

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА АУ 02.01

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

ПО ДИССЕРТАЦИИ

НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 10 сентября 2026 г. № 11

О присуждении Харченко Антону Александровичу (гражданину Российской Федерации) ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Оптическое поглощение и излучение в волноводных гетероструктурах GaAs/AlGaAs с активной областью на основе квантовых ям-точек InGaAs» по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников принята к защите 14 мая 2026 г. (протокол заседания № 6) диссертационным советом АУ 02.01 федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук», 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, корп. 3, литер А, Приказ № 305/1 от 22 ноября 2024 г.

Соискатель, Харченко Антон Александрович, 12.04.1995 года рождения. В 2019 году окончил магистратуру СПбАУ РАН им. Ж. И. Алфёрова по направлению подготовки 11.04.04. «Электроника и нанoeлектроника», диплом № 107824 4080319. В 2023 году соискатель окончил аспирантуру СПбАУ РАН им. Ж. И. Алфёрова по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», профиль 1.3.11. «Физика полупроводников», с присуждением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь», диплом № 107824 0266572.

В настоящее время соискатель работает младшим научным сотрудником в лаборатории нанoфотоники СПбАУ РАН им. Ж. И. Алфёрова.

Диссертационная работа выполнена в лаборатории нанoфотоники СПбАУ РАН им. Ж. И. Алфёрова.

Научный руководитель:

Надточий Алексей Михайлович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нанoфотоники СПбАУ РАН им. Ж. И. Алфёрова.

Официальные оппоненты:

Зубков Василий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Факультет электроники, Кафедра микро- и нанoeлектроники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

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

- 1) По высоте слоя КЯТ должно наблюдаться изменение доли индия, в частности, за счет эффекта сегрегации. Это должно приводить к уширению наблюдаемых в эксперименте спектров фотолуминесценции.

- 2) Автор часто употребляет выражение «межзонные GS и ES оптические переходы в КЯТ». Это не вполне корректно и несет оттенок научного жаргона. Очевидно, здесь подразумеваются оптические переходы между уровнями квантования (подзонами квантования) электронов и дырок. Кроме того, и первый (e1-hh1 с участием тяжелых дырок) и второй (e1-lh1 с участием легких дырок), строго говоря, являются переходами между основными состояниями (т.е. GS).
- 3) На с. 53 при оценке показателя насыщенного усиления ($dG=3.7 \cdot 10^{-3}$) для КЯТ остался неочевидным выбор эквивалентного размера оптической моды d/G . В условиях некоторого произвола в оценке этого размера погрешность dG может быть велика.
- 4) Решение уравнения Шредингера для нахождения уровней квантования в КЯ (с. 64) выполнено в простом прямоугольном приближении. Здесь же для разрывов зон на гетероинтерфейсе взяты данные из теоретической работы, хотя для упруго напряженных КЯ InGaAs/GaAs существуют более точные экспериментальные значения [Zubkov, PRB04]. При этом следует иметь в виду, что в КЯТ In_{0.4}Ga_{0.6}As, возможно, произошла релаксация напряжений.
- 5) Автор по тексту нередко допускает нестрогую научную терминологию и лаконизм. Кроме уже упомянутых «GS и ES переходов», это, например, «Межзонный оптический переход ... взаимодействует с ТЕ поляризованным излучением» (с. 63), «частично поляризованная функция Гаусса» (термин, очевидно, придуман автором). Также корректнее говорить не «показатель поглощения α », а «коэффициент поглощения».
- 6) Из мелких неточностей отмечу: на рис. 23 и в подписи к нему допущена путаница, на рис. 34 по оси написано «Длина волны, отн. ед.».

Винниченко Максим Яковлевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Высшая инженерно-физическая школа, Институт электроники и телекоммуникаций, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». Оппонент дал **положительный отзыв**, который содержит следующие **замечания**:

- 1) В тексте диссертации отсутствует теоретическое (квантово-механическое) объяснение поляризационной анизотропии межзонных оптических переходов в квантовых ямочках. Природа переходов устанавливается экспериментально-феноменологически — путём прямого сопоставления спектров фоточувствительности КЯТ и эталонной КЯ без вывода соответствующих правил отбора из симметрии волновых функций или расчёта матричных элементов. Сами правила отбора лишь декларируются со ссылкой на известную литературу [73], но не выводятся и не обосновываются для конкретного случая КЯТ.
- 2) В диссертации в качестве активной области используются квантовые яма-точки на основе 8 монослоёв In_{0.4}Ga_{0.6}As. Из текста следует, что состав 40% индия является оптимальным. Однако прямое теоретическое обоснование того, почему именно 40% является экспериментальным порогом для формирования качественных КЯТ, в работе отсутствует. Остаётся открытым вопрос, на каких физических механизмах и экспериментальных данных основан выбор именно этого значения, и что происходит с ростом и свойствами структур при отклонении состава в меньшую (30% In) и большую (50% In) сторону?
- 3) Все основные результаты в диссертации получены для структур с активной областью на основе 8 монослоёв InGaAs. В разделе 3.1.3 (стр. 62) для сравнения используется структура с 4 монослоями того же состава. Однако в работе отсутствует явное обсуждение того, как изменение количества монослоёв (т.е. эффективной толщины КЯТ) влияет на положение энергетических уровней и, соответственно, на длины волн оптических переходов (основного и возбуждённого). Такое сравнение позволило бы количественно оценить вклад размерного квантования в формирование энергетического спектра КЯТ.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук (НТЦ микроэлектроники РАН), г. Санкт-Петербург, в своем **положительном отзыве**, подписанном Усовым Сергеем Олеговичем, кандидатом физико-математических наук, научным сотрудником лаборатории технологии наногетероструктур ФГБУН НТЦ микроэлектроники РАН и утвержденном Цацульниковым Андреем Федоровичем, доктором физико-математических наук, и.о. директора ФГБУН НТЦ микроэлектроники РАН, указала, что диссертация А.А. Харченко по содержанию и полученным результатам соответствует специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников» и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему. Работа отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук» с точки зрения актуальности, новизны и практической значимости полученных результатов, а ее автор, Харченко Антон Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников. Отзыв содержит **замечания**:

- 1) В работе проводится сопоставление значения насыщенного модалного усиления для гетероструктур с квантовыми точками InAs (1300 нм) и квантовыми яма-точками InGaAs (1050 нм). Необходимо подробнее обосновать корректность прямого сравнения характеристик активных областей, отличающихся по рабочим длинам волн.
- 2) Автору следовало бы подробнее объяснить, что подразумевается под коэффициентом насыщенного усиления. Исходя из приведённых данных, создается впечатление, что по значению коэффициента насыщенного усиления различие между структурами с КЯТ и КТ незначительно.
- 3) В работе отсутствует подробное пояснение о том, как именно ориентированы атомарные ступени относительно полоска в структуре: вдоль, поперек, или под углом.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью, достижениями и наличием публикаций в сфере исследований, соответствующей теме диссертации, и способностью определить научную и практическую ценность диссертации соискателя Харченко А. А.

Соискатель имеет 18 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 6 работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science, из которых 2 опубликованы в изданиях из перечня ВАК. Публикации полностью отражают основные выводы и положения диссертации. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах отсутствуют.

Список публикаций соискателя по теме диссертации:

1. Минтаиров С.А. Экспериментальное и теоретическое исследование спектров фоточувствительности структур с квантовыми ямами-точками $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ оптического диапазона 900–1050 нм / С.А. Минтаиров, Н.А. Калюжный, М.В. Максимов, А.М. Надточий, А.А. Харченко, М.З. Шварц, А.Е. Жуков // Письма в журнал технической физики. — 2020. — Т. 46, №3. — С. 3-6.
2. Kharchenko A.A. Study of waveguide absorption in InGaAs "quantum well-dots" heterostructures / A.A. Kharchenko, A.M. Nadtochiy, S.A. Mintairov, Y.M. Shernyakov, A.A. Serin, N.Y. Gordeev, M.V. Maximov, A.E. Zhukov // Nano-Structures and Nano-Objects. — 2021. — Vol. 25. — Art. 100628.

3. Nadtochiy A.M. Saturated layer gain in waveguides with InGaAs quantum well-dot heterostructures / A.M. Nadtochiy, N.Y. Gordeev, A.A. Kharchenko, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, Y.M. Shernyakov, M.V. Maximov, A.E. Zhukov, Y. Berdnikov // Journal of Lightwave Technology. — 2021. — Vol. 39. — P. 7479-7485.
4. Харченко А.А. Бимодальность в спектрах электролюминесценции InGaAs квантовых ям-точек / А.А. Харченко, А.М. Надточий, А.А. Серин, С.А. Минтаиров, Н.А. Калюжный, А.Е. Жуков, М.В. Максимов, S. Breuer // Физика и техника полупроводников. — 2022. — Т. 56, № 1. — С. 97-100.
5. Maximov M.V. Impact of modal gain and waveguide design on two-state lasing in quantum well-dot lasers / M.V. Maximov, Y.M. Shernyakov, G.O. Kornyshev, A.A. Beckman, F.I. Zubov, A.A. Kharchenko, A.S. Payusov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, V.G. Dubrovskii, N.Y. Gordeev // Optics Letters. — 2024. — Vol. 49. — P. 6213-6216.
6. Beckman A.A. Two-State Lasing in Quantum Well and Quantum Well-Dot Lasers / A.A. Beckman, G.O. Kornyshev, Y.M. Shernyakov, N.Y. Gordeev, A.S. Payusov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, O.I. Simchuk, A.A. Kharchenko, M.V. Maximov // Journal of Applied Spectroscopy. — 2025. — Vol. 92. — P. 76-82.

На диссертацию и автореферат поступили положительные отзывы:

1. **Махов Иван Сергеевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Отзыв содержит **замечания**:

1) При обсуждении результатов исследования двухуровневой лазерной генерации автором утверждается следующее: «... КЯ, где насыщенное усиление на переходе ES продолжает расти с насыщением усиления на GS [A5, A6]». Данное утверждение видится не до конца корректным, поскольку насыщенное усиление или же максимально достижимое является константой, характеризующей активную область. Вряд ли насыщенное усиление может расти с ростом уровня накачки.

2) В работе убедительно показано преимущество квантовых яма-точек по величине насыщенного усиления относительно самоорганизованных квантовых точек InAs. Вместе с тем представляло бы интерес более подробное сопоставление температурной стабильности приборных характеристик лазеров на основе квантовых яма-точек с традиционными структурами на основе квантовых ям и квантовых точек.

2. **Новиков Иннокентий Игоревич**, кандидат физико-математических наук, директор по новым разработкам ООО «Коннектор Оптикс». Отзыв содержит **замечания**:

1) В работе детально исследованы гетероструктуры с квантовыми яма-точками в системе материалов InGaAs/GaAs, работающие в ближнем инфракрасном диапазоне (900-1100нм). В связи с этим возникает вопрос о масштабируемости данных структур в более длинноволновую спектральную область. Насколько универсальным является механизм формирования таких КЯТ на вицинальных подложках для других систем материалов, в частности, для структур InGaAsP/InP, востребованных в телекоммуникационном диапазоне ~1,55 мкм?

2) В обосновании актуальности темы автор упоминает востребованность ближнего ИК-диапазона для оптических интегральных схем (ИС). Как автор оценивает перспективы монолитной интеграции лазеров и фотодетекторов на основе КЯТ на одном кристалле для создания фотонных ИС?

3) Для расчета энергий оптических переходов в работе применена модель симметричной квантовой ямы с эффективными значениями толщины и содержания индия. Поскольку в автореферате отсутствуют данные прямой визуализации поперечного среза

(например, методом ПЭМ), возникает вопрос: как соотносится используемая в модели эффективная толщина квантовой ямы с реальным физическим профилем КЯТ.

3. Фирсов Дмитрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы института электроники и телекоммуникаций, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Отзыв содержит **замечание**:

1) В спектрах фоточувствительности исследуемых структур с квантовыми яма-точками присутствуют две перекрывающиеся спектральные особенности, связанные, по-видимому, с переходами с участием тяжелых и легких дырок. Из текста автореферата неясно, проводилось ли разложение спектров на два соответствующих контура при анализе степени поляризационной зависимости фоточувствительности.

4. Вознюк Глеб Валерьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. Отзыв содержит **замечание**:

1) Автор обоснованно отмечает высокую практическую значимость создания действующих прототипов волноводных фотодиодов в спектральном диапазоне 870–1100 нм. Было бы полезно уточнить, проводилась ли оценка их быстродействия.

Во всех полученных отзывах отмечается актуальность диссертационного исследования, новизна, теоретическая и практическая значимость полученных соискателем результатов. Авторы отзывов указывают, что приведенные ими замечания не являются принципиальными и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы, а соискатель, Харченко Антон Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана концепция разделения величины модального усиления или поглощения волноводных гетероструктур с квантоворазмерной активной областью на вклады, обусловленные влиянием конструкции волновода (эффективная ширина моды) и оптического усиления слоя активной области;

введен новый параметр – показатель усиления слоя dG (произведение материального усиления среды G на толщину среды d), позволяющий количественно охарактеризовать поглощение и усиление света одного слоя активной области волноводной гетероструктуры;

предложено использование модели однородной квантовой ямы InGaAs/GaAs с эффективными значениями толщины и содержания индия для расчёта энергий оптических переходов в волноводных гетероструктурах AlGaAs/GaAs с активной областью на основе квантовых яма-точек (КЯТ) InGaAs/GaAs;

доказана возможность создания волноводных фотодиодов с активной областью на основе КЯТ с различной поляризационной чувствительностью на основном оптическом переходе;

доказана перспективность применения КЯТ InGaAs/GaAs в мощных торцевых лазерах, демонстрирующих генерацию на основном оптическом переходе в условиях электрической накачки (50 кА/см^2) и высоких внешних потерь (60 см^{-1}), при которых не возникает нежелательное переключение на коротковолновый оптический переход.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использован комплекс экспериментальных методик, включающий спектроскопию фоточувствительности с

поляризационным разрешением, спектроскопию электролюминесценции в широком диапазоне температур и токов накачки, а также метод измерения диаграмм направленности излучения для анализа модового состава излучения волноводных гетероструктур.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

развиты существующие аналитические методы, используемые при проектировании полупроводниковых лазеров и исследовании поглощения света в гетероструктурах, позволяющие корректно сопоставлять оптическое усиление наноструктур различной размерности (квантовых ям, квантовых точек и квантовых яма-точек) независимо от геометрии волновода;

доказано, что основной оптический переход в КЯТ происходит между уровнями размерного квантования электронов и тяжёлых дырок, а коротковолновый переход – между уровнями электронов и лёгких дырок, что закладывает основу для дальнейшего теоретического моделирования энергетического спектра и оптических свойств КЯТ.

раскрыта роль активной области на основе КЯТ в возникновении поляризационной анизотропии фоточувствительности волноводных фотодиодов;

получены результаты численного моделирования взаимодействия излучения с КЯТ InGaAs/GaAs с помощью различных физических механизмов, приводящих к уменьшению чувствительности фотодиодов к поляризации излучения с увеличением произведения длины волновода AlGaAs/GaAs и числа слоёв КЯТ;

изучена взаимосвязь между конструкцией волновода торцевого лазера с КЯТ и возникновением лазерной генерации на коротковолновом переходе.

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

разработаны и внедрены в практику научно-исследовательских работ лабораторий СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова и ФТИ им. А.Ф. Иоффе методика определения спектра модального поглощения и насыщенного усиления волноводных гетероструктур и методика сопоставления оптического усиления наноструктур различного типа (квантовые ямы, квантовые точки, квантовые яма-точки) в различных волноводах;

определено, что волноводные гетероструктуры с КЯТ InGaAs/GaAs обладают примерно на порядок большим насыщенным модальным усилением на длине волны основного оптического перехода, чем сопоставимые структуры с КТ InAs/GaAs, выращенными по механизму Странского-Крастанова, что демонстрирует перспективность КЯТ как активной области мощных лазерных диодов и оптических усилителей;

созданы прототипы волноводных фотодиодов с активной областью на основе КЯТ InGaAs/GaAs, работающие в спектральном диапазоне 870-1100 нм, с различной поляризационной анизотропией фоточувствительности в спектральном диапазоне 1000-1100 нм, а также торцевые лазеры на основе КЯТ, демонстрирующие стабильную лазерную генерацию на основном оптическом переходе при высоких плотностях тока накачки (до 48 кА/см²);

представлена зависимость степени поляризационной анизотропии фоточувствительности волноводных фотодиодов с КЯТ от произведения длины волновода и числа слоёв КЯТ, что позволяет проектировать фотодиоды с заданной чувствительностью к поляризации излучения;

определены условия возникновения лазерной генерации на коротковолновом оптическом переходе в торцевых лазерах с активной областью на основе КЯТ.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

экспериментальные исследования проводились на высокоточном современном лабораторном оборудовании;

использованы надежные экспериментальные методики для регистрации спектров фоточувствительности;

установлена воспроизводимость результатов исследования спектров фоточувствительности гетероструктур с КЯТ на большой выборке образцов;

использованы достоверные и исчерпывающие литературные данные о максимально достигнутом и насыщенном значении модального усиления в структурах с квантовыми ямами и квантовыми точками;

теоретические расчеты энергий оптических переходов в КЯТ **построены** на известных, проверяемых данных и принципах, и находятся в хорошем согласии с экспериментальными значениями;

идея интерпретации оптических переходов в КЯТ по аналогии с КЯ **базируется** на экспериментально установленном сходстве спектров фоточувствительности волноводных гетероструктур с КЯ и КЯТ;

использовано сопоставление характеристик волноводных гетероструктур на основе КЯТ со сравнимыми референсными структурами на основе КЯ и КТ для выявления сходства и различий этих типов активной области;

установлено количественное соответствие литературных и полученных автором величин модального усиления в гетероструктурах с квантовыми точками InAs/GaAs.

Личный вклад соискателя состоит в участии во всех этапах процесса диссертационного исследования от постановки задач до интерпретации результатов. Все основные результаты диссертационной работы получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. В частности, соискатель самостоятельно проводил измерения спектров фоточувствительности волноводных фотодиодов (в том числе с поляризационным разрешением), спектров электролюминесценции лазерных диодов, диаграмм направленности излучения лазеров, а также лично занимался моделированием и интерпретацией данных. Соискатель участвовал в подготовке научных публикаций по теме диссертации и выступал с докладами на российских и международных конференциях.

На заседании 10 сентября 2026 года диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития физики полупроводников и оптоэлектроники, а именно: определение оптических и оптоэлектронных свойств квантовых яма-точек InGaAs и разработку методов их характеристики присудить Харченко Антону Александровичу ученую степень кандидата наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 4 докторов наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» – 12, «против» – 0, «не голосовали» – 0.

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

Гудовских Александр Сергеевич

Ученый секретарь
диссертационного совета АУ.02.01,
к.ф.-м.н.

Шубина Ксения Юрьевна

10 сентября 2026 г.