

В диссертационный совет АУ 02.01 на базе
федерального государственного бюджетного
учреждения высшего образования и науки
«Санкт-Петербургский национальный
исследовательский Академический
университет им. Ж.И. Алфёрова РАН»

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Харченко Антона Александровича на тему
«Оптическое поглощение и излучение в волноводных гетероструктурах
GaAs/AlGaAs с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs» по
специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Актуальность диссертационной работы

Наноразмерные гетероструктуры, такие как квантовые ямы (КЯ) InGaAs/GaAs и квантовые точки (КТ) InAs/GaAs, в настоящее время широко применяются в качестве активной области оптоэлектронных приборов: лазеров, светодиодов, полупроводниковых оптических усилителей, фотоприемников и солнечных элементов. В частности, волноводные фотодиоды на основе КЯ и КТ обладают повышенным быстродействием и меньшим размером по сравнению с традиционными фотодиодами из объемных материалов, что делает их перспективными для применения в фотонных интегральных схемах. Однако волноводные фотодиоды с активной областью на основе КТ обладают низким оптическим поглощением, а приборы с КЯ – высокой чувствительностью к поляризации падающего излучения. Использование квантовых ям и квантовых точек в лазерных диодах, помимо неоспоримых преимуществ, также сопровождается и некоторыми ограничениями. В частности, приборы на основе КТ обладают высоким быстродействием, но низкой мощностью и подвержены нежелательным эффектам переключения режима генерации между возбужденными энергетическими уровнями при насыщении оптического усиления на основном состоянии. Использование квантовых ям позволяет значительно повысить мощность излучения лазеров, однако рост наноразмерных слоёв InGaAs на GaAs сопровождается накоплением упругих напряжений, что ограничивает как максимальную долю индия, так и максимальное количество слоёв, усложняя освоение диапазона с длинами волн более 1000 нм.

Данная диссертационная работа посвящена исследованию волноводных фотодиодов и лазерных диодов с активной областью гибридного (КЯ/КТ) типа – квантовые яма-точки $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}/\text{GaAs}$ (КЯТ), сочетающей в себе преимущества КТ и КЯ, такие как возможность роста многослойных структур без образования дислокаций и высокое модальное усиление. В связи с этим диссертационная работа, в которой решалась задача экспериментального определения оптических свойств КЯТ и выполнялось сопоставление их характеристик с КЯ и КТ, несомненно, является актуальной.

Содержание диссертационной работы

Диссертация изложена на 127 страницах, состоит из 4 глав, содержит 44 рисунка и 139 библиографических ссылок.

Новизна полученных результатов

Выбор объекта исследования – волноводного фотодиода – представляется удачной находкой диссертанта. Это позволило изучить практически на одном образце как излучательные, так и фоточувствительные характеристики структур с квантовыми яма-точками.

Интересным и оригинальным представляется подход, развитый автором диссертационной работы при создании методики сравнения усиления гетероструктур с квантовыми яма-точками. Дело в том, что в КЯТ толщина активного слоя неизвестна или ее трудно определить. Поэтому для расчёта материального усиления предложено использовать так называемый виртуальный слой, определённым образом коррелирующий с размером оптической моды. Конечно, данный подход не является достаточно точным и вызывает вопросы, однако он может быть эффективно применен к таким квантово-размерным активным областям с неопределённой толщиной.

Впервые была продемонстрирована применимость модели однородной симметричной квантовой ямы с эффективными параметрами толщины и содержания индия для расчёта энергий оптических переходов в КЯТ.

В диссертационной работе впервые проведено систематическое экспериментальное исследование спектров фоточувствительности волноводных фотодиодов с активной областью на основе квантовых яма-точек. Определен коэффициент модального поглощения и выявлены особенности чувствительности данных структур к поляризации падающего излучения.

Впервые автором произведена количественная оценка модального поглощения и насыщенного модального усиления на один слой в КЯТ в сравнении

с КТ в сопоставимых волноводных структурах. Показано превосходство структур с КЯТ с точки зрения данных параметров.

Степень обоснованности и достоверность полученных результатов

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается значительным объемом проведенных экспериментальных исследований, сопровождающимся хорошей воспроизводимостью на большой выборке образцов. Корректная обработка полученных экспериментальных данных (нормировка спектров фоточувствительности на GaAs, вычисление показателя усиления слоя) подтверждает высокую степень обоснованности сделанных выводов. Все основные результаты были опубликованы в рецензируемых научных изданиях и прошли апробацию на профильных конференциях.

Значимость полученных результатов для науки и производства

Экспериментально доказанное качественное сходство спектров фоточувствительности волноводных структур с КЯ и КЯТ позволяет частично снять неопределенность в особенностях зонной структуры последних и открывает путь к их дальнейшему теоретическому описанию на основе сопоставимой модели КЯ.

Выявленный способ снижения чувствительности к поляризации излучения для волноводных фотодиодов с КЯТ демонстрирует перспективу их использования в системах оптической связи с поляризационным уплотнением.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования научными коллективами, которые занимаются разработкой и исследованиями компонентов фотонных интегральных схем на основе арсенида галлия для спектрального диапазона 1000–1100 нм. Данный спектральный диапазон в последнее время демонстрирует востребованность в авиационных и космических лидарах, приборах оптической когерентной томографии, системах оптической передачи данных и т.д.

Замечания по диссертационной работе

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 фотолюминесценции.

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/Γ . 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, введен 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.».

Вышеперечисленные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Харченко Антона Александровича «Оптическое поглощение и излучение в волноводных гетероструктурах GaAs/AlGaAs с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs» 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.

Даю согласие на обработку моих персональных данных.

Официальный оппонент

профессор, доктор физико-математических наук, профессор кафедры Микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

«27» июля 2026 г.

Зубков Василий Иванович

Контактные данные оппонента:

Место работы: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), факультет электроники, кафедра микро- и наноэлектроники, профессор каф. Микро- и наноэлектроники.

Фактический адрес: 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5 литера Ф.

Почтовый адрес: 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5 литера Ф.

Телефон: +7(812) 234-31-36.

e-mail: vzubkovspb@mail.ru