

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 34.01.02
ПРИ ФЕДЕРАЛЬНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ
УЧРЕЖДЕНИИ НАУКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ
ИМ. А.Ф. ИОФФЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 26.12.2019 № 2

О присуждении Рахлину Максиму Владимировичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Источники одиночных фотонов видимого спектрального диапазона на основе эпитаксиальных квантовых точек InAs/AlGaAs и CdSe/ZnSe» по специальности 01.04.10 – физика полупроводников принята к защите «24» октября 2019 г., протокол № 1, диссертационным советом 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26, утвержденным 12 июля 2019 г. приказом ФТИ им. А.Ф. Иоффе №75.

Соискатель Рахлин Максим Владимирович, 1991 года рождения, окончил Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук (СПб АУ РАН, Хлопина д.8, к.3, лит. А, Санкт-Петербург, 194021), получив квалификацию магистра в 2014 г. С 2014 по 2018 гг. соискатель проходил обучение в аспирантуре при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. Соискатель занимает должность и.о. м.н.с. в лаборатории квантоворазмерных гетероструктур Центра физики наногетероструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

Официальные оппоненты:

1. Доктор физико-математических наук Сапега Виктор Федорович, ведущий научный сотрудник лаборатории оптики полупроводников Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.
2. Доктор физико-математических наук Вербин Сергей Юрьевич, профессор кафедры физики твердого тела Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, ул. Ульяновская, д.1

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» (119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1) в своем положительном заключении, подписанном научным руководителем центра квантовых технологий МГУ им. М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н., профессором Куликом Сергеем Павловичем, утвержденном деканом физического факультета д.ф.-м.н., профессором Сыроевым Н.Н., дала положительный отзыв и отметила, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой завершённое научное исследование, соответствующее профилю совета 34.01.02 (специальность 01.04.10 – физика полупроводников). В отзыве отмечено два замечания:

1. В главе 1 диссертации отмечается, что для возбуждения фотолюминесценции квантовых точек использовались полупроводниковые лазеры с длинами волн 405 и 604 нм, а для измерения автокорреляционной функции $g^{(2)}$ – вторая гармоника

титан сапфирового лазера с длиной волны 400 нм. Из текста диссертации не ясно – из каких соображений были выбраны именно эти источники оптической накачки и какие механизмы возбуждения однофотонного излучения реализовывались в конкретных описываемых экспериментах – надбарьерное, резонансное, квазирезонансное и т.д.?

2. В 4-й и 5-й главах диссертации автор приводит значения интенсивности однофотонного излучения “на первой линзе”, и как это измеренное значение соотносится с интенсивностью излучения на выходе источника одиночных фотонов и на однофотонном детекторе, осуществляющем регистрацию интенсивности.

Указано, что сделанные замечания носят характер рекомендаций и не снижают общего впечатления от работы.

Исследования, результаты которых представлены в диссертационной работе, являются актуальными и своевременными. Результаты диссертации апробированы на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях, опубликованных в десяти статьях в журналах. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям Положения Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Рахлин Максим Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обуславливается их высокой квалификацией, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. На все замечания соискателем даны исчерпывающие квалифицированные ответы.

На автореферат поступило 6 отзывов, все они положительные.

Отзыв доктора физико-математических наук Агеяна Вадима Фадеевича, профессора кафедры физики твердого тела Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-

Петербургского государственного университета (198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, ул. Ульяновская, д.1). Отзыв положительный, замечание:

1) В автореферате много места уделено описанию тонкой структуры экситонного спектра, высказываются предположения о том, с чем связана поляризация компонент этой структуры, однако не сказано о том, что является причиной появления тонкой структуры.

Отзыв кандидата физико-математических наук Акимова Ильи Андреевича, научного сотрудника Технического университета г. Дортмунда (D-44227, Германия, г. Дортмунд, Отто-Хан-штрассе, 4а). Отзыв положительный, замечание:

1) Количество рисунков в автореферате следовало бы увеличить. Так, из описания не совсем понятно – как выглядит фотонная наноантенна, описываемая в четвертой и пятой главах?

Отзыв доктора физико-математических наук Калитеевского Михаила Алексеевича, главного научного сотрудника Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета им. Ж.И. Алферова Российской академии наук (194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, к. 3, лит. А). Отзыв положительный, без замечаний.

Отзыв доктора физико-математических наук Кочерешко Владимира Петровича, главного научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26). Отзыв положительный, без замечаний.

Отзыв доктора физико-математических наук Манцевича Владимира Николаевича, доцента физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1). Отзыв положительный, замечания:

1) В тексте автореферата отсутствуют данные о параметрах квантовых точек форма, размеры, дисперсия размеров. Кроме того, из текста автореферата неясно насколько отличаются параметры квантовых точек, выращенных при помощи разных технологий.

2) Для квантовых точек CdSe/ZnSe следовало бы привести зависимости, демонстрирующие их оптические характеристики.

3) При измерении корреляционной функции второго порядка однофотонного излучения квантовых точек CdSe/ZnMgSSe получен значительный разброс данных (рис. 1). В тексте автореферата не указано, как проведена аппроксимация экспериментальных результатов. Какова точность измерения данных, приведенных на рис. 2b?

4) Можно ли оценить диапазон концентраций, в рамках которого исследованные в работе системы квантовых точек являются источниками однофотонного излучения?

Отзыв доктора физико-математических наук Шамирзаева Тимура Сезгировича, ведущего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 13). Отзыв положительный, без замечаний.

Диссертационный совет отмечает, что на **основании выполненных соискателем исследований** решен комплекс задач, которые являются актуальными для физики полупроводниковых квантовых точек. С помощью различных методик удалось впервые исследовать следующие проблемы:

- 1) Выявить оптимальный режим роста, который позволяет получить минимальную плотность квантовых точек, в результате сравнения характеристик излучательных свойств квантовых точек CdSe/ZnSe, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с использованием различных технологических приемов.
- 2) Реализовать высокий внутренний квантовый выход при повышенных температурах в квантовых точках CdSe за счет снижения вероятности термической активации носителей из квантовых точек в окружающие барьеры ZnSe/ZnSSe/ZnMgSSe.
- 3) Определить влияние подслоя GaAs, вставленного между нижним барьером и слоем квантовых точек, на величину анизотропного обменного расщепления в тонкой структуре экситонных линий в квантовых точках InAs/AlGaAs.

- 4) Реализовать источник одиночных фотонов для красной области спектра на основе квантовых точек InAs/AlGaAs со скоростью генерации, превышающей 5 МГц.
- 5) Реализовать однофотонное излучение со скоростью генерации более 1 МГц при температуре 77 К в квантовых точках CdSe в диапазоне длин волн 450-600 нм.

Практическая значимость состоит в следующем:

- 1) Однофотонное излучение из одиночных квантовых точек CdSe/ZnSe, выращенных с поверхностной плотностью точек менее 10^{10} см⁻² методом молекулярно-пучковой эпитаксии в режиме термической активации, достижимо при условии их пространственного ограничения путем формирования цилиндрических меза-структур.
- 2) Спектральный диапазон излучения квантовых точек InAs/Al_xGa_{1-x}As ($x \sim 0.4$) зависит от наличия тонкой прослойки GaAs между ними и нижним барьерным слоем, влияющей на размер точек и, как следствие, на длину волны излучения, регистрируемой в красной области спектра 630-730 нм без прослойки и в диапазоне 700-1000 нм при ее наличии.
- 3) Величина расщепления основного состояния экситона, определяемого анизотропной частью обменного взаимодействия, не превышает 20 мкэВ в высокоэнергетичной части спектра излучения ансамбля квантовых точек InAs/ Al_xGa_{1-x}As ($x \sim 0.4$), формируемых с прослойкой GaAs.
- 4) Волноводные оптические наноантенны с градиентным сечением позволяют реализовать излучение одиночных фотонов со скоростью генерации 5 МГц при 8 К для квантовых точек InAs/ Al_xGa_{1-x}As ($x \sim 0.3$) и 1 МГц при 80 К для квантовых точек CdSe/ZnSe.

Диссертация является законченным, последовательным и внутренне согласованным научным трудом, имеющим как фундаментальное, так и прикладное значение.

Достоверность и надежность результатов.

Основные положения и выводы диссертации надежно обоснованы. Для их получения использовались современные методики микрофотолюминесценции и корреляционной спектроскопии. По каждому направлению исследований проводились серии экспериментов и анализ

полученных результатов с целью получения достоверных данных. Результаты работы опубликованы в авторитетных рецензируемых международных журналах.

Апробация работы. Результаты, вошедшие в данную работу, докладывались на следующих российских и международных конференциях: «44th International school and conference on the physics of semiconductors» (Jaszowiec, Poland, 2015), «17th International conference of II-VI compounds and related materials» (Paris, France, 2015), «Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике» (Санкт-Петербург, 2016, 2017), «4th International school and conference “Saint-Petersburg Open 2017”» (Saint-Petersburg, 2017), «25th International symposium Nanostructures: physics and technology» (Saint-Petersburg, 2017), «Экситоны в полупроводниках и полупроводниковых структурах, к 120-й годовщине со дня рождения Е.Ф. Гросса» (Санкт-Петербург, 2017), «International conference on optics of excitons in confined systems» (Bath, Great Britain, 2017), «34th International conference on the physics of semiconductors» (Montpellier, France, 2018).

Личный вклад автора. Автор проводил эксперименты по исследованию микро-фотолюминесценции с микронным пространственным разрешением, разрабатывал конструкцию и уточнял параметры исследуемых структур. Автор создавал установку для измерения автокорреляционной функции в одиночных квантовых точках при пониженных температурах, проводил эксперименты на этой установке, анализировал полученные результаты и проводил их подготовку к публикации.

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 10 научных работ. Все статьи опубликованы в журналах, включенных в систему цитирования Web of Science. Среди опубликованных статей по теме диссертации наиболее важными являются следующие (в скобках указан личный вклад автора):

1. M.V. Rakhlin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, S.V. Gronin, A.A. Usikova, A.A. Sitnikova, P.N. Brunkov, S.V. Ivanov, A.A. Toropov. Comparative studies of CdSe/ZnSe quantum dot structures epitaxially grown either with or without a sub-monolayer CdTe stressor, Phys. Stat. Sol. C 13, 7-9, 514-517 (2016)

(Проведение эксперимента, анализ полученных результатов, подготовка статьи)

2. M.V. Rakhlin, K.G. Belyaev, S.V. Sorokin, I.S. Mukhin, S.V. Ivanov, A.A. Toropov. Optical properties of blue-green single-photon sources based on self-assembled CdSe quantum dots, J. Phys.: Conf. Ser. 993, 012023 (2018)

(Проведение эксперимента, анализ полученных результатов, подготовка статьи)

3. M.V. Rakhlin, K.G. Belyaev, G.V. Klimko, I.S. Mukhin, D.A. Kirilenko, T.V. Shubina, S.V. Ivanov, A.A. Toropov. InAs/AlGaAs quantum dots for single photon emission in a red spectral range, Sci. Rep. 8, 5299 (2018)

(Проведение эксперимента, анализ полученных результатов, подготовка статьи)

4. М.В. Рахлин, К. Г. Беляев, С.В. Сорокин, И.В. Седова, Д.А. Кириленко, А.М. Можаров, И.С. Мухин, М.М. Кулагина, Ю.М. Задиранов, С.В. Иванов, А.А. Торопов. Однофотонный источник при 80 К на основе диэлектрической наноантенны с CdSe/ZnSe квантовой точкой, Письма в ЖЭТФ 108, 3, 201-204 (2018)

(Проведение эксперимента, анализ полученных результатов, подготовка статьи)

5. М.В. Рахлин, К. Г. Беляев, Г.В. Климко, И.В. Седова, М.М. Кулагина, Ю.М. Задиранов, С.И. Трошков, Ю.А. Гусева, Я.В. Терентьев, С.В. Иванов, А.А. Торопов. Эффективный полупроводниковый источник одиночных фотонов красного спектрального диапазона, Письма в ЖЭТФ 109, 3, 147-151 (2019)

(Проведение эксперимента, анализ полученных результатов, подготовка статьи)

На заседании 26 декабря 2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Рахлину М.В. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационного совета в количестве 23 человек, из них 17 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, проголосовали:

За присуждение Рахлину Максиму Владимировичу ученой степени кандидата физико-математических наук

подано голосов – 23.

Против – 0.

Недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета,

Академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор

Сурис Роберт Арнольдович

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физ.-мат. наук

Сорокин Лев Михайлович

26 декабря 2019 г.