомбардировка проводилась легкими одноатомными (Р), молекулярными (PF<sub>4</sub>) и тяжелыми одноатомными (Та) ионами с энергиями 40, 140 и 150 кэВ соответственно. Энергии и плотности потока ионов были подобраны так, что профили генерации первичных смещений совпадали. Установлено, что для невысоких доз (до 7 ДПА) на спектрах отчетливо видны поверхностный и объемный максимумы дефектов [2]. При увеличении дозы (от 7 до 45 ДПА) эти два пика сливаются в один. При малых дозах облучение молекулярными ионами эффективно для накопления приповерхностных повреждений, так как происходит перекрытие отдельных каскадов, создаваемых атомами, входящими в состав молекулы. Но с ростом дозы этот эффект исчезает. При исследовании топографии поверхности пленок  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с ростом дозы вплоть до 45 ДПА и среднеквадратичная шероховатость поверхности менялась не существенно (от 0,7 до 0,5 нм) независимо от типа ионов. Сглаживание и потеря детальности заметны лишь для мелкомасштабного рельефа. Толщина облученного слоя меняется незначительно.

Работа поддержана грантом РФФ 22-19-00166.

1. П.А. Карасев и др., Физика и техника полупроводников, том 56, вып. 9, с. 882-887 (2022).
2. A.I. Titov, et al., Vacuum 200, 111005, (2022).



Г.Э. Вторьгин (студ., 4 курс, Академический университет им. Ж.И. Алферова, каф. Физики и технологии наногетероструктур),  
А.И. Баранов (к.ф.-м.н., Академический университет им. Ж.И. Алферова, лаб. ВИЭ),  
А.С. Гудовских (д.т.н., Академический университет им. Ж.И. Алферова, лаб. ВИЭ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЕВ ВР, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ PECVD

На данный момент кремниевые технологии являются наиболее развитыми в наземной фотовольтаике, поэтому использование кремниевых подложек остается важным условием для создания эффективных солнечных элементов для массового производства. Одним из методов создания однопереходных солнечных элементов является формирование селективного контакта к кремниевой подложке. Перспективными материалами для формирования селективных контактов к кристаллическому кремнию являются полупроводниковые фосфиды вида  $A^3B^5$ . В работе [1] было теоретически показано, что фосфид бора является одним из наиболее многообещающих соединений для создания ППМ (прозрачный проводящий материал) р-типа к подложке n-Si, поскольку он обладает непрямой запрещенной зоной с большой разницей между энергиями прямого (4 эВ) и непрямого перехода (2 эВ), что ведет к широкому разрыву зоны проводимости на гетеропереходе р-ВР/n-Si, формируя таким образом селективный контакт для дырок.

В предыдущих исследованиях [2], слои ВР были выращены методом плазменно-химического осаждения из газовой фазы (PECVD) в непрерывном режиме из смеси газов триметилборана (ТМБ) и фосфина ( $PH_3$ ), использованных в качестве прекурсоров. Однако, в слоях было обнаружено высокое содержание углерода, а измерения ёмкостных характеристик выявили накопление электронного заряда на границе раздела ВР/Si, что может быть объяснено низколегированным или нелегированным ВР и пиннингом уровня Ферми на границе раздела ВР/Si из-за наличия поверхностных дефектных состояний. В данной работе был использован диборан вместо ТМБ, чтобы исключить наличие углерода в слоях ВР. Для предположений об эффективности солнечных элементов, базирующихся на переходе ВР/Si, было проведено исследование электрофизических свойств гетероперехода ВР/Si для структур, выращенных в различных условиях. С помощью вольт-амперных и вольт-фарадных методов получилось рассмотреть (количественно и качественно) термическую активацию проводимости в структурах, а методы спектроскопии полной проводимости (Admittance) и нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) позволили исследовать дефектные уровни в структурах.

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

1. Varley J.B. *et al*, *ACS Chemistry of Materials*, **2017** 29 (6) 2568–2573.
2. Maksimova A.A. *et al*, *ACS Applied Energy Materials*, **2022** 5 (5), 5367-5373.

В.С. Жданов (инженер-электроник, ИАПУ ДВО РАН),  
Д.А. Олянич (к.ф.-м.н., ИАПУ ДВО РАН),  
Л.В. Бондаренко (к.ф.-м.н., ИАПУ ДВО РАН),  
А.Ю. Тупчая (к.ф.-м.н., ИАПУ ДВО РАН),  
Ю.Е. Вековшинин (м.н.с., ИАПУ ДВО РАН),  
Д.В. Грузнев (д.ф.-м.н., ИАПУ ДВО РАН),  
А.Н. Михалюк (к.ф.-м.н., ДВФУ),  
Н.В. Денисов (к.ф.-м.н., ИАПУ ДВО РАН),  
А.В. Матецкий (к.ф.-м.н., ИАПУ ДВО РАН),  
Т.В. Утас (к.ф.-м.н., ИАПУ ДВО РАН),  
А.В. Зотов (член-корр. РАН, ИАПУ ДВО РАН),  
А.А. Саранин (член-корр. РАН, ИАПУ ДВО РАН)

### МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЛЁНКИ Ga НА ПОВЕРХНОСТИ Si(111)

Явление сверхпроводимости, открытое более века назад, всё еще привлекает внимание исследователей. Было показано, что данное явление обнаруживается в атомарно тонких плёнках, таких как плёнка Pb на поверхности Si(111) [1]. Однако критическая температура перехода  $T_c$  часто не соответствует объёмному значению и зависит от исследуемой системы. Так, если в плёнке свинца на поверхности Si(111) критическая температура перехода  $T_c = 1.1-1.83$  К меньше, чем у объёмного материала  $T_c = 7.2$  К, то в плёнке галлия на поверхности GaN(0001)  $T_c = 3.6-5.4$  К выше, чем в стабильной фазе объёмного материала  $T_c = 1.1$  К. Объяснить такую зависимость температуры затруднительно по причине неясности влияния вкладов подложки и структуры плёнки в сверхпроводимость.

Недавние исследования показали, что возможно получить трёхслойную плёнку галлия на поверхности Si(111) [2]. Ключевым в данной работе стало пассивирование кремниевой поверхности фазой  $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ga, что привело к изменению механизма роста со Странского-Крастанова на механизм Франка-ван-дер-Мерве. Полученные при таком механизме роста структуры вызывают исследовательский интерес: второй слой имеет графеноподобную сотовую структуру и был идентифицирован Тао и соавторами как галленен [2].

В нашем исследовании [3] мы сформировали галлиевые плёнки на поверхности Si(111) для изучения их сверхпроводящих свойств. Используя набор методов исследования поверхности, мы смогли детально определить структуру первого и второго слоёв галлия. Определенная нами структура пленки отличается от структуры, предложенной ранее в работе [2]. Также наши измерения проводимости при низких температурах демонстрируют отсутствие сверхпроводимости в данной системе, и переход ее в диэлектрическое состояние.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 19-12-00101, <https://rscf.ru/project/19-12-00101/>.

1. T. Zhang et al., *Nature Physics.*, **6**, 104–108 (2010).
2. M.L. Tao et al., *2D Materials.*, **5**, 035009 (2018).
3. L.V. Bondarenko et al., *MSDE.*, **8**, 604-610 (2023).

Е.Ф. Канафиева (студ., 4 курс бак., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», лаб. ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
И.А. Иванов (инж., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
И.А. Елисеев (к.ф.-м.н., н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Е.Ю. Лобанова (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ РОСТ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЕВ $WSe_2$ НА ПОВЕРХНОСТИ $CaF_2$

Важным направлением развития электроники является повышение надежности и качества транзисторов, а также уменьшение их размеров. Перспективным подходом к масштабированию электронных компонентов является создание устройств на основе двумерных кристаллов. Ввиду аморфности традиционных диэлектриков их интерфейсы с двумерными кристаллами имеют высокую концентрацию ловушек. Поэтому для дальнейшего развития двумерной электроники представляют интерес кристаллические изоляторы, такие как фторид кальция  $CaF_2$ . Целью настоящей работы было получение эпитаксиальных слоёв двумерного полупроводника  $WSe_2$  ( $E_g = 1,7$  эВ) на поверхности  $CaF_2(111)$ .

Образцы  $WSe_2$  были выращены на установке лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии. В качестве подложек использовались эпитаксиальные гетероструктуры  $CaF_2/Si(111)$ , выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Абляция материала поликристаллической мишени  $WSe_2$  происходила под действием импульсов эксимерного  $KrF$ -лазера ComrexPro 201 ( $\lambda \approx 248$  нм). Энергия лазерных импульсов варьировалась в пределах от 100 до 600 мДж. В процессе роста подложка нагревалась до 500 °С. В качестве буферного газа использовался аргон при давлениях от 0,05 до 0,2 мбар. Диагностика кристаллической структуры выращиваемых пленок проводилась в реальном времени посредством регистрации и анализа картин дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Кроме того, использовались атомно-силовая микроскопия и Рамановская спектроскопия.

Значительное внимание уделялось зависимости морфологии поверхности пленок от условий роста. Было выявлено, что повышение давления буферного газа до 0,2 мбар приводит к образованию трехмерных структур, однако при пониженном давлении буферного газа (0,05 мбар) наблюдается планарный рост. Предыдущие исследования с мишенью  $WS_2$  показали, что в наших условиях происходит нестехиометрический перенос материала мишени. В связи с этим использовалась также вторая мишень с повышенным содержанием селена. Однако эксперимент показал, что при напылении с такой мишени образуются нанонити. Поэтому в дальнейшем рост проводился сначала с первой мишени, а затем со второй для восполнения недостатка селена. Благодаря этому подходу удалось получить эпитаксиальные пленки  $WSe_2$  с отчетливыми картинками ДБЭ и пониженной шероховатостью.

Работа была поддержана фондом РФФИ в рамках проекта № 21-52-14007 АНФ\_а. Авторы выражают благодарность С.М. Сутуруину, А.М. Коровину и Н.С. Соколову за обсуждение результатов работы.

В.В. Лендяшова (студ., 6 курс, Академический университет им. Ж.И. Алферова),  
Т. Шугабаев (асп., 2 год, Академический университет им. Ж.И. Алферова),  
И.В. Илькив (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ)

## ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ БУФЕРНЫХ GaAs СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ДЛЯ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ПРИБОРОВ

Интеграция полупроводниковых приборов на основе  $A^3B^5$  материалов и кремния до сих пор представляет значительный интерес. Это открывает широкие возможности для создания активных приборов фотоники, объединенных напрямую с пассивными элементами на базе кремниевой платформы [1]. Один из перспективных подходов основан на монолитной интеграции путем прямого синтеза  $A^3B^5$  структур на кремниевых подложках с использованием субмикронных буферных слоев, а также использовании в качестве активной области массивов самоорганизующихся  $A^3B^5$  квантовых точек (КТ), которые демонстрируют более интенсивное излучение по сравнению с гетероструктурами на основе квантовых ям. Настоящая работа посвящена исследованию возможностей получения тонких эпитаксиальных GaAs слоев на поверхности Si(100) подложек методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), а также формирования на их основе светоизлучающих гетероструктур.

Синтез структур осуществлялся с использованием МПЭ установки Riber Compact 21 EB200. В качестве подложек использовались пластины Si(100) с разориентацией  $4^\circ$ . Сначала осуществлялась химическая обработка подложек с последующим термическим отжигом в ростовой камере и формирование буферного слоя Si слоя толщиной 50 нм. После этого температура подложки понижалась до  $350^\circ\text{C}$  и осуществлялось формирование зародышевого GaAs слоя толщиной 150 нм. Затем был выращен слой GaAs (200 нм) при  $450^\circ\text{C}$ , содержащий упругонапряженный слой  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ . На заключительном этапе выращивался слой GaAs толщиной 0.5 мкм при  $550^\circ\text{C}$ , после чего осуществлялся циклический термический отжиг всей структуры. Морфология полученных структур исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). На полученных буферных слоях GaAs осуществлялся рост InAs гетероструктур на основе квантовых точек - квантовых ям и оценка их излучательных свойств. В результате выполненных работ было установлено, что использование буферных Si слоев позволяет существенным образом повысить кристаллическое качество впоследствии формируемых GaAs буферных слоев. На основе полученных субмикронных буферных GaAs слоев были получены светоизлучающие структуры с достаточно высоким оптическим качеством, демонстрирующие фотолюминесценцию в области 1.2 мкм при комнатной температуре.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-79-01117.

1. X. Chen et al., *Appl. Phys. Lett.*, **121**(6), 061102 (2022).

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ (111) $\text{PbSnTe}$

Теллурид свинца-олова  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  – узкозонный полупроводник, ширина запрещенной зоны которого зависит от соотношения олова и свинца и может меняться от 0 до 0.3 эВ [1]. Кроме того, сильное спин-орбитальное взаимодействие в этом материале приводит к инверсии порядка зоны проводимости и валентной зоны в L точках объемной зоны Бриллюэна при  $x > 0.35$ , сопровождающейся переходом в состояние трехмерного топологического кристаллического изолятора (ТКИ). Носители заряда на поверхностных состояниях ТКИ в  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  защищены от рассеяния назад симметрией отражения, не вырождены по спину и имеют дираковский закон дисперсии с геликоидальной спиновой структурой. Данное соединение представляет интерес для изучения спин-зависимых явлений, однако реальная электронная структура его поверхности на данный момент изучена слабо. Целью данной работы является изучение электронной структуры поверхности пленок (111)  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/\text{BaF}_2$  с составами вблизи точки инверсии зон в зависимости от температуры и состава  $x$ .

В работе методами фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением и дифракции медленных электронов исследовались поверхности эпитаксиальных пленок  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  (111), выращенных на подложках  $\text{BaF}_2$ . Для получения атомарно чистой и структурно-упорядоченной поверхности  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  использовалась обработка, описанная в работе [2].

Была изучена дисперсия электронных состояний поверхности (111)  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/\text{BaF}_2$  в диапазоне составов  $x \sim 0.16-0.5$  и температур от 80 К до 300 К. Было обнаружено, что при температуре 80 К появление топологических поверхностных состояний в  $\Gamma$ -точке зоны Бриллюэна происходит уже при переходе от  $x=0.16$  к  $x=0.19$ . Также наблюдалось, что при отжиге пленок при  $T > 300^\circ\text{C}$  происходит диффузия индия из объема на поверхность, с формированием тонкого ( $\sim 1$  нм) обогащенного индием слоя, сопровождающегося появлением реконструкции ( $7 \times 7$ ) на исходно нереконструированной ( $1 \times 1$ ) поверхности. При изучении электронной структуры поверхности, обогащенной индием, помимо объемных состояний валентной зоны  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  наблюдаются дополнительные состояния с дисперсией, схожей с дисперсией состояний более широкозонного  $\text{InTe}$ . Кроме того, была подтверждена возможность получения тонких проводящих ТКИ слоев  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  с  $x > 0.35$  на виртуальных диэлектрических подложках  $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}/\text{BaF}_2$  путем осаждения и диффузии в объем таких пленок металлического олова. В магнитосопротивлении таких структур при 4.2 К проявляются особенности, которые могут свидетельствовать о переходе  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  в фазу ТКИ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 22-12-20024.

1. V.V. Volobuev et al., *Advanced Materials* **29** (2017).

2. A.S. Tarasov et al., *Applied Surface Science* **569** 150930 (2021).

И.А. Новиков (студ., 2 курс маг., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ООО «Нова» СПб),  
Д.А. Козодаев (к.ф.-м.н., ООО «Нова СПб»),  
В.А. Мошников (д.ф.-м.н., проф., каф. МНЭ, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

Дальнейшее развитие материаловедения и синтез новых материалов сопровождаются переходом в область микро- и наноразмерных структур, что требует соответствующего развития методик, позволяющих анализировать свойства в указанном масштабе. В данной работе предлагается рассмотреть эффект внутреннего трения (ВТ) [1-3] как один из способов диагностики наноматериалов.

Для проведения исследований использовались пластины кремния, одна из которых имела оксидную пленку  $\text{SiO}_2$ , а на поверхности другой была сформирована двухслойная структура  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ . Измерения образцов проводились последовательно до и после электризации в коронном разряде. Было показано, что в двухслойной структуре  $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  основным местом накопления заряда изначально является слой нитрида, а затем большая его часть концентрируется на границе раздела  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  в процессе миграции вглубь образца. Установлено, что уменьшение толщины слоя диоксида кремния в десять раз ( $\sim 0.05$  мкм) существенно не меняет энергетическую глубину локализации заряда. Таким образом, ловушки захвата на вышеуказанной границе определяют стабильность данной структуры.

Были получены спектры ВТ образцов до и после электризации. На температурных зависимостях ВТ установлены релаксационные максимумы, обусловленные неупорядоченностью переходных слоев межфазных границ  $\text{Si-SiO}_2$  и  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ , а также разницей в коэффициентах термического расширения кремния, диоксида и нитрида кремния.

Показано, что на температурной зависимости ВТ заряженных образцов появляются дополнительные пики, связанные с возбуждением новых дефектов, отсутствующие у незаряженных структур. Это свидетельствует о том, что инжектированные в объем носители заряда достаточно сильно влияют на дефекты структуры исследуемых материалов. Предполагается, что за эти пики отвечает атомарный водород, делокализованный в процессе электризации при захвате электрона и разложения примесного центра захвата.

1. A.S. Nowick and B.S. Berry, "Anelastic Relaxation in Crystalline Solids", Academic Press, New York (1972).
2. Д.А. Козодаев. Электретный эффект в структурах  $\text{Si-SiO}_2$  и  $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  //Дисс. ... к.ф.-м.н., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб 2002.
3. Твердотельная электроника и микроэлектроника: Межвузовский сборник научных трудов / ВГТУ. 2003. С. 16-20.

В.Е. Ремеле (студ., 2 курс маг., СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, каф. МНЭ),  
М.А. Митцев (д.ф.-м.н., в.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
М.В. Кузьмин (к.ф.-м.н., зав. лаб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## МЕХАНИЗМЫ РОСТА И СТРУКТУРА ГРАНИЦ РАЗДЕЛА НАНОПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЙ МЕТАЛЛ – КРЕМНИЙ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Структуры редкоземельный металл (РЗМ) – кремний являются важным с научной и практической точки зрения классом тонкопленочных систем металл–полупроводник, так как в них возможно образование соединений (дисилицидов РЗМ и многослойного силицена, интеркалированного атомами металла), обладающих интересными физико-химическими свойствами [1,2]. Кроме того, в данных системах при определенных условиях реализуется послойный рост пленки металла по механизму Франка – ван-дер-Мерве с образованием химически резкой границы раздела с кремниевой подложкой, что дает возможность получать низкоразмерные структуры, в которых движение электронов ограничено вдоль одной из координат и происходит квантование их энергии [3].

В настоящей работе исследованы структура и стехиометрический состав границ раздела РЗМ-Si(111) и Si(100) при комнатной температуре ( $T \sim 300$  К). Ранее одним из наиболее часто применяемых в подобных исследованиях методов была электронная Оже-спектроскопия (ЭОС). Полученные с ее помощью результаты носят, как правило, качественный характер, что не позволяет получать детальную информацию о структуре и морфологии границ раздела. В данной работе предложена модель, позволяющая проводить количественный анализ данных ЭОС и на этой основе получать сведения, характеризующие процессы перемешивания в области диффузных границ раздела РЗМ-кремний (их протяженности, критическом покрытии для начала перемешивания, количестве атомов кремния, протиффундировавших в растущую пленку, и т.п.). Апробация модели проводилась для ряда систем, в которых в качестве наносимого РЗМ были выбраны иттербий, европий, самарий и гадолиний. Это дало возможность прояснить роль заполнения  $4f$ -оболочки в атомах РЗМ в процессах формирования границы раздела с поверхностями Si(111) и Si(100). В частности, было установлено, что характеристики границ раздела коррелируют с термодинамическими параметрами металлов, и что интенсивность перемешивания и протяженность диффузной границы раздела возрастает в ряду  $Yb \rightarrow Sm \rightarrow Gd$ . Предложенная модель может быть также применена и к другим системам нанопленка – подложка с реакционно-способными границами раздела.

1. А.М. Tokmachev et al., *Nature Communications*, **9**, 1672 (2018).
2. K. Holtgrewe et al., *Phys. Rev. B*, **99**, 214104 (2019).
3. М.В. Кузьмин, М.А. Митцев, *ЖТФ*, **91**, 7, 1189 (2021).

## РОСТ И ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ $(2\sqrt{3}\times 3)$ -Bi/InAs(111)A

Цель данной работы – изучить влияние условий роста тонких плёнок Bi на поверхности n-InAs(111)A(2x2) на их кристаллическую и электронную структуру и электронные свойства границы раздела диэлектрик/Bi/n-InAs. Двумерный электронный газ, возникающий на поверхности узкозонных полупроводников, например InAs, может быть использован в качестве каналов в спиновых транзисторах. Благодаря эффекту Рашбы, снимающему вырождение состояний двумерного электронного газа InAs по направлению спина, управление прецессией спина возможно за счёт приложения внешнего электрического поля без применения магнитного поля. Добавление тяжелых атомов Bi может увеличить силу спин-орбитального взаимодействия Рашбы, что позволит снизить амплитуду управляющего электрического поля. Изучение тонких плёнок висмута также представляет интерес, поскольку различные соединения на его основе являются топологическими изоляторами. Рост тонких плёнок Bi на поверхности InAs(111)A при комнатной температуре уже изучался ранее, однако рост при высокой температуре был проведён нами впервые.

Осаждение Bi на поверхность InAs(111)A при температуре  $\sim 250^\circ\text{C}$  привело к формированию сверхструктуры с реконструкцией  $(2\sqrt{3}\times 3)$ . Размер элементарной ячейки был оценен из картин дифракции медленных электронов и сканирующей туннельной микроскопии и составил  $\sim 13\text{\AA} \times 15\text{\AA}$ . Данные измерений рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии указывают на отсутствие сильной химической связи плёнки Bi с атомами подложки. Для изучения электронной структуры плёнок применялось фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением. Выяснено, что на поверхности сохраняются состояния двумерного электронного газа InAs, при этом внутри запрещённой зоны InAs формируются новые параболические электронные и дырочные состояния Bi с большей эффективной массой ( $m_e^* \sim 0.2 - 0.6 m_0$ ,  $m_p^* \sim 0.2 - 0.4 m_0$ ,  $m_0$  – масса свободного электрона). Запрещённая зона полученной структуры  $(2\sqrt{3}\times 3)$ -Bi/InAs(111)A составляет  $\sim 150\text{мэВ}$ . Обсуждается возможность измерения параметра Рашбы для двумерного электронного газа на границе раздела Bi/n-InAs.

Работа выполнена при поддержке финансовой программы Приоритет-2030.



## ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ, СВЕРХРЕШЕТКИ, КВАНТОВЫЕ ЯМЫ (ГСКЯ)

УДК 537.862, 535-14

А.В. Горбатова (асп., 4 год, РТУ МИРЭА, ИПТИП),  
П.Ю. Авдеев (студ., 2 курс маг., РТУ МИРЭА, ИПТИП),  
Е.Д. Лебедева (студ., 2 курс маг., РТУ МИРЭА, ИПТИП),  
И.Ю. Пашенькин (м.н.с., ИФМ РАН),  
М.В. Сапожников (д. ф.-м. н., в.н.с., ИФМ РАН),  
А.М. Буряков (к.ф.-м.н., с.н.с., РТУ МИРЭА, ИПТИП)

### РОЛЬ РАШБА-ИНТЕРФЕЙСА В ГЕНЕРАЦИИ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ ГИБРИДНОЙ СТРУКТУРОЙ Co/WSe<sub>2</sub>

Недавние успехи в области ферромагнетизма, фемтосекундной оптики и спинтроники привели к созданию импульсных терагерцовых (ТГц) излучателей, работающих на принципе спин-зарядовой конверсии [1]. Облучая структуры из ферромагнитных/немагнитных металлов сверхкороткими лазерными импульсами, можно получать интенсивные и широкополосные (0.1 – 30 ТГц) импульсы ТГц излучения [1]. В последние годы особое внимание уделяется разработке гибридных ТГц эмиттеров на основе гетероструктур ферромагнетик/полупроводник [2-5]. Полупроводниковый слой, выполняя функцию фильтра поляризованных по спину высокоэнергичных электронов, способствует более эффективной ТГц-эмиссии [2]. Помимо этого, гибридные спинтронные ТГц-генераторы предлагают дополнительные возможности для управления амплитудными и частотными характеристиками ТГц излучения за счет модуляции барьера Шоттки электрическим полем [3].

В данной работе представлены детальные исследования параметров ТГц излучения (амплитуды, спектра, поляризации и т.д.), генерируемого гетероструктурой Co(3нм)/WSe<sub>2</sub>. Показано, что генерация ТГц излучения в структуре происходит за счет процесса спин-зарядового преобразования: обнаруженная зависимость ТГц сигнала от поляризации оптического возбуждающего луча подтверждает доминирующую роль Рашба-интерфейса в ТГц генерации, что согласуется с работами [4, 5]. Измеренные гистерезисные зависимости ТГц сигнала от магнитного поля подтверждают наличие одноосной магнитокристаллической анизотропии в структуре Co/WSe<sub>2</sub> с четко выраженными трудной и легкой осями намагничивания. Показано, что наблюдаемый магнитный гистерезис ТГц сигнала является следствием поворота поляризации ТГц излучения на 360.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2022-1131).

1. T. Seifert et al., *Nature photonics*, **10**, 483-488 (2016).
2. L. Cheng et al., *Nature Physics*, **15**, 347-351 (2019).
3. M. Chen et al., *Advanced Optical Materials*, **7**, 1801608 (2019).
4. K. Cong et al., *Nature communications* **12**, 5744 (2021).
5. A. Comstock et al., *Advanced Optical Materials*, **11**, 2201535 (2023).

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НАНОСТРУКТУР С КОМПЕНСИРОВАННЫМИ КВАНТОВЫМИ  
ЯМАМИ ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ

Оптические переходы носителей заряда с участием примесных состояний в квантовых ямах позволяют создавать на их основе источники терагерцового (ТГц) излучения. В работах [1, 2] исследовались структуры с компенсированными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs и была получена эмиссия ТГц излучения *при оптической накачке*.

Данная работа нацелена на изучение возможности использования подобных структур для получения эмиссии ТГц излучения *при электрической накачке*. В ближнем ИК диапазоне исследованы фото- и электролюминесценция *p-i-n*-структур с компенсированными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs (при  $T = 10$  К). Исследовались структуры с различным профилем легирования. В одной структуре (обозначаемой *W*) и доноры, и компенсирующие их акцепторы вводились в центральную область квантовых ям. В другой структуре (обозначаемой *B*) доноры также располагались по центру квантовых ям, в то время как акцепторы вводились в центральную часть барьеров.

Спектры фотолюминесценции структуры *W* демонстрируют доминирование линии рекомбинации основная подзона электронов – акцептор ( $e1-A$ ) над линией рекомбинации донор – основная подзона тяжелых дырок ( $D-hh1$ ). В структуре *B* линия  $e1-A$  отсутствует, а линия  $D-hh1$  оказывается значительно интенсивнее по сравнению со структурой *W*. Спектры спонтанной люминесценции при электрической накачке структуры *W*, наоборот, демонстрируют доминирование линии  $D-hh1$  над линией  $e1-A$ . Это связано с перестройкой энергетического спектра в электрическом поле, а также с процессами инжекции и туннелирования носителей заряда. При больших инжекционных токах в обеих структурах наблюдалась лазерная генерация на переходах  $D-hh1$ , причем интегральная интенсивность излучения в структуре *W* была в пять раз больше, чем в структуре *B*. Именно эти переходы обеспечивают эффективное опустошение донорных уровней, что актуально для эмиссии ТГц излучения на переходах  $e1-D$  [1, 2].

Результаты исследований позволяют сделать вывод, что структура с компенсированными квантовыми ямами, в которой отсутствует пространственное разделение доноров и акцепторов, более перспективна для создания источника ТГц излучения *с электрической накачкой*, работающего на излучательных переходах электронов  $e1-D$  (диапазон частот 2–6 ТГц), по сравнению со структурой, где доноры и акцепторы пространственно разделены.

Авторы благодарят И.В. Седову, С.В. Сорокина и Г.В. Клишко за выращивание структур. Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 22-22-00103).

1. Адамов Р.Б. и др. *Научно-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки.* **15(4)** 32–43 (2022).
2. Adamov R.B., et al. *Journal of Luminescence* (2023). Submitted for publication.

П.С. Бажин (асп., 1 год., СПбГУ, ФТТ),  
В.М. Литвяк (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ, Лаборатория оптики спина),  
К.В. Кавокин (д.ф.-м.н., в.н.с., СПбГУ, Лаборатория оптики спина)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-СПИНОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЯДЕР В КВАНТОВОЙ ЯМЕ CdTe/CdZnTe

Одним из активно развивающихся направлений физики конденсированных сред является исследование ядерных спиновых систем (ЯСС). В частности, большой интерес представляет охлаждение ЯСС до сверхнизких температур с её дальнейшим переходом в состояние с магнитным порядком. При этом минимальная достижимая ядерная температура ограничивается ядерным спиновым взаимодействием и квадрупольным взаимодействием ядер. Перспективным может оказаться соединение CdTe. Широко распространённые изотопы Cd и Te обладают спином равным 0 или 1/2, поэтому они не участвуют в квадрупольном взаимодействии. Более того, изотопная распространённость магнитных ядер  $Cd^{111}$ ,  $Cd^{113}$ ,  $Te^{125}$  составляет 12.75 %, 12.26 %, 6.99%, соответственно. Из-за этого вероятность обнаружить рядом друг с другом большое количество магнитных ядер оказывается мала, и можно считать, что между собой взаимодействует несколько близко расположенных ядер, объединённых в кластеры.

В работе проводилось экспериментальное и теоретическое исследование спектров поглощения переменного магнитного поля образцом CdTe. Экспериментальная методика получения спектров поглощения описана в работе [1]. Она основывается на отогреве переменным магнитным полем оптически охлажденной ЯСС. В отличие от экспериментов по ЯМР измерения могли проводиться в отсутствии внешнего поля. При теоретическом рассмотрении проблемы учитывалось взаимодействие только между ближайшими соседями. Кристалл CdTe обладает структурой цинковой обманки, и ближайшими соседями каждого ядра Cd являются 4 ядра Te, расположенные в вершинах правильного тетраэдра. Таким образом, в работе учитывались кластеры, состоящие из 2, 3, 4 и 5 магнитных ядер. После фиксации числа ядер в кластере и их взаимной конфигурации записывался гамильтониан системы с учётом прямого диполь-дипольного и косвенного спин-спинового взаимодействия и численно решалась задача на его собственные значения и векторы. Постоянные взаимодействия брались из [2]. На основе этих результатов вычислялись частоты переходов и их интенсивности под действием переменного магнитного поля.

В результате работы были получены спектры поглощения CdTe как в эксперименте, так и в расчёте. Их результаты согласуются друг с другом. Вычислены вклады кластеров разного размера в итоговый спектр поглощения.

Работа поддержана грантом РФФ 22-42-09020.

1. V. M. Litvyak et al., Phys. Rev. B 104, 235201.
2. A. Nolle, Z Physik B 34, 175–182 (1979).

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

## АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ В РАМКАХ БИОРТОГОНАЛЬНОГО ФОРМАЛИЗМА МЕТОДОМ ФУНКЦИЙ ГРИНА

Оптические свойства полупроводниковых квантово-размерных структур с практической точки зрения играют ключевую роль в разработке разнообразных устройств оптоэлектроники. Анализ распространения электромагнитных волн в этом случае обычно сводится к определению спектров отражения или пропускания систем с гетероинтерфейсами. Существующие методы расчёта, как правило, основываются на решении уравнений Максвелла в координатном представлении. При наличии произвольной анизотропии диэлектрической и магнитной проницаемостей исследуемых слоёв, здесь возникают определённые вычислительные трудности, связанные с необходимостью учёта граничных условий сложного вида [1].

В настоящей работе предлагается новый подход к описанию оптических явлений в квантово-размерных структурах методом функций Грина с использованием биортогональных разложений. С математической точки зрения принципиальным для данного метода является неэрмитовость используемых максвелловских операторов, позволяющих описывать электромагнитные поля, уходящие на бесконечность [2]. Подобная ситуация возникает также при исследовании распространения света в диссипативных системах. Для поиска решений уравнений Максвелла в работе развивается подход, аналогичный методу биортогональных разложений в квантовой механике, используемому для определения собственных состояний в системах с неэрмитовыми гамильтонианами [3, 4]. Проводится численный анализ спектров отражения и пропускания электромагнитных волн в полупроводниковых гетероструктурах с произвольной анизотропией диэлектрической и магнитной проницаемостей. В основе предлагаемого подхода лежат операторное представление уравнений Максвелла [5] и периодические граничные условия. Спектр пропускания и отражения определяется с помощью соответствующего оператора Грина, представленного в виде биортогонального разложения по собственным электромагнитным модам. Такая формулировка позволяет свести рассматриваемую задачу к решению неоднородной системы линейных алгебраических уравнений, что позволяет обойти вычислительные трудности, связанные с заданием большого числа сложных граничных условий на гетероинтерфейсах.

1. P.T. Kristensen, et al., *Adv. Opt. Photon.* **12**, 612 (2020).
2. N. Moiseyev. *Phys. Rep.* **302**, 211 (1998).
3. D.C. Brody. *J. Phys. A: Math. Theor.* **47**, 035305 (2014).
4. М.В. Захарченко, Г.Ф. Глинский, *ЖТФ* **93**(10), 1396 (2023).
5. Г.Ф. Глинский, *ЖТФ* **89**(3), 329 (2019).

А.А. Иванов (асп., 2 год, м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
В.В. Чалдышев (д.ф.-м.н., г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ОПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК РЕЗОНАНСНЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР ИЗ 30 КВАНТОВЫХ ЯМ InGaN/GaN и GaN/AlGaN

В резонансных брэгговских структурах электромагнитное связывание индивидуальных экситонов приводит к формированию сверхизлучающей оптической моды [1]. Резонансные брэгговские структуры на основе GaN позволяют наблюдать экситон-поляритонный резонанс при комнатной температуре [2], что является важнейшим фактором для использования суперизлучательной моды экситонных поляритонов в оптических и оптоэлектронных приборах. Поскольку экситонные состояния в квантовых ямах InGaN/GaN имеют большие значения неоднородного уширения, вызванные флуктуациями ширины и химического состава квантовой ямы [3], резонансные брэгговские структуры с квантовыми ямами GaN/AlGaN должны оказаться более эффективными для использования в нанопотонике.

Мы сообщаем об экспериментальной реализации и теоретическом анализе оптических свойств периодических систем из 30 квантовых ям InGaN и GaN, разделенных туннельно-непрозрачными барьерами GaN и AlGaN, соответственно, так что брэгговский резонанс электромагнитных волн мог быть реализован на частоте экситонов в квантовых ямах. Образцы были выращены с использованием метода газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений на сапфировых подложках (0001). Измерения спектров оптического отражения и пропускания проводились для разных углов падения и поляризаций света при комнатной температуре. Для определения параметров экситонов в квантовых ямах мы используем компьютерное моделирование оптических спектров, основанное на использовании метода матриц переноса, которые строятся на основе формул экситонного отражения и пропускания, приведенных в работе [1].

Нами верифицированы модели, позволяющие описать экспериментальные данные в широком диапазоне длин волн для различных углов падения и поляризаций света для обоих образцов. Из сравнения экспериментальных и расчётных данных для двух систем квантовых ям мы приходим к выводу, что радиационное затухание экситона в квантовых ямах GaN/AlGaN (равное  $0.40 \pm 0.02$  мэВ [4]) оказывается в два раза больше, чем в InGaN/GaN при равных параметрах нерадикационного затухания 40 мэВ. Таким образом, управляемые резонансные брэгговские структуры на основе квантовых ям GaN/AlGaN имеют наилучшие перспективы к внедрению в фотонные и оптоэлектронные устройства.

1. Е.Л. Ивченко, А.И. Несвижский, С. Йорда, *ФТТ*, **36**, 2118 (1994).
2. V.V. Chaldyshev, A.S. Bolshakov, E.E. Zavarin et al., *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 251103 (2011).
3. A.F. Tsatsulnikov, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, et al., *Semiconductors*, **46**, 1335-1340 (2012).
4. А.А. Иванов, V.V. Chaldyshev, E.E. Zavarin et al., *Appl. Phys. Lett.*, **123**, 121106 (2023).

Г.О. Корнышов (м.н.с., Алферовский университет),  
Н.Ю. Гордеев, Ю.М. Шерняков, А.А. Бекман, А.С. Паюсов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
М.В. Максимов (д.ф.-м.н., в.н.с., Алферовский университет),  
А.Е. Жуков (проф., НИУ ВШЭ)

## СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ДИОДЫ НА ОСНОВЕ ЧИРПИРОВАННЫХ InGaAs/GaAs КВАНТОВЫХ ЯМА-ТОЧЕК

Суперлюминесцентные диоды (СЛД), излучающие в оптическом диапазоне 950-1150 нм, имеют большое значение для систем оптической когерентной томографии (ОКТ), позволяющих сканировать сетчатку и другие органы, состоящие преимущественно из воды. Для подавления оптической положительной обратной связи и предотвращения лазерной генерации, обеспечения широкополосного суперлюминесцентного излучения и повышения выходной мощности используются различные конструкции СЛД [1,2]. В данной работе рассмотрены два варианта полосковых волновода: наклоненный на 7 градусов относительно сколов и J-образный. В качестве активной области использована квантоворазмерная структура переходной размерности (0D/2D) – квантовые яма-точки (КЯТ). С одной стороны, они представляют собой плотный массив квантовых точек с относительно низкими энергиями удержания электронов и дырок. С другой стороны, их можно рассматривать как сильно модулированные по составу и толщине квантовые ямы. Их основным преимуществом перед другими типами низкоразмерных гетероструктур является широкий спектр усиления, что необходимо для достижения широкополосного излучения. В настоящей работе исследовались как однослойная структура, так и 5-, 7-слойные чирпированные структуры со слоями КЯТ, номинальная длина волны излучения которых плавно изменялась от 920 до 1070 нм.

СЛД с одним слоем КЯТ и наклонной геометрией полоска шириной 5 мкм и длиной 250 мкм показал максимальную ширину излучения более 120 нм на токах 100-300 мА. Спектр при этом остаётся равномерным, без провалов и пиков возбужденного состояния, последнее характерно для всех структур с КЯТ. Мощность при этом не превышает 0.5 мВт, что можно улучшить, используя более длинные чипы и оптимизируя геометрию полоска. Выполнено исследование параметров СЛД при повышении рабочей температуры вплоть до 60°C. При нагреве чипа с наклонной геометрией полоска длиной 250 мкм и 7 слоями КЯТ удалось получить ширину излучения 120 нм в большом диапазоне токов 200-600 мА. С ростом температуры наблюдается рост длинноволнового края спектра, что может быть объяснено появлением большого количества горячих носителей, которые захватываются на наиболее широком и длинноволновом слое КЯТ (1070 нм). Исследование показало перспективность применения гетероструктур с КЯТ при создании широкополосных источников излучения.

1. S. Haffouz et al., *Opt. Lett.*, **37**, p. 1103 (2012).

Д.П. Куликова (асп., МГУ им. М.В. Ломоносова, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»),  
А.В. Шелаев, А.В. Барышев (ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»)

## ГЕТЕРОНАНОСТРУКТУРЫ Pd/PdO, СФОРМИРОВАННЫЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ, ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ВОДОРОДА

Для обеспечения безопасности на различных производствах, где в технологических процессах используется водород, существует необходимость в разработке безопасных, высокочувствительных и быстрых сенсоров  $H_2$ . Оптические датчики обладают значимыми преимуществами по сравнению с сенсорами, работающими на иных физических принципах [1]. Палладий часто используется как газочувствительный материал в таких устройствах, т.к. при гидрировании значительно меняются его оптические свойства. При отжиге палладия при температурах свыше  $\approx 400$  °С формируется оксид палладия PdO, который, в свою очередь, восстанавливается до Pd в водороде. Известны чувствительные элементы на основе PdO, однако характерное время их реакции составляет единицы часов в чистом  $H_2$ .

В данной работе впервые представлены гетеронаноструктуры Pd/PdO с высокой скоростью отклика. Метод их изготовления заключается в отжиге сфокусированным лазерным излучением ( $\lambda = 405$  нм, диаметр перетяжки не более 1 мкм) поверхности тонких (20 нм) плёнок Pd на воздухе: в областях, нагретых излучением, происходило образование оксида палладия. Серия исследуемых структур имела форму меандра, использовались мощности лазера  $P = 27,5$  мВт, 29,5 мВт и 31,5 мВт, а расстояния между центрами соседних отожжённых полос составляли  $d = 3,2$  мкм, 6 мкм и 7 мкм. При протекании  $H_2$  содержащей воздушной смеси PdO необратимо восстанавливался до Pd, что сопровождалось увеличением интенсивности спектров отражения гетеронаноструктур. Скорость и амплитуда оптического отклика структур зависели как от мощности лазерного излучения, так и от их геометрических параметров. Геометрические параметры, а именно соотношение долей Pd, выступающего в роли катализатора, на котором диссоциирует водород, и PdO, являлись ключевой характеристикой. Определено, что структура с  $d = 6$  мкм и  $P = 29,5$  мВт обладала наиболее быстрым и интенсивным откликом на водород: характерное время отклика на 0,05 об. %  $H_2$  в воздухе составило  $\approx 15$  минут. Показано, что существует возможность лазерной «перезаписи» гетеронаноструктур после их восстановления в водороде: их функциональность как оптического индикатора  $H_2$  и скорость отклика сохраняются, однако амплитуда отклика уменьшается с каждым реализованным циклом «запись/восстановление».

Так, с помощью структурирования тонкой плёнки Pd сфокусированным лазерным излучением возможно формирование газочувствительных гетеронаноструктур Pd/PdO, обладающих быстрым (доли и единицы минут) оптическим откликом на  $H_2$  в воздухе с концентрациями до 0,05 об. %. Дальнейшая разработка чувствительных элементов на основе дифракционных наноструктур и метаповерхностей Pd/PdO перспективна для селективного детектирования водорода малых концентраций.

1. S. Yang et al., *Sensors and Actuators B: Chemical*, **368**, 132242 (2022).

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С УЧЁТОМ ЭКСИТОННОГО ВКЛАДА

Для оптической обработки информации используются приборы оптоэлектроники, в них в качестве носителя информации используется оптическое излучение, а в качестве преобразователей информации оптические и оптоэлектронные эффекты. Из достоинств полупроводниковых опто- и наноэлектронных устройств можно выделить высокое быстродействие и естественную пространственную многоканальность, которая обеспечивает одномоментную обработку больших информационных массивов, кроме того, позволяют производить как аналоговые, так и цифровые операции над информационными сигналами. В настоящее время для передачи данных в оптоволоконных телекоммуникационных сетях широко используются модуляторы по схеме интерферометра Маха-Цендера [1]. Для их создания могут быть использованы квантово-размерные гетероструктуры, что позволяет варьировать ширину запрещённой зоны и влиять на спектр разрешённых состояний, а, следовательно, изменять их оптические характеристики.

Данная работа посвящена расчёту коэффициента поглощения в двойных туннельно-связанных квантовых ямах (ТСКЯ) при приложении электрического поля. Численный расчёт энергетического спектра производился путем решения уравнения Шредингера методом конечных разностей с учетом напряжений, возникающих в гетероструктурах. С помощью полученных волновых функций рассчитывались спектры поглощения с учётом экситонного вклада, который в двумерных структурах сохраняется и при комнатной температуре [2]. В качестве исследуемых структур рассматриваются одиночные и двойные туннельно-связанные квантовые ямы на основе GaAs с добавлением In и Al для создания гетеропереходов.

Результаты моделирования показывают, что модельные спектры поглощения хорошо согласуются с экспериментальными данными. Для структур с ТСКЯ наблюдается длинноволновое смещение (15-20 мэВ) при приложении электрического поля. При этом электрооптический эффект в двойных ТСКЯ выражен почти в три раза более ярко по сравнению с одиночными квантовыми ямами. Также показано, что при напряжениях смещения порядка 1,5 - 2 В экситон разрушается. Методику наших расчётов можно использовать для моделирования спектров поглощения в структурах оптических модуляторов. На основе этих расчетов, учитывая связь между коэффициентом поглощения и мнимой частью диэлектрической проницаемости согласно соотношению Крамерса-Кронига, можно получить вариацию показателя преломления на требуемой для прибора длине волны.

1. A. Aimone et al. InP Segmented Mach-Zehnder Modulators with Advanced O Functionalities. Berlin 2016.
2. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. «Физика квантовых наноразмерных структур». Изд. «Логос». Москва. 2000. с. 80-84.



## ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ МОДЫ В ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

Во многих приложениях требуется передача модулированного по времени сигнала в заданном направлении без отражений. В электронике для этих целей используют цепи с согласованной нагрузкой между элементами, в оптике – оптические изоляторы и циркуляторы [1]. При этом однонаправленное распространение плазмонов, необходимое для создания фотонных интегральных схем, попало во внимание исследователей недавно.

В этом свете перспективным видится направление, основанное на невзаимных плазмонных модах. Спектр невзаимных плазменных возбуждений, например, межкраевых магнитоплазмонов [2] или краевых плазмонов Берри [3,4], по своей природе не допускает обратного распространения волны, что позволит смягчить требования к чистоте используемых материалов и точности техпроцессов. В то же время применение данных мод на практике зачастую требует использования магнитных полей или легирования полупроводников магнитными допантами, уменьшающими добротность плазменных волн.

Поэтому крайне важно характеризовать невзаимные моды в обычных двумерных системах вроде гетероструктур GaAs/AlGaAs или графене, не требующих приложения магнитного поля. В настоящем докладе будет дан обзор гальваномагнитных волн в двумерных электронных системах (ДЭС), до этого известных в физике объёмных полупроводников [5, 6]. Ключевая особенность данных мод – поперечность электрического поля волновому вектору (ТЕ-волны), что делает их слабозатухающими. Направление их распространения задаётся вектором дрейфовой скорости или градиентом температуры.

Отметим, что к настоящему моменту предельно хорошо изучены гальванотермомагнитные явления в ДЭС – но исключительно во внешнем магнитном поле. При этом градиент температуры или скорость носителей заряда могли рассматриваться исследователями и как внешний фактор, и как атрибут плазменной волны. Поэтому логичным видится закрыть имеющийся пробел и изучить взаимодействие собственного магнитного поля двумерной плазменной волны с внешним градиентом температуры и/или дрейфом.

В докладе будут представлены результаты теоретического исследования характеристик гальваномагнитных мод в ДЭС (природа возникновения, спектры и ширины линий, пространственный профиль, способы возбуждения).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-72-01013.

1. Gauthier, Daniel J., Paul Narum, and Robert W. Boyd. Optics letters **11** (1986): 623-625.
2. Mikhailov, Sergey A., and V. A. Volkov. J. Phys: Cond. Matt. **4** (1992): 6523.
3. Song, JCW, Rudner M.S. PNAS **113** (2016), 4658; Petrov, A. S. (2021). PRB **104**, L241407.
4. Petrov, A. S. (2021). Phys. Rev. B **104**, L241407.
5. Л. Е. Гуревич, Б. Л. Гельмонт ЖЭТФ **46** (1964) 884 – 901.
6. В. Н. Копылов, Письма в ЖЭТФ **29** (1979) 26 – 29.

## МЕЖКРАЕВОЙ ПЛАЗМОН БЕРРИ И ЕГО ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

Невзаимные устройства составляют важнейшую часть современной техники. Невзаимные явления могут проявляться только в системах с нарушенной лоренцевской взаимностью [1], что традиционно достигается использованием внешнего магнитного поля. Ожидаемо, что экстремальная и весьма желательная форма невзаимности, однонаправленный транспорт, долгое время была возможна только в экстремальных условиях: при квантующих магнитных полях и гелиевых температурах (квантовый эффект Холла), когда подавлено обратное рассеяние носителей заряда.

Интересно, что существует новый класс устройств, поддерживающих передачу сигнала с защитой от обратного рассеяния в широком диапазоне частот: фотонные топологические изоляторы (ФТИ). ФТИ представляет собой специально спроектированную метаструктуру, обладающую ненулевым потоком Берри различной природы [2], которая лежит в основе невзаимности ФТИ и устраняет необходимость в магнитном поле. Была показана работоспособность ФТИ при комнатной температуре и CMOS-совместимость.

Тем не менее, твердотельные структуры имеют большое преимущество перед метаструктурами: они легко настраиваются. Действительно, ФТИ приобретают свои свойства еще на этапе изготовления и далее работают «как есть». Напротив, системы с конденсированными средами и особенно ДЭС выигрывают от многочисленных методов управления: эффект поля, внешнее освещение, нагрев и т. д.

В этой работе мы объединяем преимущества обоих подходов. А именно, мы предлагаем схему перестраиваемой передачи терагерцового сигнала, невосприимчивого к обратному рассеянию, без магнитного поля. С этой целью мы предсказываем новую однонаправленную плазмонную моду, которая связана между ДЭС с разной кривизной Берри. При заданной кривизне Берри частота моды лежит в ограниченном окне в терагерцовом диапазоне, а точное расположение окна зависит от контраста плотности несущих в соседних ДЭС. Настраивая контраст плотности (например, напряжением на затворе или внешним освещением), можно управлять частотным окном плазмона и направлением его распространения. Этот факт открывает новые возможности для перестраиваемых однонаправленных ТГц передатчиков.

По материалам исследования выпущена публикация [3]. В докладе также будут представлены результаты по возбуждению найденной моды постоянным током (посредством плазменной неустойчивости).

Работа поддержана Стипендией Президента РФ, проект № СП-429.2021.5.

1. Jalas, Dirk, et al. *Nature Photonics* 7 (2013): 579-582.
2. Ozawa, Tomoki, et al. *Reviews of Modern Physics* 91.1 (2019): 015006.
3. Petrov, Aleksandr S., *Physical Review B* 104 (2021): L241407.

## УСИЛЕНИЕ ПЛАЗМОНОВ В МНОГОЯМНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ HgTe/CdHgTe

Перспективным объектом для создания лазеров, генерирующих излучение в области остаточных лучей GaAs, являются гетероструктуры CdHgTe/HgTe с квантовыми ямами (КЯ). Одним из способов генерации излучения в этом частотном диапазоне является генерация плазмонов в структурах с узкозонными 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 обстоятельства делают привлекательными данные структуры для создания компактных источников излучения среднего ИК диапазона.

До настоящего времени процессы усиления плазмонов рассматривались только в структурах с одиночной КЯ [2]. В данной работе рассматривается усиление плазмонов как в структурах с одиночной КЯ, так и многоямных структурах. Получены спектры коэффициента усиления плазмонов и зависимости пороговой концентрации неравновесных носителей (такой концентрации, превышая которую, возможна генерация плазмонов) от числа КЯ и от ширины запрещенной зоны КЯ. Показано, что с увеличением числа КЯ возможно уменьшение пороговой концентрации неравновесных носителей. Выяснено, что наиболее оптимальной шириной запрещенной зоны КЯ для генерации плазмонов является ширина, немного превышающая энергию продольных оптических фононов в барьере и КЯ. В том случае, когда ширина запрещенной зоны КЯ становится меньше частоты продольного оптического фонона в барьере, становится возможна быстрая рекомбинация с участием оптических фононов, препятствующая созданию инверсной населенности зон. Получены оценки оптимального числа КЯ в структуре для генерации плазмонов в условиях оптического возбуждения неравновесных носителей и пороговой мощности оптического возбуждения.

Спектры плазмонов находились с учетом пространственной дисперсии поляризуемости неравновесных носителей заряда. Обнаружено, что в многоямных структурах наибольшим коэффициентом усиления обладает мода, компонента электрического поля в плоскости КЯ, которой не обращается в ноль.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 22-72-10111).

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**, 115001 (2021).

М.С. Ружевич (асп., 3 год, Университет ИТМО, фак. ИПСПД),  
К.Д. Мынбаев (д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Н.Л. Баженов (к.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
В.В. Романов (к.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
К.Д. Моисеев (д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР InAs/InAsSb/InAsSbP С МОЛЬНОЙ ДОЛЕЙ АНТИМОНИДА ИНДИЯ 0.07–0.16

Гетероструктуры (ГС) на основе InAs(Sb,P) используются для создания источников и приемников излучения, работающих в среднем инфракрасном диапазоне спектра (длины волн 2–6 мкм). Изменение мольной доли у InSb в твёрдом растворе  $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  позволяет охватить спектральный диапазон от 3.4 до 11.0 мкм. Однако продвижение к длинноволновой границе этого диапазона, требующее увеличения у, ведёт к росту рассогласования по параметру кристаллической решётки эпитаксиального слоя InAsSb (активной области ГС) относительно матричного материала InAs. Это оказывает негативное влияние на качество гетерограницы InAsSb/InAsSbP и вызывает появление дополнительных каналов излучательной рекомбинации за счет формирования интерфейсных состояний. Учёт данных особенностей важен при разработке конструкций приборных структур.

В работе будут представлены результаты исследования электролюминесценции светодиодных ГС  $n\text{-InAs/InAs}_{1-y}\text{Sb}_y/p\text{-InAsSbP}$  с  $y = 0.07\text{--}0.16$  и проведено их сопоставление с данными исследования вольт-амперных характеристик и особенностями зонной диаграммы структур. Экспериментальные исследования были проведены в широком температурном интервале  $T=4.2\text{--}300$  К.

По результатам исследований показано существенное влияние температуры и концентрации InSb в активной области ГС на их люминесцентные свойства. Определено, что в ГС реализуется гетеропереход II типа и в диапазоне температур от 4.2 до 140 К излучательная рекомбинация определяется рекомбинационными переходами на гетерогранице InAsSb/InAsSbP. Для ГС с мольной долей InSb в активной области в диапазоне  $0.09 \leq y \leq 0.12$  для данных излучательных переходов было характерно «голубое» смещение полосы излучения в интервале температур от 4.2 до 80 К. Увеличение температуры до 300 К приводило к изменению основного канала излучательной рекомбинации с интерфейсного на межзонный в объёме активной области ГС. Формирующаяся в результате изменения каналов рекомбинации характерная слабая температурная зависимость длины волны излучения ГС может иметь важное значение для различных практических приложений, в частности, для создания светодиодов с малым температурным сдвигом длины волны излучения.

РЕЗОНАНСНАЯ СПИНОВАЯ ДИНАМИКА ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В УСЛОВИЯХ  
СИЛЬНОЙ СПИН-ОРБИТАЛЬНОЙ СВЯЗИ

Эффекты спин-зарядовой конверсии, изучаемые на протяжении многих лет, являются одним из ключевых аспектов физики конденсированных сред и представляют значительный интерес как для фундаментальной науки, так и с точки зрения практического применения. В рамках классических работ [1, 2] был проведен обширный теоретический анализ этих явлений. В последнее время особое внимание уделяется изучению процессов спин-зарядовой конверсии в двумерных материалах и их возможное использование для разработки новых устройств спинтроники. Примером может служить вычислительная ячейка, работа которой основана на эффекте переключения намагниченности за счет спин-орбитального крутящего момента (*spin-orbit torque*). В этой связи, актуальной задачей является изучение способов поляризации электронного газа по спину за счет приложения переменного электрического поля. Рассмотрение резонансного усиления амплитуды поляризации позволяет оптимизировать спин-зарядовую конверсию и предложить новые схемы использования данного явления в практических целях.

В нашей работе анализируются решения уравнений спиновой динамики, подобных уравнениям Блоха для ядерной намагниченности, для двумерной полупроводниковой системы со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы. Появляющийся при этом эффект можно назвать обратным спин-гальваническим эффектом. Рассматриваются траектории полюсов частотной зависимости спиновой восприимчивости при изменении параметров полупроводника и величины внешнего статического магнитного поля. Результаты могут быть использованы при произвольном соотношении величин статического магнитного поля и спин-орбитального взаимодействия, при этом особенно интересен режим, сочетающий чистые образцы с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Исследование спиновой динамики системы в зависимости от частоты возбуждения может дать важную информацию о микроскопических механизмах, стоящих за эффектом спиновой релаксации и спинового резонанса.

1. E.L. Ivchenko, G.E. Pikus, New photogalvanic effect in gyrotropic crystals (1978).
2. S.D. Ganichev et.al., Electric current-induced spin orientation in quantum well structures (2006).

С.А. Хахулин (асп., 3 год, СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
Д.Д. Фирсов, О.С. Комков (СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
В.А. Тимофеев, И.В. Скворцов, В.И. Машанов (ИФП СО РАН)

## ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ОТРАЖЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ НАНОАНТЕНН НА ПОВЕРХНОСТИ ИЗЛУЧАЮЩИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР GeSiSn/Si

Взаимодействие электромагнитного излучения с металлическими наночастицами приводит к осциллирующему движению свободных электронов в металле, в результате чего при определённой энергии возникает локализованный поверхностный плазмонный резонанс (localized surface plasmon resonance – LSPR). Данное явление широко используется для усиления комбинационного рассеяния и люминесценции полупроводников, ускорения химических реакций и т.д. Энергия резонанса сильно зависит от диэлектрического окружения и размеров наночастиц, что позволяет получать необходимое значение этой энергии в широком спектральном диапазоне [1]. Использование наночастиц прямоугольной формы приводит к тому, что наблюдаются две резонансные моды LSPR с разными значениями энергий вдоль длинной  $l$  и короткой  $s$  стороны таких частиц [2].

В настоящей работе представлено исследование массивов алюминиевых нанополосок прямоугольной формы, сформированных на поверхности излучающей полупроводниковой гетероструктуры GeSiSn/Si с множественными квантовыми ямами. В качестве метода исследования используется поляризационная спектроскопия отражения, в частности метод ИК фурье-спектроскопии анизотропного отражения [3], в котором осуществляется модуляция направления линейной поляризации зондового излучения в плоскости поверхности образцов. Такая модуляция вдоль сторон  $l$  и  $s$  прямоугольных нанополосок позволила выделить на фоне всего отражённого излучения поляризационно-зависимые участки спектров, связанные с наличием LSPR. В результате вдоль длинной стороны  $l$  возбуждается резонансная мода относительно большой интенсивности, и при увеличении длины  $l$  от 200 до 360 нм интенсивность увеличивается в несколько раз со сдвигом энергии резонанса от 1 эВ до 0.66 эВ, что близко к энергии пика наблюдаемой фотолюминесценции гетероструктуры GeSiSn/Si ( $\approx 0.65$  эВ). Кроме того, по спектрам анизотропного отражения в районе 1.1-1.2 эВ было определено наличие резонанса, возбуждаемого вдоль короткой стороны  $s$  с размерами от 140 до 157 нм (высота всех наночастиц 50 нм), интенсивность которого в разы меньше по сравнению со стороной  $l$  во всей серии образцов.

Таким образом, в работе определены спектральные особенности LSPR в массивах алюминиевых нанополосок на поверхности излучающей гетероструктуры GeSiSn/Si. Полученная информация играет важную роль при создании системы взаимодействующих излучающих и плазмонных структур для управления интенсивностью излучения.

1. E. Hutter, J. H. Fendler. *Adv. Mater.*, **16**(19), 1685 (2004).
2. O. Lecarme et al. *ACS Photonics*, **1**, 538 (2014).
3. D.D. Firsov, S.A. Khakhulin, O.S. Komkov. *Appl. Spectrosc.*, **77**(5), 470 (2023).

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

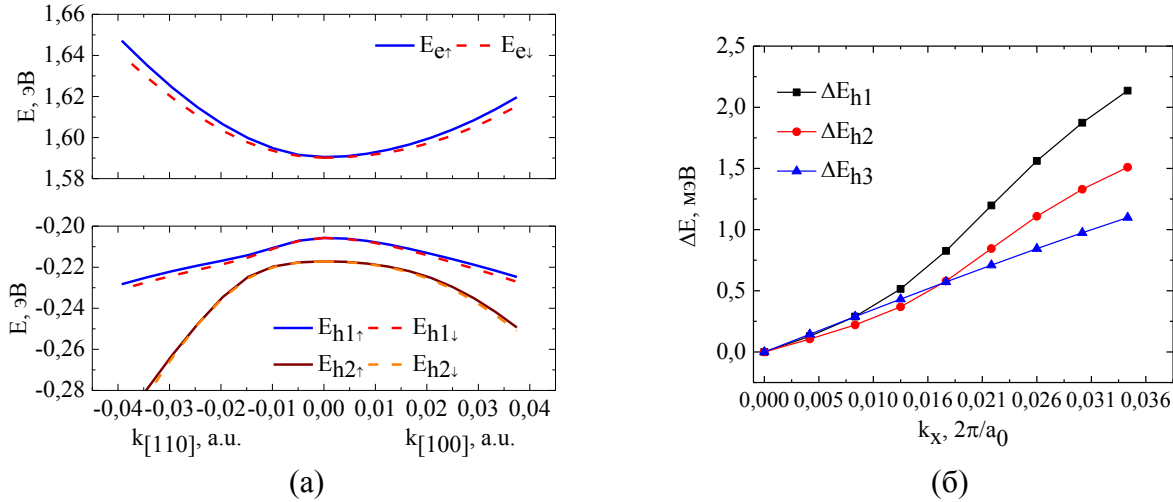
СПИНОВОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В  
ТОНКИХ СВЕРХРЕШЁТКАХ  $(\text{GaAs})_m/(\text{AlAs})_n$  БЕЗ УЧЁТА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

Расщепление энергетических состояний носителей заряда (НЗ) по спину в последние годы является перспективной областью исследования, поскольку расщепление такого рода предоставляют возможность создания устройств квантовых вычислений [1].

В данной работе рассматривается 1D-сверхрешётка (СР)  $(\text{GaAs})_m/(\text{AlAs})_n$ , где  $m$  и  $n$  указывает на число монослоёв GaAs и AlAs, соответственно. В нашем случае  $m = n = 2$ . Влияние деформационных эффектов не учитывалось, поскольку ими можно пренебречь.

Электронная структура СР была получена с помощью метода эмпирического псевдопотенциала. Использовался следующий гамильтониан электрона в СР:

$$H_{\mathbf{b}\mathbf{k}m_s, \mathbf{b}'\mathbf{k}'m'_s}(\mathbf{K}) = \left\{ \left[ \gamma \frac{\hbar^2 (\mathbf{b} + \mathbf{k} + \mathbf{K})^2}{2m_0} \delta_{\mathbf{b}\mathbf{b}'} + U_{\mathbf{b}\mathbf{b}'}^B \right] \delta_{m_s m'_s} + \right. \\ \left. \frac{\hbar^2}{4m_0^2 c^2} \eta^B \cdot i [(\mathbf{b} - \mathbf{b}') \times (\mathbf{b}' + \mathbf{k} + \mathbf{K})] U_{\mathbf{b}\mathbf{b}'}^B \sigma_{m_s m'_s} \right\} \delta_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} + \Delta U_{\mathbf{b}\mathbf{k}, \mathbf{b}'\mathbf{k}'} \delta_{m_s m'_s} + \\ \frac{\hbar^2}{4m_0^2 c^2} \Delta \eta \cdot i [(\mathbf{b} + \mathbf{k} - \mathbf{b}' - \mathbf{k}') \times (\mathbf{b}' + \mathbf{k}' + \mathbf{K})] \Delta U_{\mathbf{b}\mathbf{k}, \mathbf{b}'\mathbf{k}'} \sigma_{m_s m'_s}.$$



На рисунках показана дисперсия НЗ (а) и величина спинового расщепления для дырочных состояний (ДС) в направлении [100] (б). Получено, что для  $m = n = 2$  спиновое расщепление ДС составляет единицы мэВ, что на порядок ниже, чем заявлено для этой же структуры в [2].

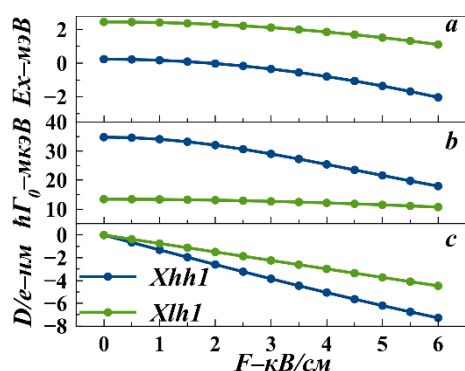
1. Jia-Xin Xiong, Shan Guan, Jun-Wei Luo, and Shu-Shen Li Phys. Rev. B, **103**, 2021. P. 085309.
2. Jun-Wei Luo, Athanasios N. Chantis, Mark van Schilfgaarde, Gabriel Bester, and Alex Zunger Phys. Rev. Lett. **104**, 2010. 066405.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ШТАРКА ДЛЯ ЭКСИТОНА В ШИРОКИХ КВАНТОВЫХ ЯМАХ GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As

Одним из способов управления экситоном является приложение электрического поля к гетероструктуре [1]. В электрическом поле возникает эффект Штарка для экситонов, хорошо наблюдаемый в широких квантовых ямах (КЯ). В данной работе мы привели микроскопическое моделирование эффекта Штарка для экситонов в КЯ различной ширины.

Мы рассматриваем упрощенную теоретическую модель: экситоны помещены в прямоугольную КЯ. Рассматриваются гетероструктуры GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As с КЯ шириной 30 нм, 50 нм и 100 нм. Микроскопическое моделирование экситонных состояний проводилось для электрического поля величиной от 0 до 6 кВ/см, приложенного в направлении роста гетероструктуры. В данной работе мы исследуем 3 состояния экситона: основное и первое возбужденное размерно-квантованные состояния экситона с тяжелой дыркой (Xhh1 и Xhh2) и основное состояние экситона с легкой дыркой (Xlh1). Для описания экситонных состояний численно решалось трёхмерное уравнение Шредингера методом конечных разностей (FDM) четвёртого порядка [2]. Были получены энергии и волновые функции экситонных состояний для различных значений электрического поля. Волновые функции позволяют вычислить константу свето-экситонного взаимодействия (радиационное уширение) по известным формулам [3]. Мы также описываем принцип расчета и соответствующие результаты для статического дипольного момента экситона, который возникает в электрическом поле в результате растяжения электронной и дырочной плотностей в экситоне.

Получены полевые зависимости энергии экситонного состояния  $E_x$ , радиационного



уширения  $\hbar\Gamma_0$ , статического дипольного момента  $D$  для КЯ различной ширины. Для примера на рисунке приведены результаты расчетов для КЯ шириной 30 нм. В электрических полях для экситона в КЯ наблюдается эффект Штарка: с ростом электрического поля уменьшается энергия экситонного состояния  $E_x$  (рис. a). Кроме этого, уменьшается радиационное уширение  $\hbar\Gamma_0$  (рис. b), что связано с уменьшением перекрытия волновых функций электрона и дырки в экситоне. Одновременно появляется дипольный момент экситона (рис. c).

Авторы благодарят проект РФФ № 19-72-20039.

1. L. Schultheis et al., *Phys. Rev. B.*, **119**, 6609 (1987).
2. E. S. Khrantsov, P. A. Belov, P. S. Grigoryev et al., *J. Appl. Phys.*, **36**, 184301 (2016).
3. E. L. Ivchenko, *Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures* (Springer, Berlin, 2004).



## ФОТОННОЕ ЭХО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КВАНТОВЫХ БИЕНИЙ В ШИРОКОЙ КВАНТОВОЙ ЯМЕ

Эксперимент по фотонному эху (ФЭ) позволяет наблюдать и изучать интерференцию квантовых состояний, что невозможно с помощью других методов. Широкая квантовая яма InGaAs/GaAs, исследуемая в работе, обладает набором энергетических уровней, связанных с квантованием поступательного движения экситона, что является необходимым условием для возникновения квантовых биений – явления, важного для понимания квантовой запутанности, лазерной генерации без инверсии заселенностей и создания ультрабыстрых оптических приборов. Из экспериментальных данных следует, что биения, наблюдаемые в работе, связаны с квантовыми биениями в широкой квантовой яме, а не с классической интерференцией света на детекторе сигнала. Это было установлено при помощи анализа временной динамики сигнала ФЭ (рис. 1). Результаты являются важным вкладом в понимание физики широких квантовых ям и могут иметь практические применения при создании долгоживущей оптической памяти на основе эффекта фотонного эха.

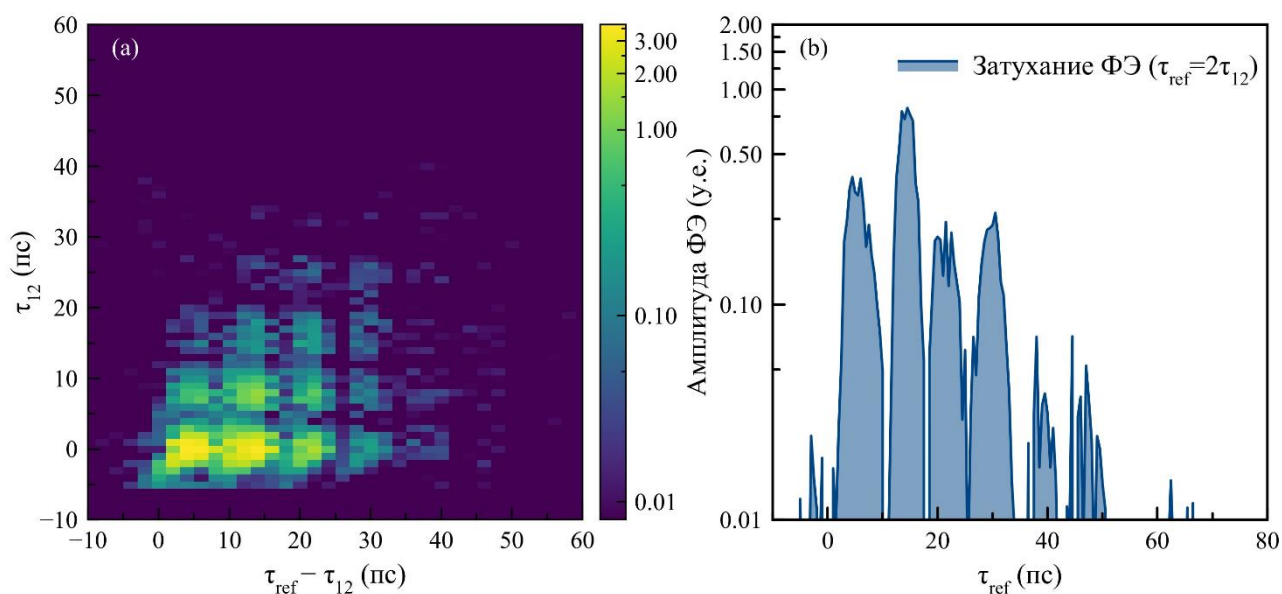


Рис. 1. (а) Зависимость амплитуды ФЭ от времени между возбуждающими импульсами  $\tau_{12}$  и временем детектирования  $\tau_{\text{ref}}$ . (б) Амплитуда ФЭ при различных  $\tau_{12} = \tau_{\text{ref}}$  (затухание ФЭ).

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

К.К. Григорян (студ., 5 курс, МФТИ ЛФИ, каф. ПТФ),  
Д.С. Зограбян (студ., 5 курс, МФТИ ЛФИ, каф. ПТФ),  
М.М. Глазов (д.ф.-м.н., член-корр. РАН, г.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## АНОМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА В СВЕРХЧИСТЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ КАНАЛАХ

Эффект Холла широко используется для характеристики и исследования полупроводников. Нормальный эффект Холла связан с действием силы Лоренца на электроны. Спин-орбитальное взаимодействие приводит к дополнительному, аномальному вкладу в эффект, пропорциональному спиновой поляризации электронов и не связанному с силой Лоренца. Такой аномальный эффект Холла крайне чувствителен к деталям зонной структуры, процессам электронного рассеяния и режиму транспорта носителей тока. В него вносят вклад три основных механизма: аномальная скорость, сдвиг волновых пакетов при рассеянии на примесях и фононах и асимметричное рассеяние на примесях и фононах [1].

В сверхчистых двумерных электронных системах длина свободного пробега сравнима или превышает ширину проводящего канала, что приводит к качественно новым режимам транспорта: баллистическому и гидродинамическому. Это, в свою очередь, приводит к нетривиальным транспортным и магнитотранспортным явлениям [2].

В настоящей работе построена микроскопическая теория аномального эффекта Холла в сверхчистых электронных каналах, где длина свободного пробега электрона по отношению к рассеянию на дефектах и фононах  $l$  значительно больше ширины канала  $w$ . Рассеяние электронов на стенках предполагается диффузным. Рассмотрены как баллистический режим, где длина межэлектронных столкновений  $l_{ee} \gg w$ , так и гидродинамический режим, где  $l_{ee} \ll w$ . В гидродинамическом режиме в канале формируется вязкая электронная жидкость. Для этих режимов рассчитаны все вклады в холловское поле. Найдено пространственное распределение аномального холловского поля в канале. Показано, что в отличие от исследованных ранее спинового и долинного эффектов Холла, которые могут возникать только за счет электрон-электронных столкновений [3], аномальный эффект Холла возможен лишь в меру процессов рассеяния носителей заряда по импульсу в объеме канала, причем холловское поле  $E_H \sim l^{-1}$  [4].

1. N.A. Sinitsyn, Semiclassical theories of the anomalous Hall effect. *J. Phys.: Cond. Mat.* **20**, 023201 (2007).
2. R. Krishna Kumar, et al., Superballistic flow of viscous electron fluid through graphene constrictions, *Nature Physics* **13**, 1182 (2017).
3. M.M. Glazov, Valley and spin accumulation in ballistic and hydrodynamic channels, *2D Mater.* **9**, 015027 (2022).
4. K.K. Grigoryan, D. S. Zohrabyan, and M. M. Glazov, Anomalous Hall effect in ultraclean electronic channels, arXiv:2309.05401 (2023).

А.А. Гуныга (студ., 5 курс, ИТМО, Новый Физтех; лаборант, ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
М.В. Дурнев (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ГЕНЕРАЦИЯ ФОТОТОКА СТРУКТУРИРОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

При воздействии электромагнитного излучения на полупроводниковую структуру наличие неоднородностей в системе приводит к возникновению нелинейного по амплитуде волны постоянного тока или тока на удвоенной частоте. Например, если у образца есть край, то вдоль него могут течь так называемые краевые токи [1]. В этой ситуации неоднородность содержится в образце, но возможно и обратное: облучение однородной структуры пространственно неоднородным (структурированным [2]) излучением также приводит к возникновению нелинейных по амплитуде волны токов. Широко известный пример такого эффекта – фототермоэлектрический эффект, связанный с неоднородным нагревом образца.

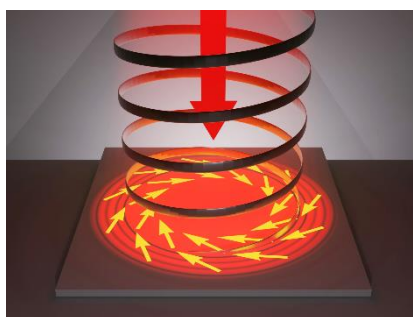


Рис. 1. Схематичное изображение фототока, генерируемого в двумерной полупроводниковой структуре закрученной электромагнитной волной.

В данной работе построена теория постоянных фототоков, генерируемых в двумерной полупроводниковой структуре структурированным излучением [3]. Показано, что фототок содержит три принципиально различных вклада, которые связаны с неоднородностью интенсивности излучения, с неоднородностью поляризации (параметров Стокса) и с неоднородностью фазы. В рамках кинетической теории Больцмана получены аналитические выражения для этих вкладов в области частот, соответствующих внутризонным переходам.

Построенная теория применена для анализа пространственного распределения фототока, возникающего при облучении двумерной полупроводниковой структуры закрученным светом – излучением, переносящим орбитальный угловой момент [4]. В настоящее время активно ведутся теоретические и экспериментальные исследования, связанные с созданием закрученного света и измерением его параметров [5]. В данной работе предложены способы измерения углового момента и поляризации закрученного света, связанные с возникновением постоянных магнитного поля и фотонапряжения.

1. M.V. Durnev, S.A. Tarasenko, *PRB*, **106**, 125426 (2022); *Appl. Sci.*, **13**, 4080 (2023).
2. A. Forbes, M. de Oliveira and M.R. Dennis, *Nat. Photonics.*, **15**, 253 (2021).
3. A.A. Gunyaga, M.V. Durnev and S.A. Tarasenko, *PRB*, **108**, 115402 (2023).
4. Б.А. Князев, В.Г. Сербо, *УФН*, **188**, 508 (2018).
5. Z. Ji, W. Liu, S. Krylyuk et al., *Science* **368**, 763 (2020).

Е.В. Доморацкий (студ., 5 курс, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),  
М.В. Захарченко (асп., 3 год, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ),  
Г.Ф. Глинский (д.ф.-м.н., проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ)

## ЭФФЕКТЫ РЕЗОНАНСНОГО ТУННЕЛИРОВАНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

Резонансным туннелированием в квантоворазмерных структурах называется прохождение носителей заряда через потенциальные барьеры конечной высоты при энергии носителей заряда, равной энергии резонанса в системе. Данный эффект находит применение при разработке различных приборов наноэлектроники – полупроводниковых оптических усилителей, каскадных лазеров, устройств спинтроники, работающих в высокочастотном диапазоне. Как правило, математический анализ резонансного туннелирования в квантоворазмерных структурах проводится с использованием метода матриц переноса для решения соответствующего уравнения Шрёдингера. Такой способ расчёта имеет высокую точность вычисления коэффициента прохождения, однако требует больших программных мощностей, а также связан с необходимостью задания большого числа граничных условий в случае многобарьерных структур и сложного (вырожденного) характера энергетических зон исходных материалов [1, 2]. Более общий и удобный подход к исследованию резонансного туннелирования может быть сформулирован в рамках биортогонального подхода к анализу квантовых систем, описываемых неэрмитовыми операторами [3].

В настоящей работе подробно исследуются эффекты резонансного туннелирования дырок в гетероструктурах на основе кубических полупроводников  $A^3B^5$ , содержащих одиночные и множественные барьеры. В рамках развиваемого подхода наряду с обычным потенциалом гетероструктуры в систему вводится дополнительный чисто мнимый диссипативный потенциал. Использование такого вспомогательного потенциала и периодических граничных условий позволяет сформулировать решение задачи в рамках метода эффективной массы с учетом сложного четырёхкратно вырожденного характера валентной зоны  $\Gamma_8$  [4]. В результате задача сводится к решению неоднородного уравнения Шрёдингера в  $k$ -представлении с использованием соответствующей матричной (4x4) функции Грина, параметрически зависящей от энергии. В работе исследовались различные многобарьерные структуры со сложным профилем распределения потенциала. Анализировались зависимость коэффициента прохождения от спиновой ориентации дырок, а также влияние на него короткодействующих интерфейсных поправок.

1. K. Mukhejee, N.R. Das, J. Appl. Phys. **109**, 053708 (2011).
2. G.V. Morrison, D.T. Cassidy, IEEE J. Quantum Electronics, **39** (3), 431 (2003).
3. М.В. Захарченко, Г.Ф. Глинский, ЖТФ, **10**, 1396 (2023).
4. Г.Ф. Глинский, Письма в ЖТФ, **46** (6), 20 (2020).

Н.С. Кузьмин (студ., 2 курс маг., НГУ, каф. ФПП),  
А.С. Ярошевич (к.ф.-м.н., с.н.с., ИФП СО РАН),  
В.А. Ткаченко (к.ф.-м.н., с.н.с., ИФП СО РАН)

## ОСОБЕННОСТИ СВЧ-ФОТОПРОВОДИМОСТИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕЧНЫХ КОНТАКТОВ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ AlGaAs/GaAs ГЕТЕРОСТРУКТУР С ВЫСОКОПОДВИЖНЫМ ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ

Квантовый точечный контакт (КТК) долгое время является одной из наиболее изучаемых систем одномерного баллистического транспорта электронов в полупроводниковых наноструктурах. В последнее время особый интерес для изучения представляет фотопроводимость КТК в туннельном режиме, когда измеряемый кондактанс много меньше кванта кондактанса  $G_0 = 2e^2/h$ . В данном режиме наблюдается гигантский рост проводимости при освещении структуры излучением микроволнового, терагерцового и СВЧ диапазонов.

В данной работе было экспериментально исследовано низкотемпературное (4.2 К) поведение СВЧ-фотопроводимости КТК, созданного на основе трех различных гетероструктур с высокоподвижным двумерным электронным газом: одиночного гетероперехода AlGaAs/GaAs с двумя легирующими слоями  $\delta$ -Si в слое AlGaAs (тип 1), одиночного гетероперехода AlGaAs/GaAs со сложной сверхрешеточной структурой легирования слоя AlGaAs (тип 2), двойного гетероперехода AlGaAs/GaAs/AlGaAs со структурой легирования слоев AlGaAs, как в случае 2 (тип 3). Во всех трех типах структур наблюдается гигантский фотокондактанс в туннельном режиме при освещении структур СВЧ-излучением и его рост при увеличении мощности падающего излучения. Из особенностей поведения фотокондактанса в этих структурах можно отметить смену его знака. В гетероструктурах типа 2 подобный эффект наблюдался при величине измеряемого кондактанса порядка  $0.5G_0$ , в гетероструктурах типа 3 при величине порядка  $G_0$ . В то же время в гетероструктуре типа 1 эффект смены знака фотокондактанса в одной серии измерений не наблюдался, а в другой серии, при другом захлаживании образца, смена знака происходила при величине кондактанса порядка  $0.25G_0$ .

Характерное поведение полученных зависимостей кондактанса в структурах типа 2, 3 объясняется моделью прохождения электронов над колеблющимся гладким потенциальным барьером (потенциалом Экарта). В структурах типа 1 вышеописанное поведение объясняется различным состоянием замороженной примесной системы, которое влияет на форму потенциала в двумерном электронном газе и КТК. Несомненным свидетельством отличия фактического двумерного потенциала от одномерного барьера Экарта является появление в туннельном режиме неизвестных ранее ступенек кондактанса и фотокондактанса КТК.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-30003, <https://rscf.ru/project/23-72-30003/>.

ГЕНЕРАЦИЯ ДЛИННОВОЛНОВОГО СТИМУЛИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
В КВАНТОВЫХ ЯМАХ HgCdTe С УВЕЛИЧЕННЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПОРОГОМ  
ОЖЕ-РЕКОМБИНАЦИИ

В последнее годы квантовые ямы (КЯ) HgCdTe рассматриваются как перспективный материал для создания длинноволновых источников когерентного излучения (диапазон длин волн  $\lambda > 20$  мкм) [1, 2]. Целью настоящей работы являлось исследование пороговой плотности мощности накачки и максимальной температуры, при которых возможна генерация на межзонных переходах в гетероструктурах с КЯ HgTe/CdHgTe в контексте сравнения с существующими длинноволновыми источниками, в частности с лазерами на основе халькогенидов свинца-олова (PbSnSe(Te)).

С целью уменьшения пороговой интенсивности накачки были апробированы дизайны диэлектрических волноводов, оптимизированные для снижения радиационных потерь. Как было показано ранее [2], увеличение толщины буферного слоя CdTe эффективно препятствует «вытеканию» моды в подложку, но ведет к значительному увеличению времени роста структур, поэтому в данной работе были также исследованы структуры, выращенные на  $n^{++}$ -GaAs подложке. В обоих случаях при накачке CO<sub>2</sub>-лазером с длиной волны 10.6 мкм оптимизация волноводного слоя позволила снизить пороговую интенсивность возникновения СИ более чем на порядок (до значений  $< 600$  Вт/см<sup>2</sup> при 8 К в импульсном режиме). В структурах, в которых излучением с длиной волны 10.6 мкм возбуждались носители с энергией ниже пороговой энергии оже-рекомбинации ( $E_{th}$ ), за счет подавления разогрева носителей из-за оже-процессов пороговую плотность мощности накачки возникновения СИ удалось снизить до значений  $\sim 10$  Вт/см<sup>2</sup> и добиться генерации в квазинепрерывном режиме при 8 - 20 К. В структурах, в которых накачкой CO<sub>2</sub>-лазером возбуждались носители с энергией выше  $E_{th}$ , «горячая» оже-рекомбинация приводила к быстрому разогреву носителей и гашению СИ. Таким образом, повышение  $E_{th}$  приводит как к повышению максимальной температуры генерации  $T_{max}$  (в лучших структурах  $T_{max} \sim 110$  К), так и к уменьшению пороговой плотности мощности накачки при более низких температурах, что создает предпосылки для реализации источников когерентного излучения, превосходящих по характеристикам используемые в диапазоне 15–30 мкм лазеры на основе PbSnSe(Te). На базе исследованных структур методом ионного травления были сформированы дисковые микрорезонаторы, в которых удалось наблюдать генерацию с характерной шириной линий  $0.2$  см<sup>-1</sup> (0.025 мэВ). Пороги генерации в таких микрорезонаторах позволяют осуществлять их оптическую накачку компактными квантово-каскадными лазерами среднего ИК-диапазона.

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

1. Morozov, S.V.; Romyantsev V. V., *et al.* ACS Photonics, 8, 3526-3535 (2021).
2. Romyantsev, V.V.; Dubinov, A.A., *et al.* Applied Physics Letters, 121, 182103 (2022).

Н.С. Сандаков (студ., 1 курс маг., УрФУ им. Б.Н. Ельцина (ИЕНиМ), каф. ФКСиНС),  
С.В. Гудина (к.ф.-м.н., с.н.с., ИФМ УрО РАН),  
В.Н. Неверов, А.С. Боголюбский, К.В. Туруткин, М.В. Якунин (ИФМ УрО РАН),  
И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко (НИЯУ «МИФИ»)

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА В КВАНТУЮЩИХ  
МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ В МЕТАМОРФНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ  
С КВАНТОВОЙ ЯМОЙ InGaAs

Исследовались квантовые гальваномагнитные явления, осцилляции Шубникова де-Гааза и квантовый эффект Холла в диапазоне температур  $T=(1.8-35)$  К на постоянном токе  $I=1$  мкА в магнитных полях  $B$  до 13 Тл в метаморфных гетероструктурах InGaAs/InAlAs с высоким содержанием InAs (>85 %) с шириной квантовой ямы InGaAs  $d=14$  нм, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [1]; концентрация электронов  $n_s= 6,8 \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup> и холловская подвижность  $\mu_n= 2 \times 10^5$  см<sup>2</sup>/(В×с).

Осцилляции продольного сопротивления в случае спин-вырожденных уровней Ландау (УЛ) описываются формулой Лифшица-Косевича [2] для первой гармоники в приближении независимости квантового времени релаксации импульса от  $T$ , и позволяют оценить значение эффективной массы  $m^*$ , которое составило  $m^*=0.037m_0$ , где  $m_0$ - масса свободного электрона.

С ростом температуры поведение продольного сопротивления в минимумах осцилляций, соответствующих плато КЭХ, может описываться активационным уравнением Аррениуса [3], что позволяет определить величины циклотронных и спиновых щелей в спектре УЛ. Обнаружено, что для циклотронных щелей температурная зависимость сопротивления демонстрирует увеличение энергии активации с ростом  $T$ . Так, для спин-расщепленных УЛ наблюдается активация электронов не только в соседний вышележащий УЛ со спином “вниз”  $N+1\downarrow$  ( $T<5$  К), но и в следующий за ним со спином “вверх”  $N+1\uparrow$  ( $T>14$  К). Для спин-вырожденных УЛ также наблюдается активация в два вышележащих уровня: с номером  $N+1$  ( $T<5$  К) и в следующий за ним  $N+2$  ( $T>14$  К). Значения  $g^*$  для спиновых щелей в нечетных факторах заполнения составили  $|g^*|= 10.3-16.3$ , для орбитальных щелей в четных факторах заполнения –  $|g^*|= 2.7-4.3$ . Таким образом, выявлен осциллирующий характер изменения  $g^*$  от  $B$ , что качественно согласуется с теоретическими представлениями [4].

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Электрон» Г.р. № 122021000039-4, при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024).

1. I.S. Vasil'evskii et al, *Semiconductors* **50**, 559 (2016).
2. I.M. Lifshitz, A.M. Kosevich, *JETP* **2**, 636 (1956).
3. A. Usher, et. al, *Phys. Rev. B* **41**, 1129 (1990).
4. T. Ando, Y. Uemura, *Phys. Soc. Japan* **37**, 1044 (1974).

Д.И. Сарыпов (студ., 2 курс маг., НГУ, каф. физики полупроводников),  
Д.А. Похабов, А.Г. Погосов, Д.А. Егоров, Е.Ю. Жданов, А.К. Бакаров (ИФП СО РАН, НГУ)

## ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННОГО РАССЕЯНИЯ В ПОДВЕШЕННОМ ДВУМЕРНОМ ЭЛЕКТРОННОМ ГАЗЕ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКИ

Известно, что электрон-электронное (е-е) взаимодействие может существенно влиять на мезоскопический электронный транспорт, когда длина е-е рассеяния становится сравнимой с характерными масштабами системы. Примечательно, что длину е-е рассеяния  $l_{ee}$  можно контролировать температурой. При температурах, когда длина е-е взаимодействия становится наименьшим масштабом в системе, можно наблюдать режим вязкого электронного транспорта и связанные с ним эффекты, которые в настоящее время широко изучаются. Один из способов точного измерения  $l_{ee}$ , основанный на подавлении резонансной баллистической траектории за счёт е-е рассеяния, связан с применением техники магнитной фокусировки [1]. В подвешенных полупроводниковых структурах, т.е. структурах, отделенных от подложки, е-е взаимодействие усиливается вследствие селективного вытравливания части экранирующей среды с высокой диэлектрической проницаемостью из-под структуры [2], однако на сегодняшний день это усиление подтверждается лишь теоретическими предсказаниями, а также немногочисленными экспериментами, косвенно указывающими на этот эффект.

В данной работе представлены результаты экспериментального сравнения длин е-е рассеяния в подвешенных и неподвешенных полупроводниковых структурах на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом. Для проведения измерений были созданы устройства, состоящие из двух квантовых точечных контактов, отдалённых на расстояние 4 мкм друг от друга, один из которых выступает в роли инжектора баллистических электронов, а другой — в роли детектора [3]. Напряжение на детекторе демонстрирует пик в магнитном поле, соответствующем циклотронному диаметру, равному расстоянию между инжектором и детектором. Из анализа температурных зависимостей амплитуды фокусировочных пиков получены длины е-е рассеяния в подвешенных и неподвешенных устройствах. Обнаружено усиление е-е-взаимодействия в подвешенных устройствах примерно в 1,2 раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №22-12-00343).

1. Gupta, A. et al., *Nat Commun* **12**, 5048 (2021).
2. Pogosov, A.G. et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **34**, 263001 (2022).
3. Sarypov D.I., et al., *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. **16**, 117–123 (2023).



М.К. Сотничук (студ., 3 курс спец., МГУ им. М.В. Ломоносова, каф. ОФиФКС),  
 А.В. Иконников (к.ф.-м.н., с.н.с., МГУ им. М.В. Ломоносова, каф. ОФиФКС)

## ОСТАТОЧНАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ HgTe/CdHgTe С ДВОЙНЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ С РАЗЛИЧНЫМИ ПОКРОВНЫМИ СЛОЯМИ

Эффект остаточной фотопроводимости (ОФП) заключается в изменении проводимости образца под действием света, причём установившееся значение сохраняется после выключения подсветки. Недавно в двойных квантовых ямах (ДКЯ) HgTe/CdHgTe было показано [1], что эффект можно использовать не только для изменения концентрации носителей заряда, но и для *обратимой* смены типа проводимости. Кроме того, ДКЯ HgTe/CdHgTe являются интересными объектами для исследований из-за возможности реализации в них нетривиальных топологических состояний. Поэтому управление концентрацией и типом проводимости с помощью подсветки в них представляется весьма полезным. Помимо обнаружения смены типа проводимости в предшествующих исследованиях [1, 2] были детально изучены спектры ОФП в ДКЯ HgTe/CdHgTe. Было показано, что ключевые особенности спектров ОФП в таких структурах связаны с наличием покровного слоя CdTe. Однако, это утверждение основывалось лишь на сравнении положения спектральных особенностей с энергетической диаграммой.

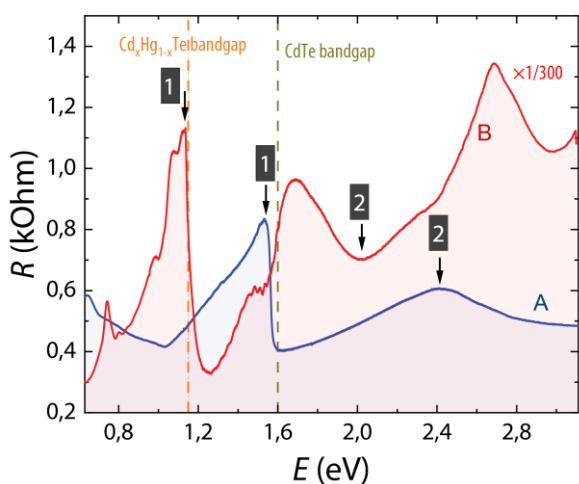


Рис. Измеренные при  $T = 4,2$  К спектры ОФП ДКЯ HgTe с покровными слоями CdTe (A) и CdHgTe (B). Цифрами обозначены основные особенности.

Кроме того, во всех образцах наблюдалось похожее осцилляторное поведение проводимости в диапазоне энергий  $0,9 - 1,5$  эВ, не связанное ни с покровным, ни с барьерным слоями.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 22-22-00382).

1. I. Nikolaev et al., JAP, **132**, 234301 (2022).
2. К.Е. Спиринов и др., ФТП, **52**, 1482 (2018).

С.С. Чекушева (студ., 1 курс маг., ННГУ им. Н.И. Лобачевского),  
А.А. Конаков (к.ф.-м.н., ННГУ им. Н.И. Лобачевского)

## ЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТР В КВАНТОВОЙ ЯМЕ InAs/GaSb С ИНВЕРТИРОВАННОЙ ЗОННОЙ СТРУКТУРОЙ В ПРИСУТСТВИИ МАГНИТНЫХ ПРИМЕСЕЙ

В настоящее время топологические изоляторы привлекают к себе огромное внимание в области фундаментального изучения физики поверхности, которая играет важную роль в наноструктурах. Топологический изолятор (ТИ) был впервые теоретически предсказан и экспериментально наблюдался в квантовых ямах HgTe [1].

Особенностью таких материалов является инвертированная зонная структура, из-за чего возможно формирование проводящих состояний на краю двумерного или поверхности трёхмерного ТИ.

В работе исследованы краевые состояния гетероструктуры AlSb/InAs/GaSb/AlSb в сравнении с симметричной квантовой ямой CdTe/HgTe. Нами решена задача о модификации краевых состояний в несимметричной структуре AlSb/InAs/GaSb/AlSb при внесении в структуру магнитных примесей.

Для расчетов использовалась шестизонная модель Кейна. Эффективный гамильтониан электрона в структуре AlSb/InAs/GaSb/AlSb аналогичен гамильтониану системы HgTe/CdTe, но содержит члены, описывающие сильную объемную инверсионную асимметрию (BIA) и структурную инверсионную асимметрию (SIA) [2]. Был посчитан вклад от спин-отщепленных дырок в энергию: для AlSb/InAs/GaSb/AlSb он составил менее 10%, поэтому было решено ими пренебречь. Релятивистские поправки, связанные со спин-орбитальным взаимодействием, были учтены в параметрах модели. Спектр представляет собой пересекающиеся прямые со спином «вверх» и со спином «вниз».

Магнитная примесь вводилась локально внутрь ямы. В зависимости от ее расположения наблюдали за изменением спектра. Выяснилось, что наличие магнитных примесей приводит к расщеплению спектра краевых состояний, причем сильнее всего это расщепление наблюдается, когда примесь локализована в центре ямы. Также было замечено, что CdTe/HgTe и AlSb/InAs/GaSb/AlSb по-разному реагируют на магнитные примеси. У симметричной ямы спектр расщепляется меньше, чем у несимметричной. Это из-за того, что в AlSb/InAs/GaSb/AlSb функции быстрее затухают и медленнее осциллируют.

Работа поддержана государственным заданием FSWR-2023-0052 и грантом Президента РФ МК-3046.2022.1.2.

1. Markus König et al. *Quantum Spin Hall Insulator State in HgTe Quantum Wells*. Science **318**, 766 (2007).
2. Chaoxing Liu et al. *Quantum Spin Hall Effect in Inverted Type-II Semiconductors*. Phys. Rev. Lett. **100**, 236601 (2008).

И.В. Чуманов (студ., 2 курс маг., СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
 Д.Д. Фирсов, Д.В. Коляда, О.С. Комков (СПбГЭТУ, каф. МНЭ),  
 И.В. Скворцов, В.И. Машанов, В.А. Тимофеев (ИФП СО РАН)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОСТРУКТУР GeSiSn/Ge/Si МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ ФОТООТРАЖЕНИЯ

Полупроводниковые гетероструктуры на основе соединений элементов Si, Ge и Sn являются перспективной основой для оптоэлектроники ближнего и среднего инфракрасного диапазона. Рассматриваемые соединения являются совместимыми с кремниевой технологией, а также способны формировать прямозонные твёрдые растворы, что позволит применять их для создания новых оптоэлектронных приборов [1].

В данной работе проведены исследования оптических свойств образцов гетероструктур со слоями твердых растворов на основе Si, Ge и Sn, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Структуры были выращены на подложке Si (100), на которой формировались буферный слой кремния толщиной 100 нм, 10 нм слой твердого раствора  $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}$  и 200 нм слой Ge, использовавшийся в качестве виртуальной подложки для слоя твёрдого раствора  $\text{Ge}_x\text{Si}_y\text{Sn}_{(1-x-y)}$  толщиной 200 нм. Были получены структуры, включающие слои  $\text{Ge}_{0.923}\text{Si}_{0.025}\text{Sn}_{0.052}$  (серия А), и  $\text{Ge}_{0.918}\text{Sn}_{0.082}$  (серия В). Образцы в каждой серии отличались условиями отжига. Для исследования оптических свойств рассматриваемых гетероструктур был задействован метод фотоотражения, основанный на использовании ИК фурье-спектроскопии [2]. Экспериментальная установка включала в себя ИК фурье-спектрометр Vertex 80, оснащенный CdHgTe и InGaAs фотодетекторами, синхронный усилитель SR-830, и лазер с длиной волны 405 нм, который модулировался механически с частотой 2,3 кГц.

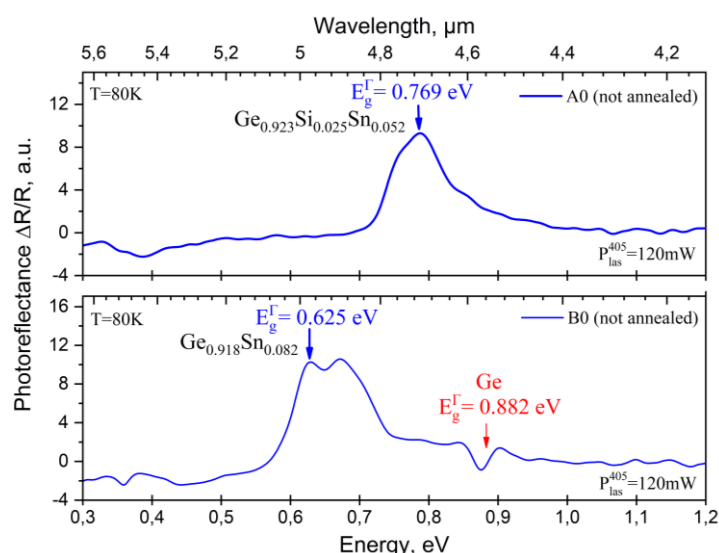


Рис. 1. Спектры фотоотражения для неотожжённых структур серии А и В при  $T=80$  К

В ходе анализа низкотемпературных спектров был обнаружен ряд особенностей, позволяющих оценить параметры их зонной структуры (рис. 1). Необходимо отметить, что метод фотомодуляционной фурье-спектроскопии для исследования данных структур применяется впервые. Результаты, полученные методом фотоотражения, предоставляют более подробную информацию в сравнении с методом фотолюминесценции, при котором для наших образцов не удалось наблюдать прямые переходы.

1. Timofeev V.A., et al. Materials Today Physics 33 (2023): 101052.
2. Фирсов Д.Д., Комков О. С., Письма в ЖТФ 39.23 (2013): 87-94.

А.А. Янцер (студ., 2 курс маг., ННГУ им. Лобачевского, каф. ФПЭН),  
М.А. Фадеев (к.ф.-м.н., н.с., ИФМ РАН)

## БЕСПОРОГОВАЯ ОЖЕ-РЕКОМБИНАЦИЯ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР HgCdTe В ДИАПАЗОНЕ 3 – 5 МКМ

Разработка полупроводниковых лазеров среднего инфракрасного диапазона (ИК) является одной из приоритетных задач прикладной физики, т.к. они востребованы в спектроскопии. В данной работе акцент сделан на окно прозрачности атмосферы 3 – 5 мкм, которое содержит большое число линий поглощения газов-поллютантов [1]. Несмотря на успехи, достигнутые каскадными лазерами, ведутся поиски альтернативных, более простых, решений [2]. При разработке межзонных полупроводниковых лазеров для среднего ИК-диапазона приходится сталкиваться с высоким темпом оже-рекомбинации, который приводит к резкому росту порога лазерной генерации с температурой. В работе исследуются гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) HgTe/CdHgTe (КРТ), в которых наблюдается подавление «пороговой» оже-рекомбинации. В то же время, в КЯ могут протекать и беспороговые оже-процессы, соответствующие переходу дырки/электрона с основного уровня КЯ в континуум барьерных слоёв. Их вероятность резко растёт, когда ширина запрещенной зоны с ростом температуры сравнивается с энергией разрыва зон. В работе проводится анализ скорости оже-процессов в структурах КРТ с разным содержанием Cd в барьерах КЯ.

Структуры, исследуемые в этой работе, выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующих подложках GaAs (013) [3] с буферами ZnTe и CdTe. Активная область во всех структурах состоит из 10 КЯ HgCdTe с остаточным содержанием Cd 6.5-12%. Структуры отличаются содержанием кадмия (74, 81, 87 и 92%) в барьерах КЯ.

В ходе работы исследуется стимулированное излучение (СИ) и фотолюминесценция (ФЛ) структур при оптической накачке. С увеличением содержания Cd (> 74%) в барьерах не наблюдается ожидаемое увеличение максимальной температуры генерации СИ за счёт подавления беспорогового оже-процесса. На основе спектров ФЛ была рассчитана и построена температурная зависимость коэффициента оже-рекомбинации. Во всех структурах наблюдается максимум на данной зависимости в области 60-110К. При этом в структурах с бóльшим содержанием Cd в барьерных слоях максимум сдвигается в сторону высоких температур (~110К) из-за бóльшего разрыва зон. Тем не менее, при температурах, близких к комнатной, коэффициент оже-рекомбинации в структурах с высоким барьером оказывается выше. Поэтому можно сделать вывод, что именно использование структур с низким барьером в диапазоне примерно 55-75% предпочтительно для достижения высоких рабочих температур.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-12-00310).

1. I.E. Gordon *et al.*, J. Quantum Spectrosc. Radiat. Transf., **203**, 3–69 (2017).
2. D. Jung *et al.*, J. Of Optics, **19**, 123001, (2017).
3. N.N. Mikhailov *et al.*, J. Nanotechnology, **3**, 120–130 (2006).

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

УДК 538.9

М.Н. Батаев (асп., 2 год, СПбГУ, каф. ФТТ),  
И.В. Игнатьев (д.ф.-м.н., проф., СПбГУ, каф. ФТТ),  
М.С. Кузнецова (к.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ, каф. SOLAB)

## ПОЛЯРНЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ФОНОНЫ В СПЕКТРАХ РЕЗОНАНСНОЙ И ГОРЯЧЕЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НК CsPbI<sub>3</sub>, СФОРМИРОВАННЫХ ВО ФТОРФОСФАТНОЙ СТЕКЛЯННОЙ МАТРИЦЕ

В настоящее время большой интерес привлекает исследование оптических свойств материалов на основе галоидных перовскитов CsPbX<sub>3</sub>, где X = Cl, Br или I. Более изученными на данный момент являются коллоидные перовскиты, но они характеризуются пониженной устойчивостью к внешнему физическому, химическому воздействию и разрушаются при высокой температуре. Одним из возможных способов защиты может быть формирование перовскитов в виде нанокристаллов (НК) во фторфосфатном стекле [1].

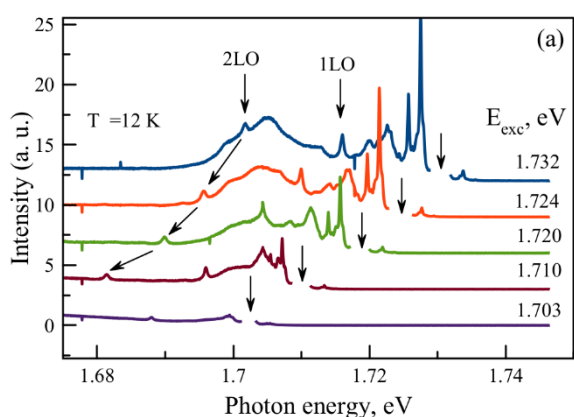


Рис. 1. Спектры резонансной ФЛ НК CsPbI<sub>3</sub> при разных энергиях возбуждения. Вертикальными стрелками показаны положения линии лазера.

В данной работе экспериментально изучены спектры резонансной фотолюминесценции (ФЛ) НК CsPbI<sub>3</sub>. На Рис. 1 приведены спектры, измеренные при разных энергиях возбуждения. Ниже энергии возбуждения, в спектрах можно наблюдать ряд узких пиков, которые сдвигаются вместе с лазерной линией. Они связаны с взаимодействием экситонов с полярными продольными оптическими фононами (LO)

кристаллической решетки [2]. Для интерпретации спектров проведен расчет фононных состояний в рамках теории функционала плотности. Сопоставление результатов расчета и эксперимента позволяет получать информацию о кристаллической структуре НК. Исследованы также фононные состояния при возбуждении много выше полосы ФЛ и проведено моделирование соотношения интенсивностей фононных реплик при многофононном рассеянии экситонов.

Авторы благодарят СПбГУ за финансовую поддержку в рамках грантов № 94030557 и № 94271404.

1. E.V. Kolobkova, M.S. Kuznetsova, N.V. Nikonorov. // J. Non-Cryst. Solids, **563**, 120811 (2021).
2. C. M. Iaru, A. Brodu, N. J. J. van Hoof, S. E. T. ter Huurne, J. Buhot, F. Mon-tanarella, S. Buhbut, P. C. M. Christianen, D. Vanmaekelbergh, C. de Mello Donega, et al. Nature Communications, **12**(1), 5844 (2021).

СПЕКТРО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛ SiGe НАНОСТРУКТУР С Ge(Si)  
НАНООСТРОВКАМИ, ВСТРОЕННЫМИ В ДВУМЕРНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

Одним из направлений исследований современной фотоники является модификация взаимодействия излучения с веществом за счёт использования различных микрорезонаторов, в частности фотонных кристаллов (ФК). Данные исследования направлены на создание элементов фотоники, включая лазеры с размерами, сравнимыми с рабочими длинами волн, что является важной задачей для развития интегральной оптоэлектроники [1].

Представляемая работа посвящена исследованию излучательных свойств SiGe структур с самоформирующимися Ge(Si) наноструктурами, встроенными в двумерные ФК. Проводимые исследования направлены на выявление основных факторов, приводящих к значительному (более чем на два порядка) возрастанию интенсивности ФЛ Ge(Si) островков в ФК по сравнению с исходными планарными структурами [2]. Среди таких факторов рассматриваются: улучшение вывода излучения из структуры за счёт подавления полного внутреннего отражения (ПВО); улучшение направленности вывода излучения на длинах волн, соответствующих определенным модам ФК; возрастание вероятности излучательной рекомбинации носителей заряда в островках вследствие их взаимодействия с модами ФК (эффект Парселла). В структурах на основе таких непрямозонных материалов как Si и Ge разделение вклада различных механизмов особенно затруднено в связи со значительным влиянием процессов безызлучательной рекомбинации. В связи с этим в данной работе наряду с периодическими ФК с различными параметрами были получены и исследованы так называемые "случайные ФК", представляющие собой массив случайно расположенных отверстий [3], а также периодические ФК с центральной областью без отверстий [4]. С помощью метода спектроскопии микро-ФЛ с высоким пространственным ( $\sim 1$  мкм), спектральным ( $\sim 0.1$  нм) и временным ( $\sim 50$  пс) разрешением [5] для полученных ФК проведены сравнительные исследования спектро-кинетических зависимостей интенсивности ФЛ при различных температурах измерения (от 77 до 300 К), исследовано пространственное распределение интенсивности ФЛ по поверхности ФК для различных мод ФК, определены области вывода излучения для разных типов ФК. На основании полученных результатов сделаны количественные оценки вклада различных механизмов (нарушение ПВО, улучшение направленности вывода излучения, эффект Парселла) в возрастание интенсивности ФЛ Ge(Si) островков в двумерных ФК на длинах волн, соответствующих модам ФК.

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

1. J. Wang, et al., Sci. Bull., 63, 1267 (2018).
2. M.V. Stepikhova, et al., Nanomaterials, 13, 1678 (2023).
3. A. Mahdavi, et al., Sci. Rep., 6, 25135 (2016).
4. M. Boroditsky, et al., Appl. Phys. Lett., 75, 1036 (1999).
5. А.Н. Яблонский, и др., ФТП., 54, 1150 (2020).

А. Кузнецов (м.н.с., МФТИ, лаб. ФН),  
Н.А. Фоминых (м.н.с., ВШЭ, лаб. КО),  
А.Н. Абрамов (инж., ИТМО, ФТМ),  
В.А. Шаров (м.н.с., Алфёровский университет, лаб. ВИЭ),  
В.М. Кондратьев (инж., Алфёровский университет, лаб. ОГСиОМ),  
В.В. Федоров (н.с., Алфёровский университет, лаб. ВИЭ),  
А.А. Воробьев (м.н.с., Алфёровский университет, лаб. ВИЭ),  
А.Д. Большаков (зав. лаб., МФТИ, лаб. ФН)

## САМОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ НИТЕВИДНЫЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ – ВОЛНОВОДЫ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ НАНОФОТОНИКИ

Новые технологии создания оптических схем требуют новых подходов и материалов. К ним относится разработка наноразмерных волноводов, которые должны обладать высоким показателем преломления, малым поперечным сечением и высоким кристаллическим совершенством. Всем этим критериям удовлетворяют нитевидные нанокристаллы (ННК) фосфида галлия (GaP) [1]. Мы исследуем влияние геометрии ННК на их волноводные свойства. Экспериментально и теоретически анализируется зависимость длины волны отсечки от диаметра ННК. Результаты моделирования собственных мод, определяющие дисперсию эффективного показателя преломления волноводов, хорошо сходятся с экспериментальными данными и диаметр отсечки составляет 105 нм для 532 нм, 143 нм для 643 нм и 183 нм для 808 нм. Механические свойства ННК позволяют изготавливать волноводы различной формы [2]. Показано, что если диаметр ННК превышает значение отсечки, то изгиб не приводит к уменьшению локализации поля даже при малых радиусах кривизны. Был изготовлен направленный ответвитель из двух ННК GaP. Исследование спектров пропускания с помощью лазера типа «суперконтинуум» показало, что ННК работает как фильтр. Результаты исследования волноводных свойств ННК GaP и протоколы изготовления изогнутых волноводов вносят весомый вклад в развитие нанофотоники и открывают новые возможности в разработке оптических интегральных схем [3].

А.К. выражает благодарность Минобрнауки (проект FSMG-2021-0005, соглашение 075-03-2023-106 от 13.01.2023) за поддержку характеристики методами микроскопии. В.М.К. выражает благодарность Минобрнауки (проект FSRM-2023-0009) за поддержку подготовки образцов. А.Д.Б. выражает благодарность Российскому научному фонду (Проект 22-79-10312) за поддержку численного моделирования.

1. K. Schneider, Y. Baumgartner, S. Hönl, P. Welter, H. Hahn, D. J. Wilson, L. Czornomaz, P. Seidler, *Optica*, **6**, 577 (2019).
2. V.A. Sharov, A.D. Bolshakov, V. v. Fedorov, S. Bruyere, G.E. Cirlin, P. A. Alekseev, I. S. Mukhin, *The Journal of Physical Chemistry*, **124**, 14054 (2020).
3. G.E. Lio, J. B. Madrigal, X. Xu, Y. Peng, S. Pierini, C. Couteau, S. Jradi, R. Bachelot, R. Caputo, S. Blaize. *Journal of Physical Chemistry C*, **123(23)**, 14669-14676 (2019).

И.Д. Лактаев (м.н.с., МГУ им. М.В. Ломоносова, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),  
Б.М. Саиджонов (к.х.н., МГУ им. М.В. Ломоносова),  
Р.Б. Васильев (д.х.н., проф., МГУ им. М.В. Ломоносова),  
О.В. Бутов (д.ф.-м.н., зам. дир., ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),  
А.М. Смирнов (д.ф.-м.н., с.н.с., МГУ им. М.В. Ломоносова,  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

## БИЭКСИТОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРАХ НАНОПЛАСТИНОК CdSe/CdS ПРИ ИХ ДВУХФОТОННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Последнее десятилетие активно ведутся исследования оптических свойств нанопластинок CdSe с высоким квантовым выходом фотолюминесценции (ФЛ) (более 85%) и с шириной полосы ФЛ около 10-30 нм в видимом и ближнем ИК диапазонах [1]. Наравне с квантовыми точками, нанопластины находят применения в различных областях науки и технологии, таких как оптоэлектроника, сенсорика, медицина и др. Изучение ФЛ наноструктур при их двухфотонном возбуждении наиболее интересно и перспективно в свете диагностики онкологических заболеваний посредством биомаркеров, поскольку в случае двухфотонного возбуждения ФЛ практически исключается возможность повреждения здоровых клеток исследуемого организма в отличие от однофотонного. Среди различных наноструктур, на основе которых возможно создание биомаркеров, можно отметить гетероструктурные нанопластины CdSe/CdS, отличающиеся высоким поперечным сечением двухфотонного поглощения и узкой шириной ФЛ [1]. Для практического применения нанопластинок в качестве биомаркеров необходимо изучить их фотолюминесцентные свойства при двухфотонном взаимодействии с лазерным излучением.

В данной работе исследованы особенности спектров ФЛ в коллоидном растворе нанопластинок CdSe с двумя монослоями оболочки CdS при резонансном двухфотонном лазерном возбуждении ( $\lambda=1064$  нм,  $\tau\approx 320$  фс,  $\nu=100$  кГц) экситонного перехода, связанного с легкими дырками ( $11h-1e$ , 536 нм). Обнаружена квадратичная зависимость интенсивности ФЛ нанопластинок от интенсивности лазерного возбуждения при умеренных интенсивностях возбуждения до 6 ГВт/см<sup>2</sup>. При интенсивностях 30-200 ГВт/см<sup>2</sup> выявлено, что показатель степени данной зависимости становится близким к 3. Обнаруженное изменение скорости роста ФЛ объяснено доминированием биэкситонного излучения над экситонным при высокоинтенсивном возбуждении [2]. Выше 200 ГВт/см<sup>2</sup> показатель степени зависимости уменьшается до 0,8 из-за увеличения темпа безызлучательной рекомбинации [2]. Кроме того, определены условия роста и тушения интенсивности ФЛ нанопластинок в зависимости от их концентрации в коллоидном растворе.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда 23-72-10008.

1. M. Sharma et al., *Proc. IEEE*, **108**, 655-675 (2019).
2. I.D. Laktaev et al., *J. Lumin.*, **252**, 119414 (2022).



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

### КРАЕВАЯ ПЛАЗМОННАЯ МОДА В ОГРАНИЧЕННОЙ ГРАФЕНОВОЙ СТРУКТУРЕ

Двумерные (2D) плазмоны используются для детектирования, генерации и усиления терагерцового излучения [1]. Графен перспективен для реализации 2D электронного газа [2] благодаря высокой подвижности носителей заряда [3] и времени релаксации их импульса, достигающему 10 пс при комнатной температуре [4].

Теоретически исследовано возбуждение плазмонов в графеновом прямоугольнике. Линейно поляризованная поперек длины прямоугольника терагерцовая волна нормально падает на плоскость, содержащую прямоугольник и разделяющую два полупространства с диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_1 = 1$  и  $\epsilon_2 = 4$ .

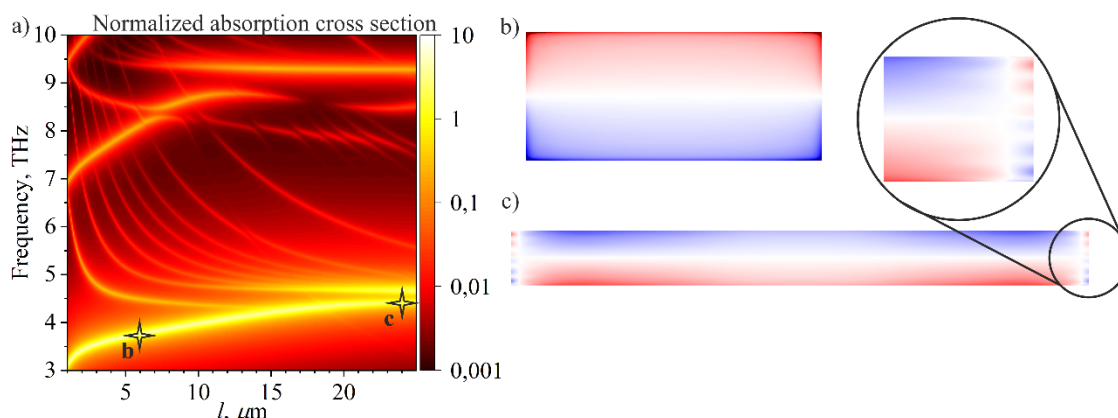


Рис. 1. Спектр нормированного сечения поглощения в зависимости от длины графенового прямоугольника (а). Распределение плотности заряда в графеновом прямоугольнике (б).

С использованием электродинамического подхода, построен спектр нормированного сечения поглощения в зависимости от длины  $l$  графенового прямоугольника при ширине 1 мкм (рис. 1а). Для отмеченных на рисунке 1а точек построено распределение плотности заряда в прямоугольнике (рис. 1б, 1с). Поперечная волна на рисунке 1б имеет один узел, а заряды на противоположных краях имеют разные знаки, что характеризует плазмонную моду с большим дипольным моментом, возбуждаемую волной, поляризованной поперек прямоугольника. С увеличением длины прямоугольника наблюдаются краевые эффекты (рис. 1с), имеющие малый дипольный момент и наблюдаемые только вблизи резонансов с большим дипольным моментом.

Работа поддержана грантом РФФ № 22-19-00611.

1. V. Ryzhii et al., *Appl. Phys. Lett.*, **116**(14), 140501 (2020).
2. F.H.L. Koppens et al., *Nano Lett.*, **11**(8), 3370 (2011).
3. A.S. Mayorov et al., *Nano Lett.*, **11**, 2396 (2011).
4. K. Tamura et al., *Appl. Phys. Lett.*, **7**, 126101 (2022).

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

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПАРНО-ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО ГАЗА ТЯЖЕЛЫХ ДЫРОК В СИЛЬНО-ВЫТЯНУТОЙ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНОЙ КВАНТОВОЙ ТОЧКЕ Ge/Si

Электронный (дырочный) газ, локализованный в квантовой точке (КТ), всегда был предметом широкого интереса теоретиков и экспериментаторов. Благодаря эффекту размерного квантования, наиболее ярко проявляющемуся в КТ, многочастичный спектр становится гибко управляемым, что отражается на всех характеристиках электронного газа: оптических, термодинамических, магнитных и т.д. Примером может служить обобщение теоремы Кона для несколькочастичного газа, локализованного в параболической КТ, когда специфический вид ограничивающего потенциала КТ приводит к реализации одночастичных переходов в многочастичной системе под действием длинноволнового возмущения [1]. Наряду с оптическими характеристиками представляет интерес и изучение термодинамических свойств электронного (дырочного) газа, локализованного в КТ различных геометрических форм и размеров. Статистическая сумма в КТ с относительно простой геометрией (сферической или цилиндрической) и слабым межчастичным взаимодействием может быть вычислена аналитически точно. Ясно, что для нетривиальных геометрий КТ расчет статистической суммы является более сложной задачей, и приходится прибегать к приближенным или численным методам (адиабатический метод, теория возмущений, метод конечных элементов, дискретная трансформация Фурье и т.д.). Существенным образом повлиять на термодинамические свойства локализованного в КТ газа может учет межчастичного взаимодействия.

В настоящей работе исследован несколькочастичный газ тяжелых дырок в сильно-вытянутой эллипсоидальной КТ Ge/Si. В качестве потенциала межчастичного взаимодействия выбран одномерный потенциал Мошинского, когда взаимодействие между частицами зависит от квадрата расстояния между ними [2]. В рамках Больцмановского приближения аналитически вычислена статистическая сумма несколькочастичного дырочного газа. На основе этого исследованы термодинамические параметры системы, такие как средняя энергия, свободная энергия, энтропия и теплоемкость. Показано, что с ростом температуры наблюдается рост средней энергии, и спад свободной энергии рассматриваемого газа. Рост межчастичного взаимодействия стабилизирует систему, и после резкого спада, при относительно небольших взаимодействиях, наблюдается насыщение энтропии при последующем увеличении межчастичного взаимодействия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (государственное задание FSEG-2023-0016).

1. D.B. Naupetyan, E.M. Kazaryan, M.A. Mkrtchyan, H.A. Sarkisyan, *Nanomaterials*, **10**, 1896 (2020).
2. M. Moshinsky, *American Journal of Physics*, **36**, 52 (1968).

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 ЛИНЗООБРАЗНОЙ КВАНТОВОЙ ТОЧКЕ Ge/Si ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Изучено поведение тяжелых дырок в сильно сплюснутой 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, перпендикулярного сечению квантовой линзы.

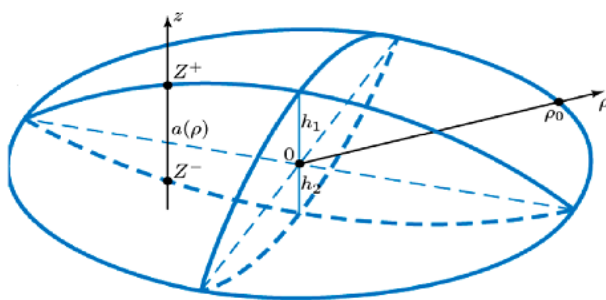


Рис. 1. Двояковыпуклая асимметричная линзообразная квантовая точка.

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, были изучены влияния температуры и напряженности магнитного поля на восприимчивости генерации второй и третьей гармоник.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (государственное задание FSEG-2023-0016).

1. М.А. Mkrtychyan, 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.А. Резник (к.ф.-м.н., н.с., Университет ИТМО, Физико-технический мегафакультет),  
Е.П. Колесова (к.ф.-м.н., н.с., Университет ИТМО, Физико-технический мегафакультет; НТУ  
«Сириус», НЦ Трансляционной медицины)

## ПОТЕНЦИАЛ ТРОЙНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК $\text{AgInS}_2$ ДЛЯ ТЕРАНОСТИКИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Тройные КТ  $\text{AgInS}_2$  являются многообещающей системой для наномедицины, сочетая в себе свойства флуорофоров и фотосенсибилизаторов, что позволит добиться значительного синергетического эффекта [1]. За счет эффекта размерного квантования, оптические свойства КТ могут контролируемо варьироваться путем изменения условий синтеза. Тройные КТ  $\text{AgInS}_2$  характеризуются высоким квантовым выходом флуоресценции в БИК области, что соответствует окну прозрачности тканей организма и позволит использовать их для визуализации опухолей и биораспределения частиц в организме. А генерация активных форм кислорода позволит использовать их как фотосенсибилизаторы для фотодинамической терапии онкологических заболеваний. Вышеизложенные факты делают КТ чрезвычайно перспективной системой для наномедицины.

Целью данной работы стало определение потенциала тройных КТ  $\text{AgInS}_2$  для терапии и диагностики онкологических заболеваний. В данной работе были синтезированы КТ  $\text{AgInS}_2$ , покрытые для увеличения квантового выхода люминесценции (КВЛ) оболочкой  $\text{ZnS}$ . Для синтеза КТ было использовано два разных подхода, с отмывкой от избытка прекурсоров перед наращиванием оболочки и без [2]. Флуоресцентные свойства КТ были оценены с помощью спектрофлуориметра и метода FLIM. Было продемонстрировано, что в случае предварительной отмывки прекурсоров перед наращиванием оболочки не наблюдается существенных изменений в оптических свойствах КТ. При этом без предварительной отмывки при наращивании оболочки наблюдалось увеличение КВЛ с 10% до 50% и сдвиг максимума полосы люминесценции с 640 до 575 нм. При этом анализ образцов с помощью электронной микроскопии показал, что размер КТ увеличился с 4 до 15 нм. Все описанные наблюдения могут свидетельствовать о том, что в процессе синтеза происходит формирование аллоидного слоя, который и приводит к улучшению люминесцентных свойств КТ. Также была оценена эффективность генерации АФК КТ под действием УФ излучения (365 нм). Результаты экспериментов с химическими показали, что КТ способны эффективно генерировать гидроксильный радикал. Была проанализирована темновая токсичность КТ на клетках рака молочной железы SKBR-3 с помощью МТТ теста. Полученные в работе результаты показывают высокую перспективность КТ для наномедицины. В развитие работы планируется оценить фотодинамический эффект КТ и проанализировать процесс их клеточной интернализации.

1. I.A. Mir et al., *Scientific report*, **8**, 9322 (2018).
2. A. Raevskaya A. et al., *The Journal of Physical Chemistry C*, **121**, 9032 (2017).

Р.В. Устименко (асп., СПбПУ, ВИФШ),  
Д.А. Караулов, М.Я. Винниченко, Д.А. Фирсов (СПбПУ, ВИФШ),  
А.А. Саркисян, Д.Б. Айрапетян, Э.М. Казарян (РАУ, Армения)

### ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ Ge/Si

Изучение свойств квантовых точек (КТ) является одним из перспективных направлений исследований, направленных на применение в совершенно разных областях: от электроники и астрофизики до медицины и энергетики. Благодаря контролю размеров и состава КТ возможно контролировать спектральный диапазон, в котором работает прибор на основе КТ.

В ходе работы были исследованы наноструктуры с КТ Ge/Si с концентрацией акцепторной примеси бора  $8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , а также нелегированные структуры. При помощи вакуумного фурье-спектрометра были получены спектры фотоиндуцированного внутризонного поглощения для двух поляризаций света при криогенных температурах вплоть до 4 К. Поглощение измерялось в условиях прямой межзонной нерезонансной оптической накачки с длиной волны 532 нм, а также непрямой в реальном пространстве резонансной накачки с длиной волны 1064 нм. Спектры поглощения *p*-поляризованного света содержали пики дырочных переходов с основного и возбуждённого уровней в непрерывный спектр с энергиями 280 и 230 мэВ. Также был обнаружен пик поглощения для обеих поляризаций света при энергии около 135 мэВ, который мы связываем с фотоионизацией глубоких примесных центров в Si. Из сравнения интегральной интенсивности пиков в зависимости от мощности оптической накачки обнаружено, что пик, соответствующий переходам из основного состояния в непрерывный спектр, растёт быстрее других с увеличением мощности, что связано с меньшим временем жизни на основном уровне дырок по сравнению с другими детектируемыми уровнями.

Также были получены спектры релаксации внутризонного фотоиндуцированного поглощения с различным временным разрешением в широком диапазоне температур образца при межзонной лазерной оптической накачке с длительностью импульсов 10 нс. Временной срез в момент прихода импульса лазерного излучения соответствует ранее полученным спектрам при непрерывной накачке. В рамках решения скоростных уравнений динамика затухания поглощения может быть описана через быструю и медленную компоненты. Быстрая компонента связана с вероятностью прямых и не прямых межзонных переходов в реальном пространстве, а медленная определяется вероятностью рекомбинации носителей заряда в Si и вероятностью захвата носителей в КТ из барьера.

Таким образом, подобные наноструктуры с КТ Ge/Si могут стать основой для фотоприемников и/или лазера с оптической накачкой при комнатной температуре, работающих в ближнем, среднем и дальнем инфракрасном диапазонах спектра.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РЦНИ (РФФИ) 20-52-05004, комитета по науке РА (грант SCS 20RF-041) и Минобрнауки РФ (государственное задание FSEG-2023-0016).

В.А. Шаров (к.ф.-м.н., м.н.с., Академический университет им. Ж.И. Алферова, лаб. Возобновляемых источников энергии)

## ИЗМЕРЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ GaP, ЛЕГИРОВАННЫХ КРЕМНИЕМ И БЕРИЛЛИЕМ, С ПОМОЩЬЮ ПРОВОДЯЩЕЙ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы (ННК) – это квазиодномерные наноструктуры, перспективные для наноэлектроники и нанофотоники, поскольку решеточно-рассогласованные  $A^{III}B^V$  гетероструктуры в форме ННК могут быть синтезированы непосредственно на кремниевых подложках [1]. Несмотря на обширные исследования ННК в последние 20 лет, внедрение приборов на их основе по-прежнему затруднительно, и основной технологической проблемой на пути к нему на сегодняшний день считается контроль легирования в наномасштабах [2]. В последнее время вопросам контроля легирования уделяется большое внимание в работах, посвященных ННК на основе наиболее технологически развитых оптоэлектронных материальных систем – InGaAs и InGaN. В настоящей работе исследованы ННК GaP, перспективные для оптоэлектроники и фотоники [3], свойства которых на сегодняшний день изучены в меньшей степени.

В настоящей работе с помощью проводящей атомно-силовой микроскопии исследована проводимость отдельных вертикальных ННК GaP из нескольких массивов, синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на высоколегированных кремниевых подложках (111). Суть метода заключается в формировании механического контакта между вершиной ННК и проводящим зондом АСМ с последующей регистрацией ВАХ ННК, используя зонд и ростовую подложку в качестве электродов. Исследовались ННК, легированные кремнием и бериллием, выращенные при различных температурах и соотношениях потоков V/III. В результате численного анализа полученных ВАХ был вычислен уровень легирования ННК. Установлено, что оптимальный механизм встраивания кремния – через боковую поверхность в рамках двухстадийного ростового процесса, когда на нелегированное ядро наращивается кремнийсодержащая оболочка. Выращенные таким образом ННК показали уровень легирования порядка  $N_D=5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Кроме того, было установлено окно ростовых параметров, отвечающее высокой эффективности встраивания бериллия (до  $N_A=2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) и не нарушающее морфологию ННК.

В работе впервые показаны подходы для синтеза высоколегированных ННК GaP методом молекулярно-пучковой эпитаксии, результаты открывают пути для развития полупроводниковых устройств, содержащих данные низкоразмерные структуры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-72-01082.

1. L.C. Chuang et al., *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 043115 (2007).
2. M. Friedl et al., *Nano lett.*, **20**, 3577 (2020).
3. D. Khmelevskaia et. Al., *Appl. Phys. Lett.* **118**, 201101 (2021).

## НЕРАВНОВЕСНАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ В НАНОПРОВОДАХ InAs/Al

Гибридные структуры из полупроводникового нанопровода, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии, и сверхпроводящей эпитаксиальной оболочки активно исследуются последнее десятилетие в контексте поиска майорановских состояний. В данной работе мы обратили внимание на взаимосвязь параметра порядка и квазичастичной неравновесности, особенно важную в мезоскопических сверхпроводниках.

Рассматривались InAs нанопровода диаметром около 150 нм в цилиндрической Al оболочке толщиной около 40 нм, выращенной *in situ*. Предложены две конфигурации образцов: поверх нанопровода напылены Al контактные площадки (Type-I) и контактные площадки из нормального металла напылены поверх нанопровода, с концов которого был предварительно стравлен алюминий (Type-II). Режим сверхпроводимости контролировался приложением магнитного поля параллельного нанопроводу: контактные площадки Type-I в  $\sim 10$  мТл переходят в нормальное состояние. Первый режим Type-I в поле меньше 10 мТл представляет собой равновесную сверхпроводимость, подавляемую критическим током. Type-I в поле больше 10 мТл и Type-II демонстрируют неравновесную сверхпроводимость, вызванную разными причинами. В первом случае из-за появления конечного сопротивления NS-границы сверхпроводимость исчезает при токе вдвое меньше критического и добавляется критическое напряжение, осциллирующее в магнитном поле в соответствии с эффектом Литтла-Паркса. Ввиду отсутствия релаксации возникает нетепловое подавление сверхпроводимости, вызванное критическим напряжением равным по порядку щели сверхпроводника 0.18 мВ, что оценивается с помощью решения самосогласованных уравнений Узаделя и БКШ. Образцы Type-II с островком *epi-S* длиной 0.7-2 мкм и сопротивлением 6-30 кОм сохраняют сверхпроводимость в нулевом поле до значительно больших напряжений в диапазоне 2-5 мВ, чего невозможно добиться без учета электрон-фононной релаксации [1]. Наличие сильной релаксации в островке независимо подтверждается измерениями дробового шума в нормальном состоянии в поле около 300 мТл. Таким образом, подавление сверхпроводимости объясняется перегревом *epi-S* относительно электронной температуры окружения, который определяется Джоулевой мощностью [2].

Благодарим группу Г. Кобльмюллера из университета В. Шоттки г. Мюнхен (ФРГ) за предоставленные образцы нанопроводов InAs/Al. Работа поддержана грантом РФФ 22-12-00342.

1. A.V. Bubis, E.V. Shpagina, A.G. Nasibulin, V.S. Khrapai, *Phys. Rev. B*, **104**, 125409 (2021).
2. A. Ibabe, M. Gómez, G.O. Steffensen, T. Kanne et al., *Nature Commun.*, **12**, 2873, (2023).

А. Эгбали (асп., 2 год, МФТИ, каф. ФиТН),  
А.А. Вишневый (к.ф.-м.н., в.н.с., МФТИ, Центр фотоники и двумерных материалов)

## ПОВЫШЕНИЕ ДОБРОТНОСТИ СФЕРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ РАДИАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ

После открытия гигантской оптической анизотропии в дихалькогенидах переходных металлов (ДПМ) [1] были предприняты различные успешные попытки создания новых частиц и разработки устройств с лучшими характеристиками. Недавно были изготовлены сферические наночастицы из ДПМ материалов со значительной радиальной анизотропией [2]. Отрицательная анизотропия позволяет улучшить рабочие характеристики волноводов [3]. Учитывая это, интересен вопрос о влиянии сильной оптической анизотропии на резонансы, в частности, резонансы Ми.

В данной работе было изучено сечение рассеяния и добротность электрической дипольной моды первого порядка однородной сферы радиусом 100 нм. Предполагалось, что показатель преломления обладает радиальной анизотропией, тангенциальная компонента показателя преломления  $n_t = 5$ , а радиальная  $n_r$  — изменяется в пределах от 1 до 10. Было получено, что рост  $n_r$  выше 5 приводит к росту добротности, что согласуется с результатом для изотропных сфер, добротность резонансов которых увеличивается с ростом  $n$ . При снижении  $n_r$  от 5 до 1 наблюдается нетривиальный эффект: добротность сначала уменьшается, достигая минимума при  $n_r = 2.7$ , а затем начинает увеличиваться, достигая максимального значения, на 29% превышающего добротность изотропной сферы с  $n = 5$  при  $n_r$  стремящемся к 1. При этом резонансная длина волны монотонно убывает. Такое поведение можно качественно объяснить в рамках концепции двух эффективных  $n$  анизотропной среды [4]. Так, эффективный  $n$ , отвечающий за набег фазы при распространении плоских волн, уменьшается с уменьшением  $n_r$ , что приводит к достижению резонанса на меньшей длине волны. В то же время эффективный  $n$ , отвечающий за отражение на границе между сферой и окружением, повышается, что уменьшает проницаемость границы и приводит к более эффективному удержанию энергии поля внутри сферы.

Полученные результаты закладывают теоретические основы использования анизотропных материалов с сильной анизотропией, таких как материалы Ван-дер-Ваальса, в нанофотонике.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-10312).

1. Ermolaev G.A. et al., Nat. Commun. **12** 854 (2021).
2. Tselikov G.I. et al., Proc. Natl. Acad. Sci. **119** e2208830119 (2022).
3. Vyshnevyy A.A. et al., Nano Letters **23** 8057 (2023).
4. Eghbali A. et al, Biosensors. **12** 582 (2022).



М.А. Аникина (инж., МФТИ, лаб. ФН),  
А. Кузнецов (м.н.с., МФТИ, лаб. ФН),  
А.Н. Токсумаков (инж., МФТИ, лаб. ПНФиКМ),  
А. Абрамов (инж., ИТМО, ФТМ),  
В.В. Федоров (с.н.с., к.ф.-м.н., Алфёровский университет, лаб. ВИЭ),  
Д.А. Казарян (с.н.с., к.ф.-м.н., лаб. ПНФиКМ),  
А.Д. Большаков (зав. лаб., к.ф.-м.н., МФТИ, лаб. ФН)

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ GaP И ТОНКИХ СЛОЕВ MoS<sub>2</sub>

В данной работе была исследована гибридная система на основе нитевидного нанокристалла (ННК) GaP и тонкого слоя MoS<sub>2</sub>. GaP известен как непрямозонный полупроводник (2.26 эВ при 300 К) с высокими показателем преломления и коэффициентами нелинейного оптического преобразования, что делает его привлекательным для создания оптических резонаторов и волноводов. Дихалькогениды переходных металлов (ТМД), такие как MoS<sub>2</sub>, обладают рядом уникальных физических свойств. Изменение толщины кристалла приводит к изменению зонной структуры. Монослои являются прямозонными и обладают эффективным откликом фотолюминесценции (ФЛ) в видимом и ближнем ИК диапазонах.

Структура была изготовлена капельным нанесением суспензии с ННК GaP, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, на подложку Si/SiO<sub>x</sub> с тонкими слоями MoS<sub>2</sub>, полученными методом механической эксфолиации. Дополнительно ННК позиционировались зондом АСМ. Исследование оптических свойств проводилось методами микроспектроскопии комбинационного рассеяния (КР) и фотолюминесценции. В результате анализа спектров КРС было установлено, что слой MoS<sub>2</sub> имеет моноатомную толщину и она однородна в области нахождения ННК. Спектры КР ННК GaP содержат характерные пики как для структуры сфалерита, так и вюрцита. Карты интегральной интенсивности ФЛ демонстрируют наличие отклика со слоя MoS<sub>2</sub>, а также усиление его интенсивности в области торца ННК. Также обнаруживается отклик в диапазоне фотолюминесценции MoS<sub>2</sub> с конца ННК, не лежащего на слое ТМДС, что подтверждает наличие волноводных свойств ННК и демонстрирует возможность получения направленного вывода сигнала ФЛ со слоя MoS<sub>2</sub> в совокупности со спектральной модуляцией.

М.А.А. выражает благодарность Минобрнауки (проект FSMG-2021-0005, соглашение 075-03-2023-106 от 13.01.2023) за поддержку характеристики методами микроспектроскопии. А.К. выражает благодарность Минобрнауки (проект FSRM-2023-0009) за поддержку структурной характеристики образцов. А.Д.Б. выражает благодарность Российскому научному фонду (Проект 22-19-00558) за поддержку создания образцов.

А.О. Баженов (студ., 2 курс маг., НГУ, каф. физики полупроводников),  
Н.П. Степина (д.ф.-м.н., с.н.с., ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН)

## ОСОБЕННОСТИ МАГНЕТСОПРОТИВЛЕНИЯ И ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПЛЕНКАХ ТРЕХМЕРНОГО ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИДОВ ВИСМУТА И СУРЬМЫ

Проявление уникальных свойств трехмерных топологических изоляторов (ТИ) привлекает большое внимание научного сообщества в силу перспективности их использования в качестве основы для спин-зависимых устройств. Сочетание симметрии обращения времени и сильного спин-орбитального взаимодействия в данных материалах приводит к образованию поверхностных состояний на границе топологического и тривиального изолятора, которые описываются нечетным числом конусов Дирака с направлением спина, ортогональным волновому вектору и однозначно с ним связанным. Данные состояния устойчивы к обратному 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.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование магнето-транспортных свойств пленок четырехкомпонентного топологического изолятора на основе халькогенидов висмута и сурьмы (BSTS), выращенных с использованием метода молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке Si(111). Обнаружено положительное магнетосопротивление (МС), не насыщающееся вплоть до полей 12 Т. При его описании в области малых полей функцией Хиками наблюдаются необычно высокие значения префактора  $\alpha$ , не характерные для модели слабой антилокализации. Высоко-полевая часть МС слабо чувствительна к направлению магнитного поля и может быть описана с учетом электрон-электронного взаимодействия, которое изменяется в магнитном поле за счет эффекта Зеемана из-за достаточно больших значений  $g$ -фактора для таких пленок.

Детальный анализ эффекта Холла показал, что коэффициент Холла немонотонен и сильно изменяется в слабых полях, причем величина его нелинейности зависит от концентрации носителей заряда. Для совместного описания МС и эффекта Холла предложена модель, основанная на открытии щели в дираковском спектре поверхностных состояний за счет эффекта Зеемана и соответствующем перераспределении транспортных потоков. Этот механизм, совместно с эффектами слабой антилокализации и электрон-электронного взаимодействия, позволяет качественно объяснить наблюдаемые экспериментальные эффекты.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда и правительства Новосибирской области № 22-22-20074.

Е.А. Башегурова (студ., 3 курс, СПбГУ, каф. фотоники),  
 Е.И. Дерибина (асп., 1 год, СПбГУ, каф. фотоники),  
 Ю.В. Капитонов (к.ф.-м.н., доц., СПбГУ, каф. фотоники)

### ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК GaAs/AlGaAs

В этой работе были изучены квантовые точки (КТ) на основе GaAs/AlGaAs; спектр фотолюминесценции (ФЛ) образца с такими КТ содержит несколько пиков, связанных с различными гетероструктурами внутри полупроводника. В публикации [1] исследовались два спектрально разрешенных ансамбля КТ (точки А и точки В), но их происхождение объяснено не было. Основная цель исследования: определить, какая часть структуры образца соответствует определенным частям спектра, и положение этих объектов относительно друг друга в образце.

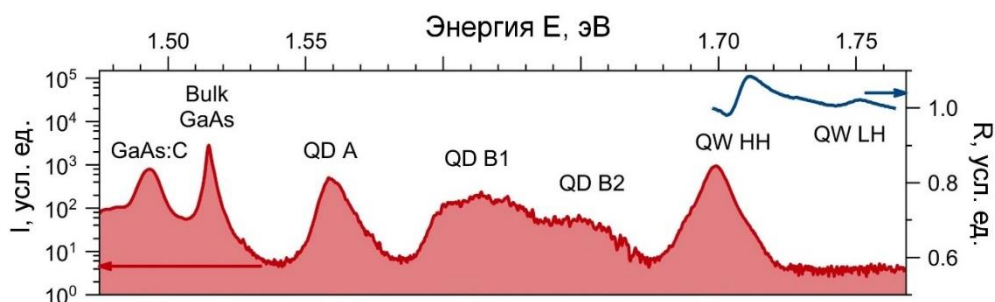


Рис. 1. Усредненный спектр ФЛ ( $T = 4$  К, красная кривая) и спектр отражения ( $T = 10$  К, синяя кривая).

На рис. 1 показаны спектр ФЛ и отражения, на котором можно выделить следующие резонансы (начиная с наименьшей энергии): углеродное загрязнение образца, трехмерный кристалл арсенида галлия, объект исследования – КТ, связанные с ними квантоворазмерные структуры, экситоны тяжелых дырок и экситоны легких дырок в квантовой яме.

После сканирования образца, была вычислена корреляционная карта, на ней было выделено три области: корреляция излучения пиков – одновременное появление или исчезновение излучения во время сканирования, области антикорреляции излучения, когда появление одного пика случается вместе с исчезновением другого, а также области, в которых излучение отсутствует, постоянно или некоррелированно.

В результате, было получено описание спектра ФЛ полупроводника GaAs/AlGaAs с КТ. Описание спектра из [1] было дополнено, и было определено, что КТ двух типов, на самом деле являются КТ и другими квантоворазмерными структурами, спектры которых коррелируют или антикоррелируют как внутри своих ансамблей, так и со спектром излучения КТ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ проект 19-52-12046 и Министерства науки и высшего образования РФ (Мегагрант № 075-15-2022-1112). Работа выполнена на оборудовании ресурсного центра СПбГУ "Нанопотоника".

1. Ulhaq A., Duan Q., Zallo E., Ding F., Schmidt O. G., Tartakovskii A. I., Skolnick M. S., and Chekhovich E. A., *Phys. Rev. B*, **93**, 165306, (2016).

Н.В. Гурулева (студ., 4 курс, Академический университет им. Ж.И. Алферова),  
А.А. Корякин (к.ф.-м.н., н.с., Академический университет им. Ж.И. Алферова)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА Ga-КАТАЛИТИЧЕСКИХ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ GaAs: ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВЕРХНЕЙ ГРАНИ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ ФАЗУ

Нитевидные нанокристаллы (ННК), выращенные по механизму пар-жидкость-кристалл (ПЖК), имеют множество потенциальных применений в электронике, оптоэлектронике, фотовольтаике и сенсорике благодаря своей уникальной форме, высокому кристаллическому качеству и наличию квантово-размерных эффектов. ПЖК рост ННК обычно осуществляется методами молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) и МОС-гидридной эпитаксии. Контроль формы и кристаллической структуры ННК, выращенных по механизму ПЖК, имеет решающее значение для создания структур с заданными характеристиками. При ПЖК росте ННК часто наблюдается явление политипизма (чередование вставок со структурой сфалерита и вюрцита). Для описания кристаллической структуры часто используется кинетический подход классической теории нуклеации. Большинство моделей, использующих данный подход, рассматривают ННК цилиндрической формы, в таком случае капля принимает сферическую форму, что значительно упрощает расчеты, но при этом не учитывается влияние изменений локального контактного угла капли на зарождение *c*- и *h*-островков (соответствующих кубической и гексагональной фазе), так как у сферической капли это значение не меняется в зависимости от координаты.

В данной работе рассматривается вопрос влияния изменения геометрии верхней грани ННК на интенсивность нуклеации кубических и гексагональных слоев в зависимости от значения локального контактного угла капли на верхней грани ННК. Нахождение формы капли, находящейся на верхней грани ННК произведено численно, как и в [1], методом градиентного спуска с использованием программного обеспечения Surface Evolver. Была разработана модель Ga-каталитического роста GaAs ННК методом МПЭ при различных температуре и потоке атомов группы V в предположении различной геометрии верхней грани ННК. В результате были получены зависимости относительной вероятности зарождения островков гексагональной структуры, то есть вероятности смены кристаллической фазы, от среднего контактного угла капли, для случая роста ННК с различной формой верхней грани. Обнаружено, что максимум этой зависимости смещается в область больших контактных углов при уменьшении длины узких краев верхней грани ННК. Показано, что островки зарождаются преимущественно вблизи углов верхней грани ННК из-за наличия широкого диапазона углов. Полученные результаты важны для дальнейшего развития теории политипизма в нанокристаллах  $A_{III}B_V$ , выращенных методом МПЭ.

1. Krogstrup, P.; Curiotto, S.; Johnson, E.; Aagesen, M.; Nygård, J.; Chatain, D., *Phys. Rev. Lett.*, **106**, 125505, (2011).

А.А. Живописцев (студ., 2 курс маг., НИУ ВШЭ, каф. при ИОФ РАН),  
А.М. Ромшин (асп. 4 год, ИОФ РАН),  
А.В. Грициенко (асп., 4 год, ФИАН, МФТИ),  
П.В. Лега (к.ф.-м.н., 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)

## ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ ОДИНОЧНЫХ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ «КРЕМНИЙ–ВАКАНСИЯ» В НАНОАЛМАЗАХ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ УГЛУБЛЕНИЯХ НА ЗОЛОТОЙ ПЛЕНКЕ

Источники одиночных фотонов (ИОФ) крайне востребованы в реализации квантовых протоколов передачи и обработки информации [1]. Такие источники должны обладать высокой фотостабильностью, яркостью и излучать в узком спектральном диапазоне. Центры окраски «кремний-вакансия» (SiV) в нанодиамазах, имея яркую и узкую (~6 нм) бесфонную линию в ближней ИК области (738 нм), являются перспективными кандидатами на эту роль. Эффективность излучения SiV-центров значительно улучшается при размещении нанодиамазов в микрорезонаторах [2] за счет увеличения скорости спонтанных переходов и повышения направленности излучения. Более того, скорость фотовозбуждения квантового эмиттера может быть существенно усилена, что наиболее ярко проявляется в случае плазмонных нанодиамазов.

В данной работе изучалась флуоресценция одиночных SiV-центров в НРНТ-нанодиамазах, размещенных на 1) поверхности кремния, 2) поверхности золотой пленки и 3) цилиндрическом углублении (ЦУ) на поверхности золотой пленки. На первом этапе с использованием конфокального микроскопа были измерены кривые насыщения, спектры и времена затухания флуоресценции частиц на кремнии и поверхности золотой пленки. Затем методом “pick-and-place” нанодиамазы перемещались в ЦУ на золотой пленке, где проводились аналогичные измерения. Было обнаружено, что интенсивность насыщения одиночных SiV-центров в ЦУ увеличивается в 5 раз в сравнении с аналогичными алмазами на поверхности кремния наряду с двукратным уменьшением мощности насыщения и 30% сокращением времени жизни. Полученные результаты объясняются взаимодействием SiV-центров с поверхностным плазмоном в золотой пленке, а также повышенной экстинкцией лазерного излучения, приводящей к большей скорости фотовозбуждения SiV-центров.

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

1. Peyskens F. et al. Integration of single photon emitters in 2D layered materials with a silicon nitride photonic chip //Nature communications. – 2019. – Т. 10. – №. 1. – С. 4435.
2. Janitz E., Bhaskar M.K., Childress L. Cavity quantum electrodynamics with color centers in diamond //Optica. – 2020. – Т. 7. – №. 10. – С. 1232-1252.

Е.П. Карасёва (студ., 3 курс бак., Академический университет им. Ж.И. Алфёрова),  
И.А. Козко (студ., 4 курс бак., СПбПУ, ФизМех),  
М.А. Ридер (асп., 1 год, Университет ИТМО),  
В.М. Кондратьев (асп., 4 год, Академический университет им. Ж.И. Алфёрова),  
А.Д. Большаков (к.ф.-м.н., с.н.с.-зав. лаб., МФТИ, Физтех)

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ И ПУТИ ИХ МОДИФИКАЦИИ

Свойства гибридных структур на базе наноструктурных материалов и покрытий на основе углерода активно исследуются по всему миру. Данная работа посвящена изучению фотоэлектронных свойств нитевидных нанокристаллов галлия (ННК GaP), а также ННК GaP, модифицированных углеродными наноточками (УТ), в зависимости от температуры в свете возможности производства эффективных фотодетекторов на их основе.

ННК GaP со средней длиной 20 мкм и диаметром 150 нм были получены методами молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на кремниевой подложке с ориентацией (111). Их поверхность модифицировалась методами капельного нанесения водного раствора УТ, синтезированных химически [1]. Полученные ННК GaP и GaP/УТ отделялись от ростовой подложки методом ультразвуковой обработки в изопропиловом спирте, после чего капельно переносились на измерительную платформу с нанесенными на неё встречноштыревыми контактами концентрической конфигурации. Высыхание суспензии с ННК на поверхности концентрических контактов приводило к развороту торцевых граней ННК к центру капли с последующим электрическим соединением ННК со встречноштыревыми контактами и между собой. Таким образом были синтезированы два типа фотодетекторов: на базе ННК GaP и ННК GaP/УТ. Для всех наноструктур были получены спектры импеданса в темновых условиях и при облучении их светом УФ диапазона (390 нм) как при комнатной температуре (25 °С), так и в условиях нагрева: 105, 155 и 205 °С.

Анализ спектров импеданса позволил получить классическую величину резистивного отклика фотодетекторов на облучение светом (в терминах %). Было обнаружено, что наибольший отклик к УФ (390 нм) показывают гетерокомпозиции ННК GaP/УТ при комнатной температуре (порядка 40%), при этом отклик фотодетекторов уменьшается до 25% при нагреве таких наноструктур и не сильно зависит от температуры нагрева. ННК GaP без модификации показывают фотоотклик на уровне 10%, с повышением до 13% при нагреве. Представленные в данной работе результаты имеют наибольший интерес с точки зрения демонстрации возможности модификации фотоэлектронных свойств непрямозонных полупроводниковых материалов нанометровой геометрии и возможностью повышения их фототклика к УФ.

1. Mariia Stepanova, *Nanomaterials*, **12(9)**, 1396, (2022).

И.А. Козко (студ., 4 курс бак., СПбПУ, ФизМех),  
Е.П. Карасёва (студ., 3 курс бак., Академический университет им. Ж.И. Алфёрова),  
М.С. Истомина (м.н.с., ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России),  
В.М. Кондратьев (асп., 4 год, Академический университет им. Ж.И. Алфёрова),  
А.Д. Большаков (к.ф.-м.н., с.н.с.-зав. лаб., МФТИ, Физтех)

## ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ И УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК

На сегодняшний день наноструктуры различных полупроводниковых материалов активно используются для решения задач сенсорики [1], интегральной фотоники [2] и других отраслей наноэлектроники. Данная работа посвящена созданию фотодетекторов широкого спектрального диапазона на базе нитевидных нанокристаллов фосфида галлия (ННК GaP), синтезированных методами молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на кремниевой подложке с ориентацией (111), и гетерокомпозиций ННК GaP–углеродные коллоидные квантовые точки (УККТ).

Разработанный фотодетектор представляет собой стеклянную подложку с нанесёнными на неё ННК GaP и ННК GaP, модифицированных УККТ, электрически соединённых параллельно друг другу золотыми контактами встречноштыревой конфигурации. Электронные свойства фотодетекторов в цепи постоянного и переменного тока исследовались в терминах изменения их вольт-амперных характеристик (ВАХ) и спектров импеданса (СИ) при облучении ННК светом в видимом, ИК и УФ диапазонах.

Анализ ВАХ фотодетектора на основе ННК GaP позволяет классифицировать тип электрического контакта на границе ННК-Au как контакт Шоттки с напряжением открытия на уровне 10 В. Сдвиг ВАХ и СИ в сторону уменьшения электрического сопротивления (или импеданса) фотодетектора позволяет утверждать о возможности использования ННК GaP без каких-либо модификаций для детектирования УФ (390нм) и синего (470нм) света.

Для модификации фоторезистивных свойств ННК GaP были использованы УККТ, синтезированные методом микроволновой обработки [3]. Эти углеродные точки наносились на поверхность ННК капельным путем из водного раствора вплоть до образования на поверхности ННК покрытия, состоящего из SP<sup>2</sup>-гибридизованного углерода с локальным пространственным упорядочением, напоминающим структуру УККТ. Тип электрического контакта на границе гетерокомпозиции (ННК/ККТ)-Au также относится к контакту Шоттки, с напряжением открытия, сходным с фотодетектором на базе немодифицированных ННК.

ВАХ и СИ такого фотодетектора смещаются при освещении модифицированных ННК светом с длиной волны до 850 нм, что позволяет судить о возможности использования гетерокомпозиций на базе ННК GaP и УККТ для детектирования УФ (390нм), синего (470нм), зеленого (570нм), красного (622нм) и ИК (850нм) света, что является новым и нетривиальным результатом.

1. V.M. Kondratev et al., *ACS Appl. Nano Mater* **6** 11513–11523 (2023).
2. A. Kuznetsov et al., *Small* **19** 2301660 (2023).
3. G.V. Nenashev et al., *Molecules* **27** 8000 (2022).

Н.О. Михайленко (студ., 1 курс маг., СПбПУ, ВШФФИ),  
С.В. Некрасов (к.ф.-м.н., и.о. м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отд. ФТТ)

## ВЛИЯНИЕ Г-Х СМЕШИВАНИЯ НА ОПТИЧЕСКУЮ ОРИЕНТАЦИЮ И ВЫСТРАИВАНИЕ ЭКСИТОНОВ В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ (In,Al)As/AlAs

Одной из наиболее перспективных областей полупроводниковой физики является спинтроника. В её основе лежит идея использования спина в качестве основного носителя информации. Свою функцию спин выполняет до момента релаксации, однако различные взаимодействия сокращают его время жизни. Основной задачей в рамках прикладного использования спина является увеличение его времени жизни. С этой задачей помогают справиться низкоразмерные структуры, позволяющие исключить ряд важнейших процессов релаксации спина в объемных материалах путём пространственного ограничения носителей в квантовых ямах. В зависимости от особенностей структуры возникают ансамбли прямозонных и непрямозонных квантовых точек (КТ), которые различаются характером оптических переходов. Особенностью квантовых точек является большое время спиновой релаксации. В прямозонных КТ время жизни экситона порядка наносекунды, что очень мало для его прикладного использования в устройствах спинтроники. В непрямозонных КТ время жизни экситонов может достигать микросекунд [1], а время спиновой релаксации фотовозбужденного экситона может даже превосходить его при криогенных температурах [2].

В настоящей работе представлено экспериментальное исследование влияния Г-Х смешивания на тонкую структуру непрямых в  $k$ -пространстве экситонов в ансамбле квантовых точек (In,Al)As/AlAs. Изучаемый ансамбль состоит из прямозонных и непрямозонных квантовых точек и интересен большим временем жизни локализованных в непрямозонных КТ экситонов [2]. КТ (In,Al)As/AlAs преимущественно непрямозонные, однако в области точки Г-Х пересечения величина подмешивания прямых состояний велика. Эффект Г-Х смешивания ярко проявляет себя в магнитополевых зависимостях оптической ориентации спинов и выстраивания экситонов. Измерения проводились в области энергий, для которых характерно Г-Х смешивание (1,63 ÷ 1,72 мэВ). Образец, помещенный в продольное магнитное поле, возбуждался линейно- и циркулярно-поляризованным светом, в результате чего были получены магнитополевые зависимости поляризованной фотолюминесценции, из которых найдены величины анизотропного обменного расщепления. Значения этого расщепления для прямозонных и непрямозонных КТ отличаются на три порядка, поэтому по величинам расщепления можно определить состав изучаемого подансамбля КТ.

В работе показано, что подмешивание прямых состояний меняет тонкую структуру оптически активных непрямых в  $k$ -пространстве экситонов, посредством увеличения анизотропного обменного расщепления энергетических состояний экситона.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ №22-12-00125.

1. Shamirzaev T. S., et al. JETP Lett. – 2003. – Vol. 77. – P. 389.
2. Rautert J., et al. Phys. Rev. B. – 2019. – 99. N 19. – P. 195411.



Л.Г. Цапанова (студ., 1 курс маг., СПбПУ, ВШФФИ),  
М.Д. Рогоза (асп., 2 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отд. ФТТ),  
С.В. Некрасов (к.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отд. ФТТ),  
Ю.Г. Кусраев (д.ф.-м.н., проф., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, отд. ФТТ)

## АНИЗОТРОПИЯ ЭФФЕКТА ХАНЛЕ В НАКЛОННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ В НЕПРЯМОЗОННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ (In,Al)As/AlAs

Одной из наиболее активно развивающихся областей оптоэлектроники является спинтроника – наука, которая призвана решить проблему передачи и обработки информации с помощью переноса спина электрона или других квазичастиц. Процессы ориентации спина и его релаксации активно изучаются в объемных и низкоразмерных полупроводниковых структурах. Актуальность в изучении квантовых точек (КТ) заключается в том, что они представляют большой интерес в качестве объектов с длинными временами жизни спинов электронов и дырок. В частности в непрямозонных в  $k$ -пространстве КТ (In,Al)As, которые изучались в данной работе, время жизни может достигать сотен микросекунд, а время спиновой релаксации электронного спина даже превосходить его [1].

В настоящей работе было проведено экспериментальное исследование необычно резкого влияния на эффект Ханле направления магнитного поля. Изучаемый образец представлял собой КТ (In,Al)As, встроенные в матрицу AlAs, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке (001) GaAs. Образец помещался в магнитное поле, угол между направлением магнитного поля и луча лазера менялся в диапазоне от 0 до 90 градусов.

В ходе эксперимента были измерены зависимости степени циркулярной поляризации фотолюминесценции от величины магнитного поля при различных значениях угла между направлениями магнитного поля и луча лазера. Построены полуширины зависимостей от угла, значение циркулярной поляризации в пределах больших полей от угла.

Эксперимент был описан решением уравнения Блоха для частицы с анизотропным  $g$  – фактором [2] с учетом восстановления оптической ориентации в продольной компоненте магнитного поля. В результате было получено значение продольного и поперечного  $g$  – фактора ( $g_z=2.42$ ,  $g_x=0.07\pm 0.03$ ,  $T_s=2.49$  нс), и сделан вывод: поведение поляризации в наклонном магнитном поле свидетельствует о том, что имеет место спиновая прецессия частицы с анизотропным  $g$  – фактором, т.е. тяжелой дырки. Отметим, что в настоящей работе было выявлено наличие заряженного электронами подансамбля КТ (In,Al)As/AlAs, в результате чего фотолюминесценция излучалась отрицательно заряженным экситоном.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ №22-12-00125.

1. Shamirzaev T.S., et al. JETP Lett. – 2003. – Vol. 77. – P. 389.
2. Yu.G. Kusrayev, et al. Phys. Rev. B – 2007. – Vol. 76. – 153307.

## ТОНКАЯ СТРУКТУРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ФЕРМИ-ПОЛЯРОНОВ В ДИХАЛЬКОГЕНИДАХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Экситонные эффекты в двумерных полупроводниках на основе дихалькогенидов переходных металлов активно изучаются благодаря сильному кулоновскому взаимодействию. Особенно интересным является исследование многочастичных кулоновских комплексов, возникающих при взаимодействии экситонов с резидентными носителями заряда. Имеется две модели их теоретического описания: (i) модель трехчастичных комплексов – трионов или (ii) модель ферми-поляронов (тетронов Суриса) [1], при учете взаимодействия экситона со всем ферми-морем носителей заряда. Обычно эти подходы дают схожие результаты [2].

В работе представлены эффекты, которые могут быть описаны только более полным ферми-поляронным подходом. Построена теория тонкой структуры кулоновских комплексов в атомарно-тонких кристаллах при наличии анизотропных деформаций, а также рассчитано их продольно-поперечное расщепление, обусловленное наличием у квазичастиц ненулевого волнового вектора. Показано, что эффекты тонкой структуры наследуются ферми-поляронами от экситонов [3], причем в трионном подходе тонкая структура отсутствует.

Микроскопическим расчетом в методе функций Грина определены энергии, силы осциллятора, продольно-поперечные и анизотропные расщепления радиационных дублетов ферми-поляронов. Показано, что расщепление пропорционально энергии Ферми и величине возмущения (компонентам тензора деформации или квадратичным комбинациям компонент волнового вектора). На рис. 1 представлены спектры поглощения в деформированных монослоях дихалькогенидов переходных металлов в зависимости от концентрации резидентных электронов. Расщепление состояний ферми-поляронов возрастает с ростом концентрации резидентных носителей заряда, как и продольно-поперечное расщепление. Разработанная модель описывает недавний эксперимент [4].

Работа поддержана грантом РФФИ № 23-12-00142.

1. R.A. Suris, V.P. Kochereshko, et. al., *Physica Status Solidi (b)* **227**, 343 (2001).
2. M.M. Glazov, *J. Chem. Phys.* **153**, 034703 (2020).
3. Z.A. Iakovlev and M.M. Glazov, *2D Materials* **10**, 035034 (2023).
4. J. Jasinski, et. al., *2D Materials* **9** 045006 (2022).

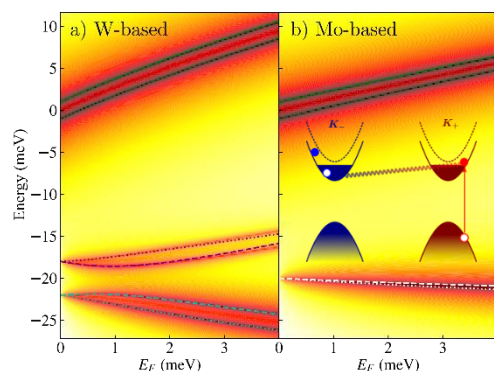


Рис. 1. Спектр поглощения дихалькогенидов вольфрама и молибдена в циркулярной поляризации при наличии анизотропной упругой деформации в зависимости от степени легирования. На вставке ферми-полярон (тетрон Суриса). Энергия связи триона 20 meV, за начало отсчета энергии принята энергия нейтрального экситона в недеформированном монослое.

## ПРИБОРЫ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ (ПОиН)

УДК 621.373.826

А.А. Бекман (к.ф.-м.н., н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Г.О. Корнышов (м.н.с., Академический университет им. Ж.И. Алферова),  
Ю.М. Шерняков (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Н.Ю. Гордеев (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
М.В. Максимов (д.ф.-м.н., зав. лаб., в.н.с., Академический университет им. Ж.И. Алферова)

### СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ В ЛАЗЕРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМА-ТОЧКАМИ

Лазерное переключение из основного состояния (GS) в возбужденное состояние (ES) с увеличением тока инжекции в лазерах с квантовыми ямами (КЯ) и квантовыми точками (КТ) привлекает значительный интерес. Эта проблема важна с фундаментальной точки зрения, поскольку она может пролить свет на плотность состояний, а также на механизмы захвата и релаксации носителей в гетероструктурах с КЯ и КТ.

В данной работе мы изучаем генерацию двух состояний в лазерах с квантовыми яма-точками (КЯТ) InGaAs/GaAs. КЯТ можно рассматривать как массив КТ высокой плотности с относительно небольшой энергией локализации для уровней электронов и дырок в основном состоянии или, альтернативно, как КЯ с сильной модуляцией толщины и состава по In.

В работе представлено экспериментальное исследование переключения генерации из GS в ES при увеличении инжекционного тока в лазерах с широкой апертурой (ширина полоска 50 мкм), а также лазерах с узким гребневым волноводом (ширина полоска 4 мкм). Показано, что в отличие от устройств с КТ и КЯ, в КЯТ лазерах с широким полоском генерация на ES до плотностей тока 40 кА/см<sup>2</sup> не наблюдалось. Отсутствие ES генерации в устройствах с КЯТ при увеличении тока инжекции мы связываем с низкой плотностью электронных и дырочных состояний, соответствующих ES-переходу, а также с очень эффективной релаксацией носителей от ES к GS. Этот факт подтверждается спектром электролюминесценции при высоких плотностях инжекционного тока, в котором отсутствует пик ES. Экспериментально было показано, что ES-генерация достигается только в лазерах с узким полоском, при этом она сопровождается переключением с фундаментальной оптической моды на моду 2-го порядка, имеющую более высокий коэффициент оптического ограничения и, следовательно, обеспечивающую повышенный модальный коэффициент усиления для ES-перехода, что хорошо согласуется с компьютерной моделью [1]. В работе исследовано поведение переключений между GS и ES состояниями для диодов с разными длинами резонатора при помощи электролюминесценции с временным разрешением.

Переключение между двумя разделенными длинами волн, соответствующими GS и ES, может быть использовано для усовершенствованной спектрально многоуровневой схемы передачи сигналов для систем оптической передачи данных и других приложений.

1. A.S. Payusov *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. 1410 012118 (2019), DOI: 10.1088/1742-6596/1410/1/012118.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОГО СПИНОВОГО СВЕТОДИОДА  
В КАЧЕСТВЕ ДЕТЕКТОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Разработка малогабаритного быстродействующего автономного беспроводного детектора магнитного поля (визуализатора) является актуальной задачей, поскольку такое устройство может найти широкое применение в различных областях науки и техники. В данной работе сообщается о создании лабораторной модели устройства, функционирование которого осуществляется за счет совмещения двух основных элементов спинтроники (магниторезистивного элемента и спинового светодиода), с помощью которого можно независимо обнаруживать продольные и поперечные компоненты магнитного поля.

Детектор, описанный в работе, представляет собой магниторезистивный спиновый светодиод, представляющий собой комбинацию излучающей гетероструктуры с квантовой ямой (КЯ) InGaAs/GaAs со спиновым инжектором CoPd и спиновый клапан, выполненный в виде многослойной структуры Cr/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/Cu/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>. Полупроводниковая часть структуры была сформирована на подложке n-GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии. Ферромагнитный CoPd инжектор и все слои магниторезистивного элемента были сформированы методом электронно-лучевого испарения в вакууме.

При приложении к такой структуре продольного магнитного поля наблюдается изменение интенсивности электролюминесценции (ЭЛ), связанное с изменением сопротивления магниторезистивного контактного слоя. Следует отметить, что при токе 36 мА структура работает в ключевом режиме: в магнитном поле  $\pm 50$  мТл относительная напряженность принимает максимальные значения; в нулевом магнитном поле, как и в поле выше 100 мТл, она равна нулю. Наиболее вероятный механизм увеличения интенсивности ЭЛ такого комбинированного устройства в продольном магнитном поле представлен в [1]. При помещении разработанного детектора в поперечное магнитное поле ЭЛ становится частично циркулярно-поляризованной. Максимальное значение  $P_{EL}$  составило 0,4%. Наблюдаемый линейный наклон зависимости  $P_{EL}(B)$  предположительно связан с зеemanовским расщеплением энергетических уровней в КЯ.

Таким образом, был изготовлен лабораторный образец детектора магнитного поля, имеющий четыре независимо изменяемых состояния (излучение высокой/низкой интенсивности с правой/левой циркулярной поляризацией), которые соответствуют наличию продольной и поперечной составляющих магнитного поля.

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

1. Ved M, et. al., 2021 Appl.Phys.Lett. 118 092402.

И.Н. Григоренко (асп., 2 год, ИТМО, ИПСПД; ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
М.И. Митрофанов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе; НТЦ микроэлектроники РАН),  
А.С. Паюсов, Д.Н. Николаев, А.В. Лютецкий, А.В. Нащёкин, С.О. Слипченко  
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Центр физики наногетероструктур),  
Г.В. Вознюк, В.П. Евтихийев (ФТИ им. А.Ф. Иоффе; ИТМО, НИЦ ПФМиЛКС)

## ЛОКАЛЬНОЕ ТРАВЛЕНИЕ СФОКУСИРОВАННЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ В ОБЛАСТИ ВЫХОДНОГО ЗЕРКАЛА РОДГС ЛАЗЕРА КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ МОДОВЫМ СОСТАВОМ

Увеличение яркости и мощности лазерного излучения является важной задачей для прямой обработки материалов и для накачки оптических волокон. На яркость излучения оказывает влияние модовый состав лазера. Чем меньше мод содержится в резонаторе, тем выше яркость излучения. Как правило, приходится изменять модовый состав в латеральном направлении, потому что состав вертикальных мод определяется толщиной слоев лазерной гетероструктуры. Существует несколько подходов для изменения модового состава излучения лазера в латеральном направлении. Управление модовым составом излучения возможно за счет изменения ширины лазерного полоска [1,2]. Лазеры с переменной шириной полоска обладают способностью работать на одной моде (благодаря узкой части полоска) и иметь высокую оптическую мощность [3]. Лазеры с латерально неоднородным волноводом позволяют уменьшить количество мод за счёт рассеяния на неоднородностях [4]. Нанесение плёнки с неоднородной толщиной на выходное зеркало позволяет производить селекцию модового состава за счёт изменения показателя преломления [5]. Удаление части просветляющего покрытия при помощи сфокусированного ионного пучка (СИП) также может использоваться для управления модовым составом за счёт изменения показателя преломления [6].

В нашей работе мы продемонстрировали управление модовым составом лазерного излучения методом СИП за счет локального внесения радиационных дефектов под зеркало лазера. Измерения ближних и дальних полей при различных токах накачки до и после воздействия СИП показали изменение модового состава. Измерения ВтАХ показали увеличение оптической мощности после воздействия СИП при одинаковых значениях тока накачки. Продемонстрирован новый подход к управлению модовым составом РОДГС лазера при помощи воздействия СИП на область выходного зеркала лазерного полоска.

1. S. Zhao et al., *IEEE Photonics Technology Lett.* Vol.29, No. 23 (2017).
2. М.Л. Бородинский и др., *Письма в ЖТФ* Том 19, Вып. 21 (1993).
3. Y. Liu et al., *Optics and Laser Technology* **141** 107145 (2021).
4. M. J. Miah et al., *Appl. Phys. Lett.* **113** 221107 (2018).
5. D. Stryckman et al., *Appl. Opt.* Vol. 35, No. 30 (1996).
6. Н.Ю. Гордеев и др., *ФТП* Том 53, Вып. 2 (2019).

А.А. Гуськов (асп., 1 год, РТУ МИРЭА, каф. НЭ),  
М.А. Степанов (студ., 1 курс маг., РТУ МИРЭА, каф. НЭ),  
С.Д. Лавров (к.ф.-м.н., доц., РТУ МИРЭА, каф. НЭ)

## ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПЛАЗМОННЫЙ ФОТОДЕТЕКТОР С ДВУМЕРНЫМ ПРОВОДЯЩИМ КАНАЛОМ MoS<sub>2</sub>

Оптическое излучение характеризуется рядом ключевых параметров. Однако, большинство современных сенсоров ограничивается лишь детектированием интенсивности света, пренебрегая поляризацией. Учет поляризации может значительно расширить область применения детекторов, включая сферы электроники, биомедицины, оптического шифрования и кодирования [1]. Традиционные методы детектирования поляризации используют специальные фильтры или поляризаторы, что не соответствует современным требованиям к миниатюризации устройств. Поэтому разработка новых тонких, гибких материалов и технологий является стратегией для прогресса в этой области.

Для создания гибких и хорошо интегрируемых систем оптимально использовать тонкие структуры, такие как графен и подобные ему двумерные полупроводники, например, дихалькогениды переходных металлов. Благодаря квантово-размерным эффектам, эти материалы становятся основой для создания высокочувствительных фотодетекторов и сенсоров [2]. В качестве подхода к приданию двумерным полупроводникам оптической анизотропии был выбран метод использования плазмонных структур, так как ранее было показано, что такой метод позволит сохранить наномасштабные размеры устройств [3]. Однако, в работе [3] учитывалась возможность возникновения в структурах только локального резонанса, не учитывая поверхностный плазмонный резонанс, который может значительно увеличить оптическое поглощение [4].

В настоящей работе теоретически показана возможность достижения 30% оптического поглощения в двумерной пленке полупроводника MoS<sub>2</sub> при использовании асимметричных полосовых серебряных наноструктур (что почти в три раза выше поглощения в чистой пленке). Отношение поглощений двух взаимноперпендикулярных поляризаций при этом составило около 1000. Также методом электроннолучевой литографии была создана серия лабораторных образцов плазмонных фотодетекторов. Экспериментально приборы также были исследованы методом фототоковой спектроскопии (поляризационная фототоковая селективность составила 7 раз).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант №.075-15-2022-1131).

1. Zhuge F. et al., *Advanced Materials Technologies*, 2, 1700005 (2017).
2. Han T. H. et al., *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 118, 1-43 (2017).
3. Chen S. et al., *Advanced Materials Interfaces*, 7, 1902179 (2020).
4. Guskov A. et al., *Applied Physics Express*, 14, 075005 (2021).

А.С. Драгунова (м.н.с., НИУ ВШЭ - Санкт-Петербург, МЛКО),  
К.А. Иванов (н.с., НИУ ВШЭ - Санкт-Петербург, МЛКО),  
Н.В. Крыжановская (д.ф.-м.н., НИУ ВШЭ - Санкт-Петербург, МЛКО)

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОДИСКОВЫХ ЛАЗЕРОВ С InGaAs/GaAs КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ С Si ПОДЛОЖКОЙ

Наиболее актуальной задачей, которую диктует нам современная нанофотоника, является реализация компактного источника лазерного излучения на кристалле [1]. В качестве компактного источника излучения может выступать лазер с микродисковым резонатором, работающий на модах шепчущей галереи. Существует ряд работ [2], в которых были осуществлены успешные попытки монолитно интегрировать микродисковые лазеры с кремниевой электроникой. Монолитно выращенные микродисковые лазеры обладают рядом проблем по сравнению с лазерами, выращенными на родной подложке, например, арсенида галлия, связанными с различиями в коэффициентах теплового расширения и постоянных кристаллических решеток кремния и синтезируемых на нем материалов  $A^3B^5$ . Избежать подобных проблем позволит гибридная интеграция материалов  $A^3B^5$  с кремнием, то есть перенос на кремний готовых, выращенных на родной GaAs подложке, микролазеров. В данной работе исследовались микродисковые лазеры диаметром 19-50 мкм, излучающие в ближнем ИК-диапазоне, изготовленные современными эпитаксиальными методами (молекулярно-пучковой и металлорганической газофазной эпитаксии). Целью данной работы является исследование гибридной интеграции на характеристики микролазеров, перенесенных на Si подложку. Были проанализированы различные методы гибридной интеграции на кремниевую подложку, проанализированы статические (спектральные пороговые, вольт-амперные и мощностные) и динамические (быстродействие, энергопотребление на переключение) характеристики микролазеров как до интеграции на кремниевую подложку, так и после. Впервые была получена генерация при комнатной температуре микродисковых лазеров с InGaAs/GaAs квантовыми точками, перенесенных на кремниевую подложку методами гибридной интеграции. Перенос на кремниевую подложку микролазеров привел к уменьшению теплового сопротивления микролазеров в 2.3 раза. Более эффективный отвод тепла привел к уменьшению порогового тока, а также существенному увеличению пикового значения мощности излучения и тока, соответствующего этому пиковому значению. Характеристикой быстродействия полупроводникового лазера является частота модуляции на уровне падения мощности 3дБ ( $f_{3дБ}$ ); в данной работе было достигнуто рекордное значение частоты  $f_{3дБ}$  для микролазеров, перенесенных на кремниевую подложку, о котором когда-либо сообщалось в литературе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10002, <https://rscf.ru/project/22-72-10002/>.

1. С. Cornet et al. *ISTE Press London*, (2016).
2. Wan Y. et al. *Optica*. **4 (8)**, 940-944 (2017).

А.Е. Иванов (и.о. м.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН; НТЦ микроэлектроники РАН),  
С.В. Левин (инж., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН),  
Ф.Ю. Солдатенков (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ p-i-n ДИОДЫ НА ОСНОВЕ СЛАБОЛЕГИРОВАННЫХ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ AlGaAs И AlGaAsSb

Современная силовая электроника и импульсная техника развивается по пути создания приборов повышенного быстродействия, способных работать при повышенных рабочих частотах и температурах. Использование широкозонных твердых растворов AlGaAs позволяет увеличить рабочие температуры приборов на их основе до температур выше 300 °С [1]. Введение малых добавок Sb или In в слои на основе GaAs или AlGaAs позволяет повысить быстродействие приборов (и, соответственно, снизить электрические потери приборов при переключении) за счет контролируемого образования собственных структурных дефектов при выращивании гетероструктур с заданным рассогласованием по параметру решетки [2]. В настоящее время для изготовления высоковольтных (сотни вольт) p-i-n-структур на основе GaAs и его твердых растворов в основном используется метод жидкофазной эпитаксии с контролируемым распределением фоновых остаточных примесей и собственных дефектов с глубокими уровнями [1,2].

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование статических вольт-амперных характеристик p-i-n диодов с высоковольтными плавными  $p^0-i-n^0$ -переходами  $Al_xGa_{1-x}As$  и  $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$  с  $x$  до 0.5 в диапазоне температур от комнатной до 350 °С. В ходе исследований были выяснены рабочие температуры диодов на основе данных материалов в зависимости от состава  $x$  – при увеличении содержания AlAs в слоях диоды сохраняют выпрямительные свойства до температур от 250-280 °С при  $x = 0$  до, как минимум, 350 °С при  $x \sim 0.5$ . В работе также исследовалась динамика переключения диодов на основе слоев  $Al_xGa_{1-x}As$  и  $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$ . Одним из результатов малых добавок Sb в слои AlGaAs стало существенное, почти на порядок, уменьшение времени обратного восстановления высоковольтных диодов на их основе – от 30-50 нс для диодов с базовыми слоями AlGaAs до 5-8 нс для AlGaAsSb структур с контролируемым содержанием в них дислокаций несоответствия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00245, <https://rscf.ru/project/23-29-00245/>.

1. M. M. Sobolev et al., *J. Appl. Phys.*, **128**, 095705 (2020).

2. M. M. Sobolev et al., *J. Appl. Phys.*, **123**, 161588 (2018).



А.А. Климов, Р.Э. Кунков (асп., 3 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
Т.С. Лухмырина, А.А. Лавров, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ЦФН)

### ФОТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ ДГС N-InAsSbP/InAs<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub>/N-InAsSbP ( $\lambda_{0.5}=5.2$ мкм, 295 К) ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ УГАРНОГО ГАЗА

Инфракрасные фотоприемники, работающие в средневолновой области спектра ( $\lambda=3-5$  мкм) используются в оптических датчиках для детектирования метана и природного газа, углекислого, угарного газов, обеспечивая их чувствительность и быстродействие, значительно превосходящие таковые для датчиков на основе тепловых приемников излучения.

В данной работе сообщается о разработке и результатах исследования фотоэлектрических характеристик иммерсионных фотоприемников на основе фотодиодных структур N-InAsSbP/InAs<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub>/N-InAsSbP ( $\lambda_{0.5}=5.2$  мкм, 295 К). Показано, что использование новых геометрии чипов фотоприемников и дизайна фоточувствительной структуры позволило получить параметры фоточувствительности - на порядок превышающие параметры фотоприемников, разработанных ранее [1], что в свою очередь привело к возможности разработки оптических датчиков для детектирования угарного газа на длине волны около 4.55 мкм с пороговой чувствительностью 1 мг/м<sup>3</sup> (0.85 ppm) [2].

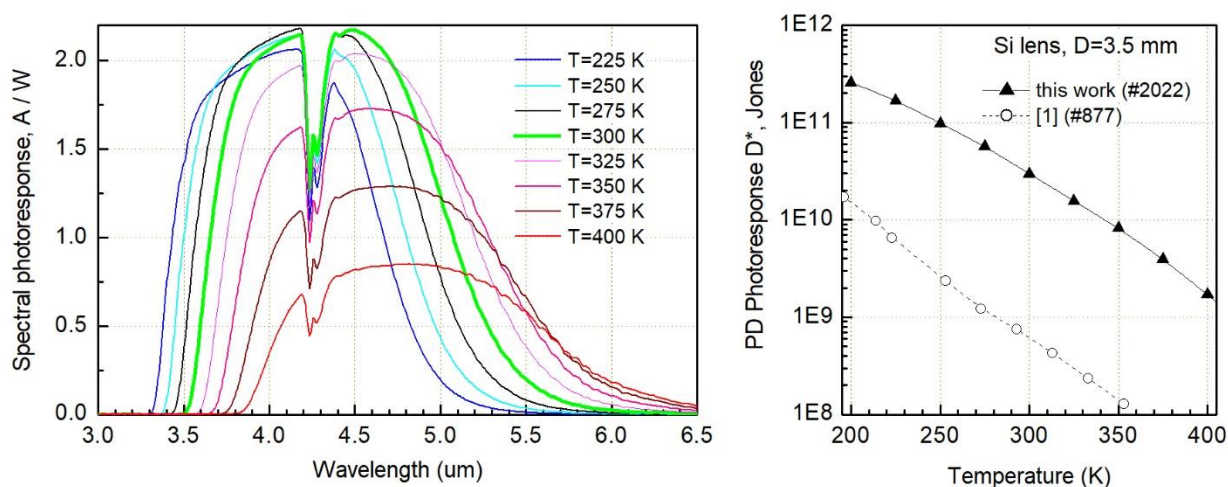


Рис. 1. Спектры фоточувствительности и температурная зависимость обнаружительной способности.

1. P.N. Brunkov, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, A.A. Lavrov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', A.A. Usikova; «InAsSbP/InAs<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub>/InAs DH photodiodes ( $\lambda_{0.1} = 5.2 \mu\text{m}$ , 300 K) operating in the 77–353 K temperature range»; *Infrared Physics & Technology* 73 (2015) 232–237.
2. Е.А. Кочелаев, В.В. Петров; «Разработка малогабаритного оптического датчика монооксида углерода с пороговой чувствительностью 1 мг/м<sup>3</sup> (0.85 ppm). Оценка избирательности измерений», *Оптика и спектроскопия*, 2023, в печати.

Е.В. Контрош (н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
 В.С. Калиновский (с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
 А.П. Васильев (н.с., НТЦ Микроэлектроники РАН),  
 Н.А. Малеев (с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
 К.К. Прудченко (асп., 4 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
 И.А. Толкачев (асп., 3 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ GaAs/AlGaAs ДЛЯ МНОГОПЕРЕХОДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Совершенствование параметров монолитных многопереходных фотопреобразователей (МП ФП) лазерного излучения связывают с увеличением количества фотоактивных суб-элементов, соединённых между собой встречно включёнными наноразмерными и оптически прозрачными туннельными диодами (ТД). Процесс эпитаксиального роста толстой (несколько мкм) структуры МП ФП ведёт к размыванию профилей и взаимокompенсации легирующих примесей n- и p-типа, например, Si и Be, в вырожденных нанослоях GaAs/AlGaAs ТД, и, как следствие, к деградации туннельной компоненты вольт-амперной характеристики (ВАХ). Решениями являются снижение температуры эпитаксиального роста и включение промежуточного нелегированного i- нанослоя GaAs между вырожденными  $n^{++}$  и  $p^{++}$  слоями [1]. Согласно проведённому численному моделированию  $n^{++}$ GaAs/i-GaAs/ $p^{++}$ AlGaAs ТД, включение i-нанослоя позволяет повысить плотность пикового туннельного тока ( $J_p$ ). С использованием моделей нелокального межзонного квантового туннелирования и туннелирования через ловушки была показана немонотонность зависимости  $J_p$  от толщины i-нанослоя с наличием максимума. Методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) были выращены два типа структур ТД с гетеропереходом GaAs/AlGaAs (А и В). Вырожденные слои GaAs  $n^{++}$ -типа были созданы  $\delta$ -легированием Si, а слои  $p^{++}$ -типа представляли собой твёрдый раствор  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ , легированный атомами С. Уровни легирования  $n^{++}$  и  $p^{++}$ -слоёв в структурах составляли, соответственно,  $\geq 1 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$  и  $\sim 1 \cdot 10^{20} \text{см}^{-3}$ . Рост сильно легированных областей для обеих структур осуществлялся в идентичных режимах при температуре подложки  $\sim 535\text{-}550^\circ\text{C}$ . По сравнению со структурой А, в структуру В добавлен нелегированный i-слой GaAs толщиной  $\sim 7$  нм. На выращенных структурах были сформированы мезы ТД площадью  $(4\text{-}8) \cdot 10^{-4} \text{см}^2$ . Прямые ветви ВАХ диодов для структуры А не имели участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, а форма ВАХ структуры А соответствует обращённому туннельному диоду, что может быть связано со слабым уровнем вырождения  $n^{++}$ -GaAs:( $\delta$ Si) области. В структуре В с нелегированным i-нанослоем GaAs между вырожденными областями наблюдается типичная ВАХ ТД (Лео Эсаки) со средними значениями  $J_p \sim 1.0 \text{А/см}^2$ . После проведенного в камере МПЭ отжига, имитирующего процесс роста МП ФП, в структуре В наблюдается рост значения  $J_p$  на 30%. Таким образом, разработан новый тип термостабильного соединительного ТД с промежуточным i-слоем, перспективный для реализации высокоэффективных МП ФП.

1. Kalinovskii V.S., Kontrosh E.V., Klimko G.V., et al., *Semiconductors*. **54**, (2020).

ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ  
ДОСТУПОМ В СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ  
ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ InGaN/GaN

Рядом исследователей уже были предложены конфигурации устройств, объединяющие в себе RRAM (Resistive random-access memory — резистивная память с произвольным доступом) на базе «металл-изолятор-металл» и светоизлучающий диод (СД) [1], а также светоизлучающие запоминающие устройства на базе диода с множественными квантовыми ямами (КЯ) [2,3]. В данной работе нами рассмотрена возможность создания полностью полупроводниковой биполярной резистивной памяти на базе светоизлучающих структур на основе гетеропереходов InGaN/GaN методом импульсного воздействия.

В данной работе нами исследовались СД синего свечения ( $\lambda_{\text{max}} = 468$  нм при комнатной температуре) на основе твердого раствора InGaN. СД подвергались импульсному воздействию с помощью источника сигналов специальной формы АКПП-3418/2. За счет короткого и мощного импульса происходит локальное изменение структуры гетероперехода, благодаря чему становятся возможными явления памяти и резистивного переключения. В качестве возможного механизма, ответственного за данные явления, было рассмотрено формирование проводящих нитей в области пространственного заряда, образование которых связано с перемещением подвижных дефектов. В частности, обнаруженная по зависимости  $d\beta/dU = f(U)$  вакансия азота при сообщении энергии может перейти в состояние  $3+$ , которое является подвижным дефектом. Данные вакансии могут находиться в узлах V-дефектов, которые мы наблюдали на поверхности структур с помощью атомно-силовой и просвечивающей электронной микроскопии. Явления резистивного переключения и памяти подтверждаются наличием явления гистерезиса на вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных характеристиках (ВФХ) исследуемых структур. При измерении ВАХ наблюдается четкий переход между резистивным и диодным состояниями структуры. Скорость переключения в среднем составляет около 10 мкс. Стоит отметить, что установившееся состояние сохраняется даже при отсутствии питающего напряжения. Таким образом, описанная память является полностью энергонезависимой.

1. Chang et al., Scientific Reports, **4** (1), p.1-6 (2014).
2. Zheng K. et al., IEEE Transactions on Electron Devices., **63**(6), p.2328-2333 (2016).
3. Fu K. et al., IEEE Electron Device Letters, **40**(3), p.375-378 (2019).

И.В. Самарцев (инж., ННГУ им. Н. И. Лобачевского),  
Н.В. Байдусь (к.ф.-м.н., с.н.с., ННГУ им. Н. И. Лобачевского),  
С.Ю. Зубков (инж., ННГУ им. Н. И. Лобачевского),  
Д.М. Балясников (студ., 2 курс маг., ННГУ им. Н. И. Лобачевского)

## ИnGaAs ФОТОДИОДЫ НА ДЛИНУ ВОЛНЫ 1.55 МКМ С МЕТАМОРФНЫМ БУФЕРНЫМ СЛОЕМ, ВЫРАЩЕННЫЕ НА ПОДЛОЖКАХ GaAs

Фотодиоды телекоммуникационного диапазона длин волн на подложках GaAs представляют интерес для замены используемых сейчас для этого диапазона приборов, сформированных на подложках InP. Одним из направлений является использование метаморфных буферных слоев [1,2,3].

В настоящей работе представлены результаты исследования структуры р-і-п диода на длину волны до 1,98 мкм с метаморфным буферным слоем InAlGaAs.

Исследуемые структуры получены методом МОГФЭ при пониженном давлении. Сначала на подложке GaAs выращивался слой GaAs, затем метаморфный слой InAlGaAs с градиентом состава толщиной 1,5 мкм. Изменение состава производилось линейно. Далее формировалась р-і-п структура InGaAs с содержанием индия около 65%.

На основе полученной гетероструктуры изготовлены фотодиоды. Со стороны структуры и подложки были нанесены Au омические контакты методом термического испарения в вакууме, затем со стороны структуры была вытравлена мезоструктура размерами 1,1×1,1 мм. Для входа излучения на мезоструктуре вытравлено окно размером 0,9×0,9 мм. Спектр фототока имеет максимум на длине волны 1,07 мкм, длина волны 1,55 мкм располагается на половине интенсивности спектра фототока. Исследования обратных вольт-амперных характеристик фотодиодов при комнатной температуре показали, что значения темновых токов составляют 100 мкА при величине обратного напряжения 3,5 В.

Таким образом, технология получения метаморфных буферных слоев InAlGaAs для InGaAs фотодиодов телекоммуникационного диапазона длин волн на подложках GaAs является перспективной. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение природы темновых токов с целью их минимизации, а также будет проведена оптимизация конструкции метаморфного буферного слоя для улучшения кристаллического качества гетероструктур.

1. Wang Hai-Li, WU Dong- Hai, Wu Bing-peng, et al/ CHIN. PHYS. LETT. Vol. 26, №1 (2009) 014214.
2. D. Wu, H. Wang, B. Wu et al/ ELECTRONICS LETTERS 27th March 2008 Vol. 44, №7.
3. И.В. Самарцев, С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, И.Ю. Пашенькин, Н.В. Дикарева, А.Б. Чигинева, ФТП, Т.12, В. 52, С 1460 – 1463, 2018.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОСТАБИЛЬНОСТИ ПЕРОВСКИТНЫХ МИКРОЛАЗЕРОВ

Полупроводниковые нитевидные микрокристаллы (НМК), генерирующие лазерное излучение, могут использоваться как компактные элементы когерентного излучения в фотонных интегральных схемах, фотодетекторах, чипах, газовых сенсорах и др. Большинство таких структур создаются методом эпитаксии, который является дорогостоящим и высокотехнологичным. В качестве альтернативы могут выступать перовскитные нитевидные микрокристаллы, методы создания которых являются простыми, дешевыми и экологически безопасными. Более того, перовскитные микролазеры обладают низким порогом лазерной генерации, высокой добротностью лазерного излучения, возможностью перестройки длины волны люминесценции, а также совместимы с другими полупроводниковыми материалами. Также путем замены галогена ( $X=Cl, Br$ ) или введения катиона кадмия  $Cd^{2+}$  в кристаллическую решетку типа  $CsPbX_3$  можно изменить положение уровня Ферми и улучшить фотостабильность микролазеров, что приведет к повышению производительности фотонных интегральных схем.

В данной работе были синтезированы перовскитные нитевидные микрокристаллы составов  $CsPbBr_3$ ,  $Cs(Cd,Pb)Br_3$  и  $CsPbCl_xBr_{3-x}$  ( $x$  – разное содержание хлора) методом сублимации. Были получены изображения данных структур методами флуоресцентной микроскопии, СЭМ, ТЭМ, а также изучен их состав методом EDX. Были измерены спектры лазерной генерации созданных структур при накачке кристаллов фемтосекундным лазерным излучением с частотой повторений импульсов 10кГц. Изучение фотостабильности спектров лазерной генерации перовскитных НМК различного состава проводилось при длительном воздействии фемтосекундного лазерного излучения с частотой повторений больше 100 кГц. Это позволило в краткие сроки определить число оптических импульсов, подаваемых на микроструктуры, при котором в них сохраняется лазерная генерация. Было установлено, что введение кадмия приводит к улучшению стабильности лазерного излучения (лазерная генерация сохраняется при подаче  $9 \times 10^8$  импульсов). Для структур с разным содержанием хлора было установлено, что его увеличение в составе НМК приводит к уменьшению времени лазерной генерации структур и сдвигу спектра в синюю область.

Работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 23-72-00031).

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОДИСКОВЫХ ЛАЗЕРОВ, СОПРЯЖЕННЫХ С ВОЛНОВОДОМ

Одним из перспективных способов реализации эффективных источников когерентного излучения для фотонных интегральных схем являются полупроводниковые микродисковые (МД) лазеры на основе квантовых точек. Дисковые резонаторы обладают высокой добротностью, поэтому микролазеры на их основе имеют малый размер [1] и низкое потребление энергии [2]. При этом МД лазеры могут быть сформированы без использования сложных технологических процессов, а их излучение может распространяться в плоскости подложки и заводиться в оптические волноводы (ОВ) для реализации его направленного вывода [3]. Актуальной задачей является разработка конструкции сопряжения микролазера с ОВ, которая позволила бы обеспечить высокую мощность, выводимую с торца ОВ, не ухудшив при этом добротность и связанные с ней пороговые характеристики МД лазеров.

Исследованные микролазеры и ОВ были сформированы из одной пластины эпитаксиальной  $A^3B^5$  гетероструктуры, полученной методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке  $n^+$ -GaAs. Активная область состояла из 5 слоев квантовых точек InGaAs/GaAs. Формирование ОВ и МД лазеров происходило с помощью электронной литографии и плазмохимического травления. В работе рассмотрены различные геометрии сопряжения МД лазеров с ОВ: сопряжение с радиальным ОВ, сопряжение с ОВ, идущим по касательной к микролазеру, а также сопряжение с ОВ, огибающим МД лазер по дуге. Исследован вопрос влияния нагрузки микролазера ОВ на спектральные и пороговые характеристики. В качестве метода уменьшения потерь на поглощение излучения МД лазера активной областью ОВ в работе предложен метод «просветления» ОВ при приложении к нему прямого смещения. В результате получена оптимальная геометрия сопряжения микролазера, для которой продемонстрированы одномодовая генерация МД лазера, высокая мощность выводимого с торца ОВ излучения и рекордно высокие температуры работы (до  $96^\circ\text{C}$ ) в режиме постоянной накачки для МД лазеров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10002, <https://rscf.ru/project/22-72-10002/>.

1. Mezosi G. et al. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **48** (8), 1023-30 (2012).
2. Dhingra P. et al. *Journal of Applied Physics*, **133** (10), (2023).
3. Wong W. W. et al. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. **58** (4), 1-18 (2022).

Г. Хамуд (асп., 1 год, НГУ, каф. ФПП),  
 Г.Н. Камаев (к.ф.-м.н., с.н.с., ИФП СО РАН),  
 М. Vergnat (проф., Университет Лотарингии, Франция),  
 В.А. Володин (д.ф.-м.н., проф., ИФП СО РАН, НГУ, каф. ОФ)

## ФОТОТОК В МДП-СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ГЕРМАНОСИЛИКАТНЫХ ПЛЁНОК

Интерес к использованию структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) в фотовольтаике сохраняется до настоящего времени. Обычно в МДП фотодиодах и оптических детекторах в качестве диэлектрика применяются туннельные либо толстые слои  $\text{SiO}_x$  [1]. Для улучшения фоточувствительности применяли включения в слои  $\text{SiO}_x$  квантовых точек Ge [2]. Германосиликатные плёнки  $\text{GeSi}_x\text{O}_y$  обладают некоторыми преимуществами по сравнению с  $\text{SiO}_x$ . Целью данной работы являлось исследование фототока в МДП структурах на основе  $\text{GeSi}_x\text{O}_y$  (в том числе и с включениями Ge).

Для нанесения плёнок  $\text{GeSi}_x\text{O}_y$  и многослойных структур на их основе использовалось высоковакуумное электронно-лучевое осаждение на подложку n-Si(001),  $\rho=5,5\pm 1$  Ом·см. Была изготовлена структура n-Si/ $\text{SiO}_2$ (5нм)/Ge(3нм)/ $\text{GeSi}_{0.9}\text{O}_{2.8}$ (25нм). В качестве образца-спутника была осаждена структура n-Si/ $\text{SiO}_2$ (2нм)/ $\text{GeSi}_{0.9}\text{O}_{2.8}$ (30нм) (без включения германия). В

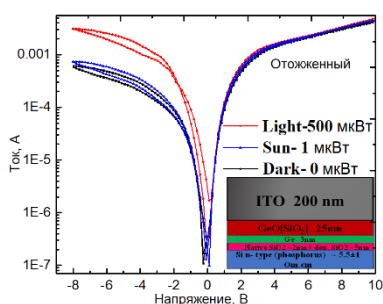


Рис. 1. ВАХ образца со слоем Ge после отжига.

качестве верхнего прозрачного электрода использовался ITO, размер контактов был 0.7x0.7 мм. Проведены измерения ВАХ МДП-структур - как темновых, так и в условиях освещения галогеновой лампой, а также при естественном освещении помещения (см. рис. 1). Измерения ВАХ были проведены как для исходных образцов, так и после отжига 30 минут, 500 °C в атмосфере. Роль отжига заключается в образовании аморфных нанокластеров германия, что модифицирует транспортные свойства плёнок  $\text{GeSi}_x\text{O}_y$ . В работе [3] было высказано предположение, что нанокластеры аморфного германия могут

служить центрами формирования проводящих филаментов в плёнках  $\text{GeSi}_x\text{O}_y$ . Отжиг привёл к росту в 3-4 раза темнового тока и тока при подсветке как при прямом, так и при обратном смещениях. На рисунке видно, что освещение мощностью 500 мкВт обратно смещённой МДП-структуры вызвало увеличение тока на порядок, такую светочувствительность можно использовать для создания фотодиодов. Стоит отметить, что ампер-ваттные характеристики в нашем случае на порядки выше, чем в случае использования квантовых точек Ge [2].

Работа поддержана грантом МНВО РФ FSUS-2020-0029 и выполнена на базе ЦКП "ВТАН" НГУ.

1. Mendoza Conde et al., *Sensors*, **22**, 3904 (2022).
2. Mansour Aouassa et. al., in press: DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-217720/v1>.
3. Yushkov, Ivan D., et al., *Electronics*, **12**, 873 (2023).

П.Е. Копытов (асп., 1 год, Университет ИТМО),  
С.С. Рочас (к.ф.-м.н., с.н.с., Университет ИТМО),  
Е.С. Колодезный (к.ф.-м.н., с.н.с., Университет ИТМО),  
И.И. Новиков (к.ф.-м.н., с.н.с., Университет ИТМО)

## ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ *p-i-n* ФОТОДИОД НА ОСНОВЕ InP

Оптоволоконные линии связи являются ключевыми элементами радиофотонных систем, предоставляя альтернативное решение коаксиальным линиям для передачи СВЧ-сигналов на дистанции более 10 метров. Основными достоинствами оптоволоконных каналов служат минимальные потери, сверхширокая полоса пропускания, отсутствие помех, малый вес, для эффективного применения которых требуются мощные фотодиоды [1]. Известно, что применение *p-i-n* фотодиодов позволяет достигать более высокой скорости переключения по сравнению с другими фотодиодами, а увеличение их чувствительности при высокой оптической мощности способствует увеличению генерируемого фототока [2].

В работе представлены результаты измерения и моделирования статических характеристик *p-i-n* фотодиода спектрального диапазона 1300–1550 нм на основе InP. Проведен анализ влияния толщины нелегированного слоя на токовую чувствительность *p-i-n* фотодиода при толщинах 1–10 мкм, предложена оптимизированная модель конструкции фотодиода для повышения фоточувствительности при высоких падающих оптических мощностях. Темновая и световые вольт-амперные характеристики (ВАХ), а также монохроматическая токовая чувствительность фотодиода исследовались с помощью ручной зондовой станции, источника-измерителя и одномодового лазера с распределенной обратной связью с длиной волны излучения 1291 нм. Пиковая токовая чувствительность составила 0,9 А/Вт с резким спадом для значений мощностей более 3 мВт, темновой ток порядка 4 нА при напряжении смещения -3 В. Численное моделирование статических характеристик фотодиода проводилось в программном пакете COMSOL Multiphysics с решением системы дифференциальных уравнений методами конечных элементов и объемов, учитывая температурное распределение фотодиода при поглощении лазерного излучения. Результаты моделирования с учетом температурных распределений согласуются с экспериментом, расхождения значения чувствительности не превышают 0,05 А/Вт на диапазоне оптических мощностей 1–50 мВт, форма ВАХ и значение темнового тока совпадают с экспериментом.

В результате работы предложена конструкция *p-i-n* фотодиода на основе InP с увеличенной токовой чувствительностью на высоких оптических мощностях. Согласно численному моделированию, токовая чувствительность предложенного фотодиода составляет 1,02–0,50 А/Вт на диапазоне мощностей 1–50 мВт, темновой ток не превышает 15 нА при напряжении обратного смещения -3 В.

1. И.Б. Чистохин, К.С. Журавлев, *УПФ*, **3**, 85 (2015).
2. J.A. Taylor et al., *IEEE Photon. J.*, **3**, 140 (2011).



П.Ю. Авдеев (студ., 2 курс маг., РТУ МИРЭА, каф. нанoeлектроники),  
Е.Д. Лебедева (студ., 2 курс маг., РТУ МИРЭА, каф. нанoeлектроники),  
А.В. Горбатова (асп., 4 год, РТУ МИРЭА, каф. нанoeлектроники),  
А.М. Буряков (к.ф.-м.н., с.н.с., РТУ МИРЭА, каф. нанoeлектроники),  
Н. Тирселин (Ph.D., университет Лилля, политехнический университет Hauts-de-France),  
В.Л. Преображенский (д.ф.-м.н., г.н.с., РТУ МИРЭА, каф. нанoeлектроники)

## СПИНТРОННЫЕ ЭМИТТЕРЫ И ГЕНЕРАЦИЯ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ: ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МНОГОСЛОЙНЫМИ СТРУКТУРАМИ НА LiNbO<sub>3</sub>

ТГц излучение, обладающее длиной волны в диапазоне 0,1-3,0 мм, находит применение в медицине, фармацевтике и спинтронике [1]. Среди источников этого излучения выделяются спинтронные эмиттеры, благодаря их широкому спектру, высокой амплитуде и возможности управления поляризацией [2]. Современные научные усилия сосредоточены на повышении эффективности ТГц генерации через оптимизацию толщины, материалов и структур этих эмиттеров.

В представленной работе выполнена терагерцовая спектроскопия на многослойных образцах, созданных магнетронным распылением магнитных слоев FeCo и TbCo на монокристаллической подложке LiNbO<sub>3</sub> (Y-Z срез) толщиной 1 мм. Структура образца: 25x[TbCo<sub>2</sub>(5nm)/FeCo(5nm)] на LiNbO<sub>3</sub>. Интерметаллическая сверхрешетка состоит из 25 чередующихся слоев TbCo<sub>2</sub> и FeCo, каждый толщиной 5 nm. Благодаря оптимальному составу и методу изготовления, образец демонстрирует гигантскую магнитострикцию и одноосную магнитную анизотропию. Для приложения электрического поля использовались золотые контактные площадки.

Исследованы временные профили ТГц импульсов и их реакция на внешнее магнитное поле. Выявлено два отдельных ТГц импульса, генерируемых подложкой и магнитной структурой. Применение внешнего магнитного поля позволило точно определить источник каждого из импульсов. Исследована взаимосвязь между петлями ТГц гистерезиса и приложенным электрическим полем.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (мегагрант №075-15-2022-1131).

1. Pawar A.Y. et al. Terahertz technology and its applications // Drug Invent. Today. 2013. Vol. 5, № 2. P. 157–163.
2. Seifert T. et al. Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation // Nat. Photonics. Nature Publishing Group UK London, 2016. Vol. 10, № 7. P. 483–488.
3. Khusyainov D. et al. Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure // Sci. Rep. 2021. Vol. 11, № 1. P. 697.

## ДВУХУРОВНЕВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В МИКРОДИСКАХ С InAs/InGaAs КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

За последние десятилетия требования к скорости передачи данных существенно выросли, что привело к необходимости перехода к более быстрым фотонным интегральным схемам (ФИС). В качестве излучателей для ФИС актуально применение высокодобротных микродисковых (МД) лазеров. Использование массивов квантовых точек (КТ) в качестве активной области лазеров позволяет достичь малых пороговых токов, стабильной работы при высоких температурах, а также получить возможность осуществления одновременной лазерной генерации через основной и возбуждённый оптические переходы квантовых точек – т.н. двухуровневая генерация [1]. Ранее было исследовано влияние температуры и диаметра резонаторов на двухуровневую лазерную генерацию в МД лазерах [2]. Целью данной работы является развитие предыдущих исследований и изучение влияния геометрии электрических контактов на протекание двухуровневой лазерной генерации в МД с КТ, поскольку вследствие малой длины латеральной диффузии в слоях с КТ может быть реализована неоднородная токовая прокачка активной области.

В работе исследовались МД лазеры диаметрами 24 и 28 мкм с активной областью из 10 слоёв самоорганизованных InAs/InGaAs КТ, выращенных методом МПЭ на подложках  $n^+$ -GaAs. Активная область структуры заключалась между широкозонными обкладками  $n$ - и  $p$ -Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As. Изначально на поверхности МД формировались сплошные электрические контакты дисковой формы, форма которых затем модифицировалась посредством резки сфокусированным ионным пучком. В работе изучались спектральные характеристики МД лазеров при питании каждой из секций электрических контактов по отдельности.

Было проведено исследование влияния площади и формы контактов на пороговые токи для лазерной генерации через основное и возбуждённое состояния КТ в микролазерах. С уменьшением площади прокачиваемой секции электрических контактов наблюдается рост порогового тока для лазерной генерации на основном состоянии и соответствующий спад пороговых значений тока для возбуждённого состояния. Такой эффект связан с ростом внутренних потерь, которые увеличиваются из-за наличия области, в которой отсутствует инжекция носителей заряда и происходит частичное поглощение излучения, распространяющегося внутри резонатора. Таким образом, за счёт регулирования площади контактов можно достичь более низких (в 2-3 раза) по сравнению со сплошными контактами пороговых токов для возникновения двухуровневой лазерной генерации.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22-72-00028.

1. A. Markus et al., *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1818 (2003).
2. I. Makhov et al., *Nanomaterials* **13**, 877 (2023).

Н.А. Маслова (студ., 2 курс маг., СПбГУ, каф. ЭТТ),  
Д.В. Данилов (к.ф.-м.н., СПбГУ, каф. ЭТТ),  
О.Ф. Вывенко (д.ф.-м.н., проф., СПбГУ, каф. ЭТТ),  
А.Е. Калядин (н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, лаб. физики полупроводниковых приборов),  
Н.А. Соболев (в.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, лаб. физики полупроводниковых приборов)

## ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ЕМКОСТЬ ДИОДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ИМПЛАНТИРОВАННОГО КИСЛОРОДОМ n-Si

Эффект «отрицательной дифференциальной емкости» (ОЕ) ранее неоднократно наблюдался в различных полупроводниковых диодных структурах. Он может проявляться как действительно регистрируемая отрицательная емкость, так и в наличии провала на вольт-фарадной характеристике (ВФХ) с участком противоположного наклона, т.е. когда величина емкости увеличивается с увеличением обратного напряжения смещения. Согласно предложенной модели Пенина [1] это свойство связывается с инерционностью тока через структуру, которая может быть вызвана различными механизмами и, в частности, модуляцией этого тока вследствие изменения электрического поля при перезарядке глубоких уровней в области пространственного заряда диода. В этом случае помимо обычных двух компонент емкости – высокочастотной геометрической и низкочастотной емкости ловушек (НЧ-ЕЛ) – возникает третья дополнительная компонента обратного знака, которая имеет такую же частотную зависимость, как и НЧ-ЕЛ.

Объектами исследования служили образцы  $p^+n$  переходов, имплантированных кислородом, дефектная структура, распределение и параметры глубоких уровней, которые подробно описаны в статье [2]. Их характерной особенностью является слой кислородных преципитатов (КП), которые имеют многоэлектронный положительный заряд и локализованы на дальней от поверхности стороне области имплантации. В данной работе исследовались частотные и температурные зависимости ВФХ, которые выявили провал ёмкости, соответствующий наличию компоненты ОЕ, который появляется при частотах тестирующего сигнала меньше 100 кГц. При этом значения ОЕ зависели от логарифма частоты тестирующего сигнала линейно с наклоном, увеличивающимся при понижении температуры, что не соответствует как модели экспоненциального обмена носителями с локальными уровнями, так и модели ОЕ [1], так как обратный ток диодов не зависел от температуры во всем исследуемом диапазоне. Для объяснения полученного эффекта предложена модель, качественно описывающая полученные данные, которая предполагает возрастание барьера для эмиссии электронов с состояний КП как результат сопровождающего эмиссию возрастания положительного заряда КП.

1. Пенин Н. А, Физика и техника полупроволников, Т. 30, № 4, С. 630-635, 1996.
2. Danilov, D., et al., Physica Status Solidi a-Applications and Materials Science, p. 8, 2021.

О.П. Михайлов (студ., 6 курс, ЛЭТИ, каф. Фотоники),  
А.И. Баранов (к.ф.-м.н., Академический университет им. Ж.И. Алфёрова, лаб. ВИЭ),  
А.С. Гудовских (д.т.н., Академический университет им. Ж.И. Алфёрова, лаб. ВИЭ),  
Е.И. Тербунов (д.т.н., ФТИ им. Иоффе, лаб. ФХСП)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЕМКОСТНЫМИ МЕТОДАМИ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ НЈТ АРХИТЕКТУРЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ

После многих лет исследования технология кремниевых солнечных элементов (СЭ) с гетеропереходом НЈТ (HeteroJunction with intrinsic thin-layer Technology) позволила достичь рекордного КПД однопереходных кремниевых солнечных элементов - более 26% [1]. Данная технология вызывает интерес для использования в космосе, но, несмотря на такие высокие показатели, имеет недостаток – деградацию под воздействием космической радиации. В случае с подложкой из кремния n-Si, после облучения пиковая квантовая эффективность снижается на 60%, а ток короткого замыкания и фактор заполнения уменьшаются в два раза [2], однако причины такого падения не были подробно изучены. Данный фактор не позволяет перейти к масштабному использованию СЭ на основе НЈТ-архитектуры при космических полетах. Поэтому в данной работе было принято решение исследовать влияние сходного с космическим излучением на околоземных орбитах на дефектообразование в СЭ на подложках кремния n- и p-типа с НЈТ-архитектурой, выращенных методом плазмохимического осаждения в ФТИ им. Иоффе, емкостными методами.

В работе рассмотрены НЈТ СЭ, выращенные на подложках n- и p-Si ( $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ). Далее, структуры были подвержены облучению электронами с потоками  $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  и  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . Ранее нами было показано, что подложки p-типа более устойчивы к облучению, чем n-типа, где напряжение холостого хода и ток короткого замыкания падают на 30%. Такое поведение может свидетельствовать об ухудшении времени жизни неосновных носителей заряда в объеме подложки кремния из-за влияния радиационных дефектов. Было качественно показано образование дефектов методом спектроскопии полной проводимости в подложке n-типа, но в этой работе более чувствительный метод нестационарной спектроскопии глубоких уровней позволил детектировать образование дефекта с  $E_C - E_T = 0,16 \text{ eV}$  при облучении и увеличение его концентрации с  $1 \cdot 10^{13}$  до  $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  при увеличении потока электронов с  $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  до  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , а также пространственно определить его положение в подложке. Кроме того, в отличие от спектроскопии полной проводимости методом НСГУ были детектированы различные дефекты в подложках p-типа, что будет показано 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. Klaver A., *J. Non. Cryst. Solids.*, **354(19–25)**, 2464 (2008).

А.В. Николаева (студ., 2 курс маг., Алфёровский университет),  
Д.Е. Маркина (студ., 2 курс маг., СПбПУ),  
А.Д. Большаков (к.ф.-м.н., с.н.с.-зав. лаб., МФТИ, Физтех)

## ПОТЕНЦИАЛЬНО ГИБКИЙ СЕНСОР НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ ZnO - ПДМС ДЛЯ СИНХРОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Наноструктуры оксида цинка (ZnO) находят широкое применение в электронике благодаря их низкой токсичности и высокой стойкости к механическим нагрузкам, что делает их подходящим материалом для гибких электронных устройств [1]. Альтернативой дорогостоящим методам синтеза наноструктур является низкотемпературный гидротермальный метод, основным недостатком которого является дисперсия размеров и плотности синтезированных структур. Проведение фотолитографии поверх микро-/нано-сферических линз с последующим травлением ростовой подложки с целью получения массива отверстий, служащих в дальнейшем центрами нуклеации ZnO, позволяет эффективно управлять морфологией синтезируемых наноструктур. Так, методом фотолитографии с использованием кварцевых сфер диаметром 1.5 мкм на кремниевой подложке (Si) в слое оксида кремния (SiO<sub>2</sub>) толщиной 30 нм был получен упорядоченный массив отверстий диаметром 400 нм. На подготовленной подложке методом низкотемпературного гидротермального синтеза был выращен массив нитевидных нанокристаллов оксида цинка ZnO длиной порядка 5 мкм, и инкапсулирован в поли(диметилсилоксан) (ПДМС). В качестве верхнего и нижнего электродов были использованы, соответственно, углеродные нанотрубки (УНТ) и нанесённый на кремний слой алюминия, полученный методом термического напыления. Полученная структура использовалась в дальнейшем в качестве сенсора механической нагрузки и температуры.

Сенсорный отклик полученной структуры был оценен с привлечением методов спектроскопии электрического импеданса при различной весовой нагрузке в диапазоне от 0 до 500 г в диапазоне частот измерительного напряжения от 100 Гц до 500 кГц. Изготовленный сенсор демонстрирует возможность качественного и количественного детектирования механической нагрузки, воздействующей на него, как по смещению спектров импеданса, так и по изменению реальной и мнимой части импеданса в режиме реального времени. Кроме того, были получены зависимости мнимой и реальной части импеданса сенсора в диапазоне температур от 25 до 100°C, позволяющие анализировать сенсорный отклик с точки зрения возможности синхронного измерения как массы механической нагрузки, так и температуры. Полученные результаты имеют наибольший интерес с точки зрения развития персонализированной медицины и носимой электроники.

1. Kuznetsov, et.al., A.D. (2023), Elastic Gallium Phosphide Nanowire Optical Waveguides—Versatile Subwavelength Platform for Integrated Photonics. *Small*, 19: 2301660.

И.А. Норватов (студ., 5 курс, СПбПУ, ВИФШ),  
Н.Ю. Харин (асп., 2 год., СПбПУ, ВИФШ),  
Д.А. Фирсов (д.ф.-м.н., проф., СПбПУ, ВИФШ)  
А.А. Саркисян (д.ф.-м.н., директор ИФИ, РАУ, Армения)

## ТЕРАГЕРЦОВАЯ И ИНФРАКРАСНАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ n-GaAs С ВОЛНОВОДОМ ДЛЯ БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНА

До сих пор актуальной остается проблема разработки мощных, компактных и недорогих источников излучения терагерцового (ТГц) диапазона. Излучение ТГц диапазона может быть получено при захвате неравновесных носителей заряда атомами мелкой примеси в полупроводниках [1]. Интенсивность оптических переходов такого типа зависит от наличия свободных примесных состояний. В условиях оптического межзонного возбуждения примесный уровень донора D будет опустошаться в основном за счет спонтанной излучательной рекомбинации электрона с дыркой валентной зоны (V). В стационарном состоянии скорость захвата электрона атомом примеси (переходы C – D) пропорциональна скорости межзонной примесной рекомбинации электрона с донорного уровня в валентную зону (переходы D – V). Энергия перехода D – V лежит в ближнем инфракрасном (БИК) диапазоне. Интенсивность ТГц переходов может быть увеличена за счет повышения интенсивности БИК переходов. За счет введения в структуру волновода для БИК излучения возможно реализовать генерацию стимулированного БИК излучения, что существенно увеличит скорость опустошения донорного уровня и приведет к повышению интенсивности излучения ТГц диапазона. Такая методика использовалась в настоящей работе.

Исследовался образец с эпитаксиальным слоем GaAs, легированным донорами кремния до концентрации  $(8\div 12)\cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, помещенный в волновод для излучения ближнего ИК диапазона. Образец был выполнен в геометрии четырехсколового резонатора полного внутреннего отражения (0.6x0,6 мм). Одновременно измерялись спектры люминесценции в ближнем ИК диапазоне и интегральная интенсивность ТГц излучения образца в зависимости от интенсивности оптической накачки при температуре жидкого гелия.

При определенной интенсивности межзонной накачки спектры излучения в ближней ИК области демонстрируют начало стимулированной генерации. Сравнение зависимостей интегральных интенсивностей ТГц излучения и отдельных пиков в БИК спектрах от мощности накачки в режимах спонтанных и стимулированных межзонных переходов позволяет сделать вывод о влиянии стимулированного излучения в ближнем ИК диапазоне на интенсивность ТГц излучения.

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

1. Zakhar'in A. O., Andrianov A.V., Egorov A. Yu., Zinov'ev N.N. Terahertz photoluminescence from GaAs doped with shallow donors at interband excitation // Applied physics letters. – 2010. – Vol. 96, No. 21. – P. 211118.

М.А. Степанов (студ., 1 курс маг., РТУ МИРЭА, каф. НЭ),  
А.А. Гуськов (асп., 1 год, РТУ МИРЭА, каф. НЭ),  
С.Д. Лавров (к.ф.-м.н., доц., РТУ МИРЭА, каф. НЭ)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕННОГО ОТКЛИКА В ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ФОТОДЕТЕКТОРАХ НА ОСНОВЕ $\text{MoS}_2$ С АСИММЕТРИЧНЫМИ ПЛАЗМОННЫМИ СТРУКТУРАМИ

К настоящему времени двумерные полупроводниковые материалы в силу уникального сочетания электрических и оптических свойств заняли прочную позицию как перспективные материалы для применения в фотонике. Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) стали наиболее распространенными в силу высокой фоточувствительности [1]. Особенно эффективной является комбинация двумерных пленок ДПМ с упорядоченными периодическими плазмонными структурами, что позволяет существенно повысить эффективность детектора [2]. Также применение асимметричных металлических наноструктур позволяет обеспечить чувствительность к поляризации детектируемого излучения, что значительно расширяет возможности применения светочувствительных устройств подобного типа [3].

В данной работе проведено экспериментальное исследование динамики фототоков в поляризационно-чувствительных фотодетекторах на основе двумерной пленки  $\text{MoS}_2$  с большой концентрацией дефектов. Пленка ДПМ была создана методом химического осаждения из газовой фазы, а периодическая плазмонная решетка, состоящая из нанополос золота, методом электронно-лучевой литографии. Период решетки составил 200 нм, а заполнение полупроводникового канала варьировалось от 20 до 50 %.

Полученные временные зависимости фототоков показывают, что использование упорядоченных полосковых плазмонных структур позволяет увеличить фоточувствительность фотодетекторов на основе двумерных пленок дихалькогенидов переходных металлов почти на два порядка. Кроме этого продемонстрировано, что даже при использовании двумерных пленок, обладающих большим количеством дефектов, которые позволяют увеличить фоточувствительность, возможно сохранение быстродействия при использовании дополнительного анализа динамических характеристик. Так в данной работе время выхода фотодетектора в насыщение достигалось за 900 секунд, а при используемом подходе сокращается до 25 секунд. Таким образом продемонстрировано, что увеличение фоточувствительности за счет использования пленки с большим количеством дефектов возможно без существенного ухудшения ее быстродействия.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант №.075-15-2022-1131).

1. Xue H. et al., *Advanced Functional Materials*, 2018.
2. Guskov A. et al., *Applied Physics Express*, 2021.
3. Wang J. et al., *Advanced Optical Materials*, 2022.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ВОЛНОВОДА НА ПЕРЕГРЕВ ТОРЦЕВЫХ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ПРИ НАКАЧКЕ НЕПРЕРЫВНЫМ ТОКОМ

Мощные полупроводниковые лазеры с торцевым выводом излучения, обладающие высоким качеством пучка излучения, востребованы для обработки материалов, в медицине и других областях. Высокая оптическая мощность достигается при большой плотности тока накачки, что ведет к нагреву активной области, вызывающему увеличение порогового тока и снижение дифференциальной эффективности [1]. Чтобы уменьшить перегрев применяют различные системы охлаждения. Отвод тепла осуществляется через слои лазерной гетероструктуры, расположенные между активной областью и охладителем. Целью работы было исследование влияния конструкции волновода на эффективность отвода тепла.

Для исследования были подобраны InGaAs/GaAs/AlGaAs лазеры с широким волноводом (50-100 мкм), отличающиеся конструкциями волновода, но обладающие схожими характеристиками – пороговым током и дифференциальной эффективностью. Исследуемые образцы имели длину 2 мм, ширину 0,5 мм и были смонтированы на медные теплоотводы р-контактом вниз. Температура теплоотводов поддерживалась постоянной и составляла 20°C. Перегрев лазера определялся на n-контакте чипа. Для этого необходимо использовать компактный датчик температуры, не оказывающий влияние на работу лазера, который можно расположить непосредственно на лазере. В результате анализа литературы была выбрана схема измерения, основанная на изменении падения напряжения на р-п переходе с температурой. Датчиками температуры служили короткие лазеры InGaAs/GaAs/AlGaAs размером 250\*350 мкм. Для измерения температуры через датчик пропускался постоянный ток (100 мкА), а по изменению падения напряжения на датчике определялась температура исследуемого лазера. Каждый датчик температуры после монтажа проходил калибровку.

При измерении перегрева лазеров в непрерывном режиме работы одновременно измерялись вольт- и ватт-амперная характеристики и температура поверхности чипа в зависимости от тока накачки. Накачка увеличивалась вплоть до насыщения мощности или катастрофической деградации лазера. Наилучшим образом показала себя структура с наименьшим расстоянием между активной областью и теплоотводом (перегрев при 10 А составил примерно 10 C<sup>0</sup>), что хорошо согласуется с проведенными оценками теплового сопротивления исследованных структур. В результате работы было экспериментально показано преимущество конструкции лазерной гетероструктуры с уменьшенным тепловым сопротивлением. Также была разработана методика измерения температуры кристалла лазера, которая будет полезна для оптимизации мощных полупроводниковых лазеров.

1. N.L. Bazhenov et al., *Semiconductors*, **39**, 1210–1214 (2005).



## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК InP/InGaAs ФОТОКАТОДА

Бурное развитие оптоэлектронных приборов и переход их в коротковолновые области спектра привели нас к новому поколению компонентной базы. Так, например, в области исследования фотокатодов уже доминируют двойные гетероструктуры (ДГС) InP/InGaAs. Их перспективы обусловлены работой в ближнем ИК диапазоне, где расположены окна прозрачности атмосферы и воды. К таким фотокатодам существуют следующие требования - малое количество дефектов, высокая равномерность сигнала, малые шумы. Их реализуемость в таких ДГС возможна за счет: согласования решеток гетероструктуры, высокого качества эпитаксиального роста, межзонного механизма поглощения. Основным недостатком является низкий квантовый выход фотокатода из-за невозможности достижения состояния отрицательного электронного сродства активного слоя InGaAs при активировании поверхности. Поэтому используется активируемый эмиттер InP. Из-за большей ширины запрещенной зоны InP, чем InGaAs, возникает потенциальный барьер, препятствующий инжекции электронов в вакуум. Величина барьера в равновесном состоянии зависит от концентраций примесей слоев InGaAs и InP.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование спектров квантового выхода в ближней ИК области. В качестве основного метода исследования был использован метод фото-ЭДС с органической жидкостью в качестве контакта. Спектральные характеристики были измерены в нескольких структурах, имеющих различную толщину и концентрацию примесей активного слоя. Были найдены зависимости положения пика от мощности излучения и толщины активного слоя, также была найдена длина свободного пробега ДГС, составляющая 9,8 мкм с погрешностью 0,1 мкм. Методом измерения фототока были получены количественные значения спектра квантового выхода. Смещение пика в длинноволновую область объясняется увеличившимся количеством поглощенного света вблизи  $E_g$  за счет увеличенной толщины активной области. Также было обнаружено, что при высоких мощностях излучения пик спектров находится вблизи отсечки подложки.

Для получения более полной картины было проведено численное моделирование поведения динамики носителей заряда в диффузионно-дрейфовом приближении. Данное моделирование показало характер поведения энергетической диаграммы при варьировании исследуемых параметров. Из-за неравномерного распределения носителей заряда в структуре возникает дополнительное электрическое поле особенно заметное на границах гетеропереходов. Это поле позволяет уменьшить потенциальный барьер для носителей заряда, переходящих из активного слоя в эмиттер InP. Высокая длина свободного пробега демонстрирует возможность использования низких концентраций примесей активного слоя ( $< 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) ввиду низкого количества дефектов.

### МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, ГРАФЕНА И ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА

В настоящее время большой исследовательский интерес вызывает изучение сверхтонких слоёв ферромагнетиков, обладающих перпендикулярной магнитной анизотропией (РМА). Такие монослои синтезируют путем интеркаляции магнитных атомов под графен, выращенный на поверхности (111) гексагонального никеля [2], оксиде кремния SiO [3], иридии [4] и ряде других подложек.

В настоящей работе методом теории функционала плотности (DFT), реализованного в программном пакете Quantum Espresso, исследуется магнитная анизотропия тонких плёнок Fe/Gr/h-BN с толщиной слоя железа N=1-2 монослоя. Поскольку поверхность (111) железа, графен (Gr) и гексагональный нитрид бора (h-BN) формируют слои с близкими значениями межуатомного расстояния вдоль поверхности (~2.49 Å), расчёты производились для различных вариантов взаимного расположения этих слоёв.

Для выяснения основной конфигурации вычислена зонная энергия  $E^{\text{band}}$ , соответствующая различным углам ориентации магнитного момента ( $\theta = 0^\circ - 90^\circ$ ) относительно нормали к поверхности слоя. Анализ полученных данных позволяет оценить значения констант магнитной анизотропии  $K_1$  и  $K_2$ . Для выяснения равновесной магнитной конфигурации требуется учитывать кроме зонной ещё и энергию диполь-дипольного взаимодействия  $E^{\text{md}}$ , что было сделано отдельными от Quantum Espresso вычислениями.

Данная работа является первым шагом на пути к исследованию магнитных и транспортных свойств наноструктур Fe/Gr/h-BN и nMBT(N)/h-BN, а также других гетероструктур на основе графена (Gr), нитрида бора BN, изоляторов Черна (CI) и топологических изоляторов (TI).

1. B. Dieny, M. Chshiev, Rev. Mod. Phys. 89, 025008 (2017).
2. G. Bertoni, L. Calmels, A. Altibelli, V. Serin, Phys. Rev. B 71, 075402 (2004).
3. C. Berger, Z. Song, et al., J. Phys. Chem. B 108, 19912 (2004).
4. N. Rougemaille, A.T. N'Diaye, et al., Appl. Phys. Lett. 101, 142403 (2012).

Р.Д. Харисова (асп., 1 год, Университет ИТМО, НИЦ оптического материаловедения),  
К.С. Зырянова (вед. инж., Университет ИТМО, НИЦ оптического материаловедения),  
А.Н. Бабкина (к.ф.-м.н., доц., Университет ИТМО, НИЦ оптического материаловедения)

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТОВ $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{I}_{1-x})_3$ , ВЫДЕЛЕННЫХ В БОРОГЕРМАНАТНОМ СТЕКЛЕ

Полупроводниковые нанокристаллы свинцово-галогенидных перовскитов  $\text{CsPbX}_3$  ( $X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ) широко известны своими оптическими и оптоэлектронными свойствами и могут быть применены в солнечных батареях, лазерах, светодиодах, сенсорах и многом другом. Одной из проблем, стоящих перед исследователями и инженерами, является наличие у таких кристаллов перовскитов ряда фазовых переходов при температурах 30 – 330 °С, входящих в рабочий диапазон температур. С фазовыми переходами меняются параметры кристаллических решеток нанокристаллов, параметры экситонов в них, что влияет на их оптические свойства и работу устройств с перовскитами в целом.

В данной работе было исследовано влияние температуры на оптическую плотность смешанных бромидно-йодидных нанокристаллов перовскитов  $\text{CsPb}(\text{Br}_x\text{I}_{1-x})_3$ , выделенных в борогерманатной стеклообразной матрице ( $x = 1; 0,6; 0,5; 0,4; 0,25; 0$ ). По спектрам поглощения, измеренным при температуре жидкого азота, оценены размеры выделенных нанокристаллов перовскитов, которые составили порядка 10 – 15 нм для нанокристаллов всех составов. Далее были измерены спектры поглощения стеклокерамик в процессе нагрева до температуры порядка 500 °С и последующего охлаждения, изменение температуры происходило со скоростью 2 °С/мин. Оптическая плотность на длине волны максимума экситонного поглощения нанокристаллов выше определенной температуры (350 – 480 °С для нанокристаллов разного состава) резко исчезает, что вызвано плавлением нанокристаллов в матрице стекла. По области падения поглощения можно определить температуру, аналогичную температуре ликвидуса, выше которой все кристаллы находятся в расплавленном состоянии. Однако при охлаждении образцы удается «переохладить» и резкий рост экситонного поглощения нанокристаллов происходит при температурах приблизительно на 200 °С меньших, чем температура ликвидуса. В целом температуры ликвидуса полученных нанокристаллов оказались ниже температур плавления объемных чисто бромидных и чисто йодидных монокристаллов, а температуры ликвидуса смешанных нанокристаллов оказались ниже чисто бромидных и чисто йодидных нанокристаллов. Кроме того, по изменению наклона кривых зависимости оптической плотности от температуры можно судить о структурных изменениях, происходящих с нанокристаллами.

Эти исследования являются первыми шагами к пониманию изменений, происходящих с нанокристаллами перовскитов в стеклообразной матрице. Сами стеклокерамики с нанокристаллами перовскитов могут быть в дальнейшем использованы, среди прочего, в качестве рентгеновских сцинтилляторов, т.к. обладают привлекательными для этих целей субнаносекундными временами жизни.

В.В. Яковлева (асп., 1 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОФТТ),  
К.В. Лихачев (асп., 2 год, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОФТТ, САФУ им. М.В. Ломоносова),  
С.В. Титков (д.г.-м.н., ИГЕМ РАН),  
П.Г. Баранов (д.ф.-м.н., проф., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОФТТ)

## СКАНИРУЮЩАЯ NV СПЕКТРОСКОПИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ - КАРБОНАДО

На сегодняшний день многочисленные исследования сосредоточились на азотно-вакансионных центрах (NV-центрах), так как для них обнаружилась возможность оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР) на одиночных центрах в условиях комнатной температуры [1]. Так, в кристаллах алмазов, облученных электромагнитным излучением с длиной волны в пределах 530-570 нм, происходит выравнивание электронной населенности спиновых уровней NV-центров со спином  $S=1$  с преобладающим заполнением подуровня с  $M_S=0$ , что допускает исследовать их с помощью ОДМР-спектроскопии [1, 2].

Существует такая разновидность природных алмазных кристаллов как карбонадо, которая выделяется среди прочих разновидностей своим изотопным составом. Карбонадо, не обнаруживающиеся в кимберлитах, представляют собой скрытокристаллические агрегаты, принимающие форму неправильных осколков с округлыми краями и углами. Одной из отличительных черт карбонадо являются крошечные размеры кристаллов, составляющие доли микрометра, объединенных в агрегаты.

Обнаружение высоких концентраций NV-центров в карбонадо, содержащих преимущественно отрицательно заряженные NV-центры, позволяет сравнить процессы образования NV-центров в карбонадо с процессами в искусственных микроалмазах, полученных детонационным спеканием наноалмазов при высоких давлениях и температурах, т.е. становится возможным моделировать процессы образования карбонадо.

В данной работе проведено исследование NV-центров в карбонадо методами фотолюминесценции и ОДМР, были определены спектральные параметры центра, а также проведено сравнение их с параметрами искусственного спеченного алмаза.

Исследование выполнено при поддержке государственного задания Российской Федерации № FSRU-2020-0008.

1. Gruber A. et al., *Science*, **276** (5321), 2012-2014 (1997).
2. Liu Y. C., Dzeng Y. C., Ting C. C., *IEEE Nanotechnology Magazine*, **16** (4), 37-43 (2022).

И.О. Батуев, К.А. Смирнов (студ., 1 курс маг., МГУ, Физический факультет, каф. квантовой электроники),  
 А.И. Майдыковский (к.ф.-м.н., с.н.с., МГУ, Физический факультет, каф. квантовой электроники)

## НАБЛЮДЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО МАЯТНИКОВОГО ЭФФЕКТА В ДВУМЕРНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ С ШАХМАТОПОДОБНОЙ СТРУКТУРОЙ

Фотонные кристаллы (ФК) обладают особыми свойствами по управлению светом за счет проявления в них ряда интересных оптических эффектов. Одним из них является оптический маятниковый эффект, который заключается в периодической перекачке энергии между прошедшей и дифрагировавшей волнами при распространении в ФК в геометрии Лауэ. Ранее данный эффект наблюдался в оптическом диапазоне только в 1D структурах [1], тогда как в 2D структурах подобных исследований не проводилось. Для наблюдения этого эффекта необходима точность изготовления фотонного кристалла не хуже 100 нм, которой можно добиться использованием метода двухфотонной лазерной литографии.

В работе представлены результаты моделирования методом FDTD распространения излучения в 2D фотонном кристалле с решеткой в виде шахматной доски, демонстрирующие возможность наблюдения оптического маятникового эффекта в геометрии Лауэ в таких структурах. Методом двухфотонной лазерной литографии изготовлена ФК структура с параметрами, указанными на рисунке 2, измерены параметры дифракции в этой структуре.

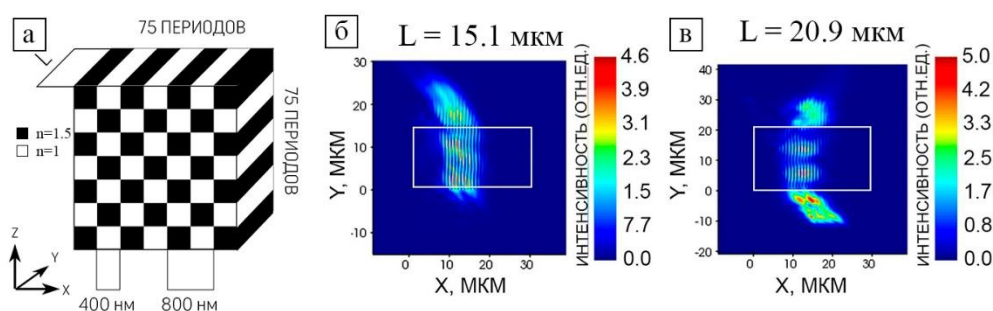


Рис. 1. а) Модель 2D ФК для моделирования. Результаты моделирования б) для длины ФК 15.1 мкм, луч распространяется в направлении нулевого порядка дифракции, и в) для длины ФК 20.9 мкм: прошедший луч распространяется в направлении первого порядка дифракции.

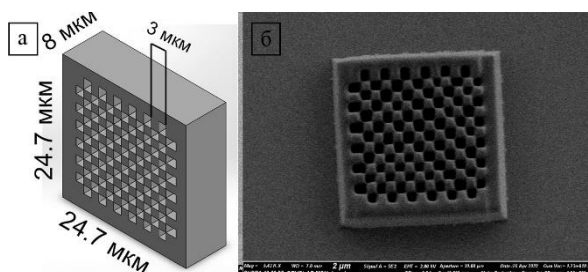


Рис. 2. а) Модель структуры для печати; серые области соответствуют полимеру с  $n=1.5$ . б) СЭМ-изображение напечатанной структуры.

1. Novikov V.B. et al. Optical pendulum effect in one-dimensional diffraction-thick porous silicon based photonic crystals // Journal of Applied Physics. – 2015. – Т. 118. – № 19. – С. 193101.

## СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ СВОЙСТВА ИОННО-СИНТЕЗИРОВАННЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Развитие современной микроэлектроники приводит к задаче поиска новых полупроводниковых материалов, которые придут на замену кремния в приборах нового поколения. Одними из наиболее перспективных являются широкозонные полупроводники, в частности, набирающий популярность оксид галлия. Благодаря его уникальным свойствам, в первую очередь обусловленным большой шириной запрещенной зоны  $\sim 4,5-5$  эВ, он находит применение при создании "солнечно-слепых" фотодетекторов, а также в устройствах силовой электроники нового поколения. Создание полупроводниковых нанокристаллов (НК) на основе данного материала может обеспечить использование данного материала и в качестве источника люминесценции в УФ и видимом диапазоне спектра. Однако традиционные способы получения квантовых точек Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> химическими методами не подходят для практической реализации. В данной работе предлагается новый метод создания НК Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - ионно-лучевой синтез в диэлектрических матрицах.

Имплантация ионов в пленки SiO<sub>2</sub>/Si проводилась тремя способами: облучение только ионами галлия, облучение сначала ионами кислорода O<sup>+</sup> (23 кэВ), а потом ионами Ga<sup>+</sup> (80 кэВ), и в обратной последовательности. Доза облучения выбиралась из условия обеспечения одинаковой концентрации внедренных атомов каждого сорта и составляла  $5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> для ионов Ga<sup>+</sup>, и  $6 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> для ионов O<sup>+</sup>. В данной работе использовались различные условия постимплантационного отжига: первая серия образцов подвергалась последовательному отжигу при температурах 300-1000 °С (по 30 минут) в атмосфере азота, вторая - однократному отжигу при температуре 900 °С в атмосфере кислорода или азота (по 30 минут).

Методом просвечивающей электронной микроскопии было подтверждено формирование НК Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в  $\beta$ - и  $\gamma$ - фазах. Анализ химического состава имплантированных слоев выявил существенную зависимость концентрации галлия от режимов ионного синтеза. Наибольшая концентрация связей Ga-O (более 90 ат. %) в состоянии стехиометрического оксида Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> получена для образца, облученного в последовательности O<sup>+</sup>→Ga<sup>+</sup>, после отжига в атмосфере кислорода. Исследование фотолюминесцентных свойств выявило наличие полосы люминесценции в области 400-550 нм, предположительно связываемой с люминесценцией донорно-акцепторных пар в НК Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, интенсивность и спектральные особенности которой зависят от режимов ионного синтеза. В качестве основного механизма изменения люминесцентных свойств предполагается частичный распад или переход в другие фазы нанокристаллов Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в процессе отжига.

Исследование выполнено при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Министерства науки и высшего образования РФ.

А.В. Снегирев (студ., 2 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)

## ГАЛЬВАНМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ДИРАКОВСКИХ 2D МОНОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) – относительно новый класс соединений, который привлёк большое внимание исследователей во многом благодаря своим уникальным оптическим и транспортным свойствам. Эти свойства обусловлены их необычной зонной структурой, содержащей пары электронных и дырочных долин. В результате, у носителей заряда появляется дополнительная долинная степень свободы. Оптическое возбуждение циркулярно-поляризованным светом может приводить к неравновесному заселению долин.

Данная работа посвящена теоретическому описанию транспортных свойств монослоёв ДПМ, подвергнутых слабой однородной деформации и облучению циркулярно-поляризованным светом. Деформация нарушает тригональную симметрию решетки, вследствие чего может возникать фотогальванический ток (ФГЭ). В работе показано, что в первом порядке малости по деформации электрический ток возникает благодаря междолинному рассеянию электронов.

В первой части работы рассматривается образец ДПМ р-типа (случай n-типа рассматривается аналогичным образом) при нулевой температуре с уровнем Ферми, находящимся внутри валентной зоны. В этом случае количество равновесных свободных дырок намного превышает число фотогенерированных электронов, в результате теория ФГЭ может быть построена итерационным образом по амплитуде процесса междолинного рассеяния в поле однородной деформации и в рамках линейной теории рекомбинации, когда рекомбинационное время определяется плотностью равновесных дырок. Показано, что ФГЭ ток линейно зависит от частоты облучающего света.

Во второй части работы рассмотрен образец ДПМ с уровнем Ферми, лежащим внутри запрещенной зоны. В этом случае при межзонном фотовозбуждении неравновесных носителей концентрации неравновесных электронов и дырок сравнимы, и теория ФГЭ тока строится в рамках нелинейной теории рекомбинации и итерационным образом по анизотропной части вероятности междолинного рассеяния, обусловленного однородной деформацией образца.

Полученные эффекты имеют долинный характер и чувствительны к поляризации облучающего излучения. Результаты данной работы будут полезны для лучшего понимания физики деформируемых двумерных материалов.

Данная работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

П.П. Теслина (студ., 4 курс, СПбГУ, каф. фотоники),  
А.Ю. Самсонова (асп., 2 год, СПбГУ, каф. фотоники),  
А.В. Бардакова (асп., 3 год, СПбГУ, каф. фотоники),  
Ю.В. Капитонов (к.ф.-м.н., доц., СПбГУ, каф. фотоники)

## ЭКСФОЛИАЦИЯ ДВУМЕРНЫХ ГИБРИДНЫХ ГАЛОГЕНИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ

В настоящее время значительный научный интерес представляют галогенидные перовскиты, являющиеся полупроводниками с уникальными оптическими свойствами. Особенности этих материалов являются экситонное излучение, возможность перестраивать запрещенную зону и простота изготовления. Галогенидные перовскиты применяются для создания солнечных батарей, светодиодов, фотодетекторов, лазеров и других оптоэлектронных устройств [1].

В данной работе исследовались 2D галогенидные перовскиты из семейства Раддлесден-Поппера  $\text{VA}_2\text{PbVr}_4$  и  $\text{VA}_2\text{PbI}_4$ . Кристаллическая структура перовскитов этого семейства представляет собой слои анионных октаэдров с расположенными между ними катионами бутиламмония. Возникающие между органическими катионами Ван-дер-Ваальсовы силы можно преодолеть внешним воздействием, что позволяет применять метод механической эксфолиации для получения объемных тонких кристаллов большой площади.

С помощью метода механической эксфолиации были получены микропластины большой площади  $\text{VA}_2\text{PbI}_4$  толщиной от 17 до 148 нм и  $\text{VA}_2\text{PbVr}_4$  толщиной от 15 до 407 нм. Кроме того, были получены микропластины со ступенчатой структурой, что позволило выделить перепады высотой 1.6 нм, соответствующие толщине одного монослоя.

Эксфолированные микропластины толщиной в несколько монослоев ведут себя иначе, чем объемный материал [2]. Это обусловлено переорганизацией органических катионов вокруг неорганического слоя, что приводит к синему сдвигу фотолюминесценции и уширению экситонного резонанса. Разработанный в данной исследовательской работе метод получения и характеристики микропластин 2D перовскитов толщиной в несколько монослоев открывает возможности для конструирования на их основе оптоэлектронных устройств с заданными свойствами.

Выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Мегагрант №075-15-2022-1112) на оборудовании РЦ «Геомеодель» и «Нанофотоника».

1. Lixiu Zhang et al., *Nano-Micro Lett*, **15**, 177 (2023).
2. Wendy Niu et al., *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 171111 (2014).



М.В. Учаев (студ., 2 курс маг., НИУ ИТМО, физический факультет),  
 К.В. Лихачев (асп., 2 год, м.н.с. ФТИ им. А.Ф. Иоффе),  
 С.В. Кидалов (к.ф.-м.н., с.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОДМР-АКТИВНЫХ СПЕЧЕННЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ С NV-ЦЕНТРАМИ, ПОЛУЧЕННЫХ БЕЗ ОБЛУЧЕНИЯ, И РЕАЛИЗАЦИЯ МАГНИТОМЕТРИИ НА ИХ ОСНОВЕ

Алмаз является одним из наиболее многообещающих минералов и имеет огромное прикладное значение в различных сферах человеческой деятельности. Анализ кристаллической структуры алмаза для этих целей проводится множеством различных физических методов, среди которых для определения свойств внутренних парамагнитных дефектов используется методы конфокальной спектроскопии и оптическое детектирование магнитного резонанса (ОДМР), которые позволяют проводить анализ с высоким пространственным разрешением. Среди парамагнитных дефектов в алмазе можно особенно выделить NV-центр. Данный центр обладает уникальной особенностью оптического выстраивания спиновых состояний в нулевом магнитном поле при комнатной температуре, что, в свою очередь, позволяет регистрировать ОДМР с высоким пространственным разрешением. На основе NV-центров в алмазе реализуются квантовые вычисления [1] и изучение биологических объектов [2].

В рамках данной работы были описаны результаты исследования оптическими методами кристаллической структуры и состава микрокристаллических алмазов, полученных методом высокотемпературного спекания частиц детонационного наноалмаза (SDND) под высоким давлением, проведена модернизация АСМ-кантилевера SDND частицей и реализована магнитометрия с использованием модернизированного АСМ-кантилевера. Ярко выраженные азотно-вакансионные дефекты были охарактеризованы методом ОДМР, который показал, что спиновые свойства полученных монокристаллов соответствуют высококачественным природным алмазам и превосходят синтетические алмазы, полученные из графита.

Важным этапом данного исследования стало использование SDND в качестве наносенсоров. Основным результатом является успешная регистрация сигнала ОДМР с кончика АСМ-кантилевера, модифицированного монокристаллом алмаза. Во внешнем магнитном поле наблюдается расщепление спектра ОДМР на четыре линии с одной стороны от центра (2.8 ГГц), соответствующие четырем ориентациям осей NV-центра. Положение резонансных линий спектра ОДМР дает информацию о величине и направлении магнитного поля:

$$f_{\pm} = D + 3\gamma_e^2 B^2 / 2D \cdot \sin^2(\theta_B) \pm \gamma_e B \cos(\theta_B) \cdot \sqrt{1 + \frac{\gamma_e^2 B^2}{4D^2} \cdot tg^2(\theta_B) \cdot \sin^2(\theta_B)}.$$

Исследование было выполнено при поддержке фонда РФФИ №20-52-76010 ЭРА\_т.

1. F. Kong, C. Ju, Y. Liu, et. al., Phys. Rev. Lett. 117.6, 060503 (2016).
2. R. Schirhagl, K. Chang, M. Loretz, C.L. Degen, Rev. Phys. Chem. 65.1, 83-105 (2014).

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

	<i>Секция</i>	<i>Стр.</i>			
Артеев Д.С.	ПР-1	21	Караулов Д.А.	У-22	15
Авдеев П.Ю.	ПОиН-1	97	Климов А.А.	ПОиН-5	89
Адамов Р.Б.	У-19	34	Козко И.А.	У-43	79
Аникина М.А.	КТКН-1	73	Контрош Е.В.	У-41	90
Бабин Д.В.	У-49	11	Копытов П.Е.	ПОиН-6	96
Баженов А.О.	У-42	74	Корнышов Г.О.	У-21	38
Бажин П.С.	У-9	35	Кузнецов А.	У-31	63
Батаев М.Н.	У-11	61	Кузьмин Н.С.	У-38	53
Батуев И.О.	НМ-1	109	Куликова Д.П.	ГСКЯ-1	39
Батуева А.В.	У-35	7	Лактаев И.Д.	У-29	64
Башегурова Е.А.	КТКН-2	75	Лендяшова В.В.	ПР-5	28
Бекман А.А.	ПОиН-2	83	Литвяк В.М.	У-12	8
Бердников В.С.	У-4	12	Мажукина К.А.	ГСКЯ-2	54
Бутюгина А.А.	У-24	49	Маслова Н.А.	ПОиН-7	99
Ведь М.В.	ПОиН-3	84	Матюнина К.С.	НМ-2	110
Вейшторг И.П.	У-8	13	Машинский К.В.	КТКН-4	65
Вторыгин Г.Э.	ПР-2	25	Микаева А.С.	У-46	29
Гогина О.А.	ПР-3	22	Михайленко Е.К.	НМ-3	106
Горбатова А.В.	У-45	33	Михайленко Н.О.	У-32	80
Григоренко И.Н.	У-16	85	Михайлов О.П.	ПОиН-8	100
Григорян К.К.	У-34	50	Мкртчян М.	КТКН-5,6	66,67
Гуныга А.А.	У-30	51	Николаева А.В.	ПОиН-9	101
Гурулева Н.В.	У-10	76	Новиков И.А.	ПР-6	30
Гуськов А.А.	У-33	86	Норватов И.А.	ПОиН-10	102
Доморацкий Е.В.	У-47	52	Осинных И.В.	ПР-7	23
Драгунова А.С.	У-5	87	Панфилов А.С.	ГСКЯ-3	40
Жданов В.С.	ПР-4	26	Пахольчук Н.П.	ОСП-3	16
Живописцев А.А.	У-40	77	Петров А.С.	ГСКЯ-4,	41,42
Жиляков В.Л.	ОСП-1	14		У-37	
Захаров В.Е.	У-27	62	Пшеничный В.А.	ОСП-4	17
Захарченко М.В.	У-39	36	Рагоза М.Д.	У-25	9
Здоровейщев Д.А.	ОСП-2	20	Ракицкий М.А.	У-1	45
Иванов А.А.	У-3	37	Резник И.А.	КТКН-7	68
Иванов А.Е.	ПОиН-4	88	Ремеле В.Е.	ПР-8	31
Канафиева Е.Ф.	У-13	27	Рибенек В.А.	ПОиН-11	91
Караборчев А.А.	У-28	98	Розанов Н.Н.	ПД-1	5
Карасева Е.П.	КТКН-3	78	Рудаков А.О.	У-23	43

Ружеви́ч М.С.	ГСКЯ-5	44	Цапа́нова Л.Г.	У-6	81
Самарце́в И.В.	ПОиН-12	92	Ча́вчанидзе А.К.	ПОиН-16	104
Сандако́в Н.С.	У-26	55	Че́кушева С.С.	У-44	58
Сапожни́кова Е.В.	ПОиН-13	93	Чума́нов И.В.	У-15	59
Са́рыпов Д.И.	У-20	56	Шаба́ев В.М.	ПД-2	6
Скоро́хов А.М.	У-50	18	Шапра́н Д.А.	ГСКЯ-8	47
Снеги́рев А.В.	У-36	111	Шарна́с М.Р.	ОСП-5	19
Солово́ва Н.Ю.	ПР-9	32	Шаро́в В.А.	КТКН-8	70
Сотни́чук М.К.	ГСКЯ-6	57	Шевче́нко И.В.	ОСП-6	10
Степа́нов М.А.	ПОиН-14	103	Шими́н Ч.	ГКСЯ-7	48
Тесли́на П.П.	НМ-4	112	Шипко́в В.Е.	ПОиН-17	105
Усти́менко Р.В.	У-14	69	Шпа́гина Е.В.	У-17	71
Уча́ев М.В.	НМ-5	113	Э́гбали А.	КТКН-9	72
Федоре́нко Е.Д.	ПР-10	24	Яковле́в З.А.	У-2	82
Фоми́ных Н.А.	У-7	94	Яковле́ва В.В.	НМ-7	108
Хамуд Г.	ПОиН-15	95	Янце́р А.А.	У-18	60
Харисо́ва Р.Д.	НМ-6	107			
Хаху́лин С.А.	У-48	46			

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

Тезисы докладов  
Всероссийской научной молодежной конференции

27 ноября – 1 декабря 2023 года

Санкт-Петербург

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

---

Подписано в печать 14.11.2023. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 7,25. Тираж 140. Заказ 4698.

---

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.