

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА АУ 02.01

федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
имени Ж.И. Алферова Российской академии наук»

ПО ДИССЕРТАЦИИ

НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 01 октября 2026 года № 15

О присуждении Мельниченко Ивану Алексеевичу (гражданину Российской Федерации) ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Влияние поверхностных явлений и динамики носителей заряда на характеристики микродисковых лазеров с квантоворазмерной активной областью на основе InGaAs/GaAs» по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников принята к защите 8 июля 2026 г. (протокол заседания № 10) диссертационным советом АУ 02.01 федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук» (194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, корп. 3, литер А; приказ № 305/1 от 22 ноября 2024 г.).

Соискатель, Мельниченко Иван Алексеевич, 26 августа 1998 года рождения. В 2022 году окончил магистратуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» по направлению подготовки 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника». В 2026 году окончил аспирантуру в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук» по научной специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

В настоящее время соискатель работает младшим научным сотрудником в международной лаборатории квантовой оптоэлектроники факультета «Школа информатики, физики и технологий» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» – Санкт-Петербург, а также лаборантом в лаборатории нанофотоники федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук».

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук».

Научный руководитель:

Крыжановская Наталья Владимировна, доктор физико-математических наук, заведующий Международной лабораторией квантовой оптоэлектроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

Официальные оппоненты:

Биленко Игорь Антонович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики колебаний физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Оппонент дал **положительный отзыв**, который содержит следующие **замечания**:

1) Учитывался ли наклон боковой стенки микродискового лазера (МДЛ) при моделировании распределения лазерной моды шепчущей галереи (МШГ)? Как этот наклон будет влиять на утечку МШГ в подложку GaAs?

2) Снижение концентрации носителей заряда вблизи боковой поверхности инжекционного микродиска связывается преимущественно с влиянием поверхностной рекомбинации. Вместе с тем радиальный профиль носителей в активной области может зависеть и от растекания тока от верхнего контакта, отстоящего от края МДЛ примерно на 2 мкм. Оценивался ли вклад неоднородности токовой инжекции и при каких параметрах структуры его можно считать малым по сравнению с поверхностным обеднением носителей заряда вблизи латеральной стенки микролазеров?

3) Чем будет определяться радиальный порядок лазерной МШГ, если активную область на основе КЯТ InGaAs/GaAs заменить квантовой ямой или квантовыми точками?

Ладугин Максим Анатольевич, доктор физико-математических наук, начальник научно-производственного комплекса акционерного общества «Научно-исследовательский институт «Полус» им. М.Ф. Стельмаха».

Оппонент дал **положительный отзыв**, который содержит следующие **замечания**:

1) В работе имеются орфографические и оформительские ошибки, досадные опечатки и стилистические неточности («скорость диффузионной длины», «пассивация микролазеров», «рост лазеров», «листовая концентрация», «осаждение слоев АСО»). Ряд сокращений либо не расшифрован сразу, либо не приведен в списке сокращений.

2) Целесообразно, на мой взгляд, было бы выбрать единый термин - микродисковые лазеры (МДЛ) или микролазеры - чтобы не путаться в определениях и потенциальных применениях подобных типов лазеров.

3) В обзоре литературы упоминается широкое развитие волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и телекоммуникационных технологий, а также применение фотонных интегральных схем (ФИС) с полупроводниковыми источниками излучения. Однако среди используемых источников не упомянут самый распространенный в настоящее время, а именно торцевой лазер с распределенной обратной связью (РОС-лазер) и его модификации (DFB, DBR, DML, EML).

4) В экспериментах по эпитаксиальному росту было бы полезно рассмотреть различные режимы получения гетероструктур с квантовыми слоями, так как оптимизация данных режимов могла бы позволить снизить скорость поверхностной рекомбинации на гетерограницах сверхрешетки (СР), квантовых ям (КЯ) и/или квантовых яма-точек (КЯТ); Аналогично, в экспериментах по плазмохимическому травлению в хлорсодержащей плазме, а также осаждению пассивирующих покрытий было бы полезно рассмотреть различные режимы процессов, так как оптимизация режимов могла бы позволить снизить скорость поверхностной рекомбинации.

5) Обнаруженная деградация фотолюминесценции КЯТ при последующем воздействии оптической накачки на мезоструктуры с золь-гелем может вызывать проблемы с практическим применением данных МДЛ. Как вы оцениваете перспективность предложенных способов пассивации с точки зрения надежности?

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, подписанном Усовым Сергеем Олеговичем, кандидатом физико-математических наук,

научным сотрудником лаборатории технологии наногетероструктур, и утвержденном Цацульниковым Андреем Федоровичем, доктором физико-математических наук, исполняющим обязанности директора организации, указала, что диссертация является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему. Полученные результаты обладают научной новизной и практической значимостью, а диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям; ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников. Отзыв содержит **замечания**:

1) В работе не приведено сравнение величин полученного времени захвата носителей заряда для гетероструктур с квантовыми яма-точками InGaAs/GaAs с известными характерными значениями для структур с квантовыми ямами и квантовыми точками на основе InGaAs.

2) В работе отсутствует указание на иной возможный механизм влияния пассивирующего слоя SiO₂ на характеристики МДЛ, связанный с изменением показателя преломления на латеральных стенках лазерной структуры.

3) Следовало бы привести значения погрешности определения полученных значений для диффузионной длины, коэффициента диффузии и скорости поверхностной рекомбинации.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью, достижениями и наличием публикаций в области физики полупроводников, полупроводниковых эпитаксиальных структур, лазерной физики и оптоэлектроники, соответствующей теме диссертации, а также способностью определить научную и практическую ценность выполненного исследования.

Соискатель имеет 42 опубликованные работы. По теме диссертации опубликовано 8 работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus.

Список публикаций по теме диссертации:

1. Крыжановская Н.В., Мельниченко И.А., Букатин А.С., Корнев А.А., Филатов Н.А., Щербак С.А., Липовский А.А., Драгунова А.С., Кулагина М.М., Лихачев А.И., Фетисова М.В., Редута И.В., Максимов М.В., Жуков А.Е. Исследование чувствительности микродискового лазера к изменению показателя преломления окружающей среды // Письма в Журнал технической физики. – 2022. – Т. 48, № 2. – С. 74–77.
2. Надточий А.М., Мельниченко И.А., Иванов К.А., Минтаиров С.А., Калюжный Н.А., Максимов М.В., Крыжановская Н.В., Жуков А.Е. Температурные зависимости излучательного и безызлучательного времени жизни носителей в квантовых яма-точках InGaAs // Физика и техника полупроводников. – 2022. – Т. 56, № 10. – С. 993–996.
3. Ivanov K.A., Nadtochiy A.M., Kryzhanovskaya N.V., Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Melnichenko I.A., Maximov M.V., Zhukov A.E. Time-resolved temperature-dependent photoluminescence spectroscopy of InGaAs/GaAs quantum well-dots // Journal of Luminescence. – 2023. – Vol. 255. – Art. 119620.
4. Melnichenko I.A., Nadtochiy A.M., Ivanov K.A., Makhov I.S., Maximov M.V., Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Kryzhanovskaya N.V., Zhukov A.E. Time-resolved photoluminescence study of InGaAs/GaAs quantum well-dots with upconversion method // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2023. – Vol. 16, No. 1.1. – P. 22–27.
5. Мельниченко И.А., Крыжановская Н.В., Иванов К.А., Надточий А.М., Махов И.С., Козодаев М.Г., Хакимов Р.Р., Маркеев А.М., Воробьев А.А., Можаров А.М., Гусева Ю.А., Лихачев А.И., Колодезный Е.С., Жуков А.Е. Влияние пассивации поверхности

- цилиндрических меза-структур на основе GaAs на их оптические свойства // Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131, № 8. – С. 1112–1117.
6. Melnichenko I.A., Moiseev E.I., Ivanov K.A., Kryzhanovskaya N.V., Vainilovich A.G., Nahorny A.V., Lutsenko E.V., Zhukov A.E. Mode leakage into substrate in microdisk lasers // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2024. – Vol. 17, No. 3.2. – P. 212–216.
7. Ivanov K.A., Zhukov A.E., Moiseev E.I., Melnichenko I.A., Makhov I.S., Kryzhanovskaya N.V. Analysis of factors determining the azimuthal and radial order of lasing mode in III–V quantum dot disk microlasers // Journal of Applied Physics. – 2025. – Vol. 138, No. 10. – Art. 103104.
8. Melnichenko I.A., Shugabaev T., Fominykh N.A., Makhov I.S., Moiseev E.I., Gridchin V.O., Zhukov A.E., Kulagina M., Kryzhanovskaya N.V. Optical properties of InGaAsN quantum well-based microlasers passivated by SiO₂ sol–gel film // Optics Letters. – 2025. – Vol. 50, No. 21. – P. 6819–6822.

На диссертацию и автореферат поступили положительные отзывы:

1. Отзыв на автореферат Винниченко Максима Яковлевича, кандидата физико-математических наук, доцента Высшей инженерно-физической школы Института электроники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Отзыв содержит **замечания**:

1) Из рисунка 3 не ясно по какому участку временной зависимости фотолюминесценции GaAs определено время спада?

2) В пятой главе диссертации не понятно с какими физическими явлениями связан сдвиг пика лазерной генерации при разных концентрациях примеси, только с изменением показателя преломления в законе Снеллиуса или со спектральной зависимостью показателя преломления?

2. Отзыв на автореферат Солодовника Максима Сергеевича, кандидата технических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории эпитаксиальных технологий Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета. Отзыв содержит **замечания**:

1) В работе показано, зависимость отношения интенсивностей фотолюминесценции до и после пассивации слоем Al₂O₃ от диаметра мезаструктур имеет немонотонный характер, убывающий с уменьшением мезы, что объясняется увеличением вклада безызлучательной рекомбинации на боковых стенках. Однако, при пассивации структур слоем SiO₂ тенденция обратная и ожидаемая – влияние пассивации снижается с ростом диаметра структуры. Не может ли обнаруженная немонотонность быть связана с особенностями метода нанесения?

2) Из автореферата не ясно, проводился ли анализ преимуществ использования микродисковых лазеров в качестве сенсоров в сравнении с конкурирующими решениями?

3. Отзыв на автореферат Бабичева Андрея Владимировича, кандидата физико-математических наук, научного сотрудника лаборатории интегральной оптики на гетероструктурах Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. Отзыв **не содержит замечаний**.

4. Отзыв на автореферат Панова Михаила Федоровича, доктора физико-математических наук, доцента кафедры Микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Отзыв **не содержит замечаний**.

Во всех полученных отзывах отмечается актуальность диссертационного исследования, новизна, теоретическая и практическая значимость полученных соискателем результатов. Авторы отзывов указывают, что приведенные замечания и вопросы носят уточняющий характер, не ставят под сомнение достоверность основных

результатов и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Мельниченко И. А.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан метод определения длины латеральной амбиполярной диффузии носителей и скорости поверхностной рекомбинации по совместным зависимостям интегральной интенсивности и времени спада фотолюминесценции (ФЛ) от диаметра цилиндрических мезоструктур с InGaAs/GaAs КЯТ;

предложена модель заполнения состояний InGaAs/GaAs КЯТ на основе кинетики ФЛ гетероструктур с InGaAs/GaAs КЯТ, а их изменение с температурой описано с помощью двухуровневой системы скоростных уравнений;

доказано, что:

- в инжекционных дисковых микролазерах на основе квантовых яма-точек $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x = 0,35-0,45$) факторами, определяющими порядок лазерной моды шепчущей галереи, являются поверхностная рекомбинация носителей, ограничивающая генерацию мод низких радиальных порядков, и утеkanie электромагнитного поля в подложку, ограничивающее генерацию мод высоких радиальных порядков;

- по характеристикам латерального транспорта структуры с квантовыми $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ яма-точками ($x = 0,35-0,45$) занимают промежуточное положение между структурами с квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x = 0,15-0,25$) и структурами с квантовыми точками InAs/GaAs : скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда при комнатной температуре составляет 3×10^4 см/с, длина амбиполярной диффузии носителей заряда в плоскости слоя квантовых яма-точек 1,3 мкм;

- время захвата носителей заряда в квантовые яма-точки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x = 0,35-0,45$) из состояний матрицы GaAs не превышает 10 пс при температуре 300 К; время спада ФЛ на основном переходе при температуре 10 К определяется излучательным временем и составляет 0,7 нс, а с увеличением температуры до комнатной возрастает до 4,5 нс вследствие выброса носителей заряда в матрицу GaAs;

введены характерные количественные значения, описывающие латеральный транспорт носителей заряда в слое InGaAs/GaAs КЯТ: значение длины амбиполярной диффузии составило 1,3 мкм, коэффициента диффузии $3,7 \text{ см}^2/\text{с}$, скорости поверхностной рекомбинации $2,8 \times 10^4$ см/с и критического диаметра мезоструктур, для которого интенсивность ФЛ падает на порядок, 2,6 мкм.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что при низких температурах время спада ФЛ отражает время излучательной рекомбинации, а при увеличении температуры время спада ФЛ возрастает вследствие увеличения темпа выброса носителей заряда из состояний InGaAs/GaAs КЯТ в матрицу GaAs;

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс стационарной и время-разрешённой спектроскопии ФЛ с ап-конверсией, спектроскопии электролюминесценции, сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) и численного моделирования в COMSOL Multiphysics;

изложены результаты моделирования температурной кинетики ФЛ InGaAs/GaAs КЯТ с помощью двухуровневой системы скоростных уравнений, из аппроксимации которых получены величины энергетических барьеров для электронов (50 мэВ) и дырок (150 мэВ);

раскрыты особенности механизма пассивации мезоструктур с InGaAs/GaAs КЯ, InGaAs/GaAs КЯТ и InAs/InGaAs КТ; наибольший прирост ФЛ наблюдается для КЯ, а наименьший для КТ, что связано с различной степенью локализации и латерального транспорта носителей заряда;

изучены пространственные распределения напряженности электрического поля мод шепчущей галереи (МШГ) и их модовое усиление для различных радиальных порядков; расчёт выявил оптимальный радиальный порядок, при котором модовое усиление МШГ максимально;

проведена модернизация расчётной модели распределения МШГ в микродисковом лазере (МДЛ) с учётом зависимости коэффициента вертикального оптического ограничения от радиального порядка, что позволило описать рост потерь вследствие утечки излучения в подложку GaAs для МШГ высоких радиальных порядков.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены способы пассивации боковой поверхности мезаструктур атомно-слоевым осаждением Al_2O_3 и золь-гель нанесением SiO_2 ; они апробированы на структурах с КЯ, КЯТ и КТ;

определены количественные изменения характеристик мезаструктур, связанные с пассивацией их боковой поверхности: после нанесения Al_2O_3 на мезаструктуры с InGaAs/GaAs КЯ диаметром около 9 мкм интенсивность ФЛ увеличилась в 8 раз, а время её спада — примерно с 0,14 до 1 нс; для мезаструктур с КЯ диаметром 1,25 мкм слой SiO_2 обеспечил усиление ФЛ до 50 раз;

создан прототип рефрактометрического сенсора на основе МДЛ с InAs/InGaAs КТ: при измерениях в водных растворах NaCl и глюкозы чувствительность к показателю преломления составила до 7 и 9,4 нм/RIU (Refractive index unit) соответственно;

представлены результаты пассивации МДЛ с InGaAsN/GaAs КЯ: получена лазерная генерация при комнатной температуре с оптической накачкой, максимальное снижение порога лазерной генерации достигло 2,4 раза при 280 К; для инжекционного лазера диаметром около 16 мкм пороговая плотность тока снижена с 45,8 до 20,1 кА/см².

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

использованы современные методики сбора и обработки экспериментальных данных, а также методы численного моделирования для всесторонней и точной интерпретации научных результатов;

в работе показана воспроизводимость спектральных, мощностных и время-разрешённых характеристик при повторных измерениях и на различных образцах;

теория построена на известных положениях физики полупроводников, уравнениях диффузии и поверхностной рекомбинации, системе скоростных уравнений для состояний матрицы GaAs и InGaAs/GaAs КЯТ и уравнениях электродинамики;

идея модели для исследования параметров рекомбинации **базируется** на совместном анализе экспериментальных результатов, полученных с помощью стационарной и время-разрешённой ФЛ, и аналитических решений уравнений стационарной и нестационарной диффузии;

установлено соответствие между расчётными значениями диффузионной длины для InGaAs/GaAs КЯТ и литературными данными для схожих по составу квантоворазмерных гетероструктур.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии во всех этапах диссертационного исследования: постановке целей и задач совместно с научным руководителем, анализе научной литературы и планировании экспериментальных работ. Соискателем самостоятельно проведены измерения спектральных, мощностных, электролюминесцентных, время-разрешённых и ближнеполюсных характеристик исследованных мезаструктур и МДЛ, выполнены обработка, систематизация и физическая интерпретация экспериментальных данных. Теоретический анализ и разработка моделей динамики носителей заряда, поверхностной рекомбинации и факторов, определяющих порядок лазерной МШГ, выполнены соискателем совместно с научным руководителем.

Соискатель участвовал в подготовке научных публикаций и представлял результаты работы на российских и международных конференциях.

На заседании 01 октября 2026 г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития физики полупроводников и оптоэлектроники, заключающейся в определении параметров динамики носителей заряда, установлении влияния поверхности на оптические свойства аксиально-симметричных полупроводниковых структур и микродисковых лазеров с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs/GaAs, присудить Мельниченко Ивану Алексеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении электронного тайного голосования диссертационный совет в количестве 11 человек, из них 4 доктора наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» – 11, «против» – 0, «не голосовали» – 0.

Председатель
диссертационного совета АУ 02.01, д.т.н.

А. С. Гудовских

Секретарь
диссертационного совета АУ 02.01, к.ф.-м.н.

К. Ю. Шубина

01 октября 2026 г.