

«УТВЕРЖДАЮ»
и.о. директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Научно-технологического центра
микроэлектроники и субмикронных
гетероструктур Российской академии наук
(НТЦ микроэлектроники РАН)

д.ф.-м.н. А.Ф. Цацульников
«24.11» 2026г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Харченко Антона Александровича «Оптическое поглощение и излучение в волноводных гетероструктурах GaAs/AlGaAs с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников.

Актуальность темы диссертации

Современные оптоэлектронные устройства ближнего ИК-диапазона часто строятся на базе низкоразмерных гетероструктур в системе материалов InAlGaAs. В качестве активных областей в таких приборах традиционно используют множественные квантовые ямы (КЯ) InGaAs, разделенные барьерами (Al)GaAs, или квантовые точки (КТ) на основе InGaAs/GaAs. Структуры с активной областью на основе КЯ способны обеспечивать значительное оптическое усиление, но реализация многослойных структур ограничена механическими напряжениями, приводящими к образованию дислокаций плотностью $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$, снижающих характеристики приборов. По сравнению с КЯ, гетероструктуры с КТ в активной области отличаются большей температурной стабильностью благодаря глубоким центрам локализации носителей заряда (на порядок выше КТ) и малой плотностью порогового тока в лазерах, достигающей 10 А/см^2 , однако низкая поверхностная плотность формирующихся островков InGaAs ограничивает величину максимального оптического усиления.

Одним из подходов для преодоления данных ограничений является создание гибридных наноструктур, сочетающих в себе свойства КЯ и КТ, которые формируются при осаждении нескольких $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ монослоев на ступенчатых поверхностях слоя GaAs в процессе роста методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ). Образование квантовых яма-точек

(КЯТ) происходит благодаря эшелонированию атомных ступеней при росте на разориентированных на 6° в направлении [111] подложках GaAs (100) и миграции атомов индия к краям этих ступеней, что способствует релаксации упругих напряжений и позволяет избежать возникновения дислокаций. В результате, такие КЯТ представляют собой квазипериодические области с повышенным (более 40 %) содержанием индия, которые находятся внутри остаточной обеднённой индием InGaAs квантовой ямы.

Фотодиоды (ФД), фотодиодные матрицы и твердотельные фотодетекторы работающие в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах создаются, как на основе элементарных полупроводниковых материалов (Si или Ge), так и на основе ряда полупроводниковых соединений и их твердых растворов: GeSi, InAs, GaAs, InSb, CdHgTe и др. Технология производства ИК p-n ФД на основе Si и Ge наиболее развита, но кремниевые фотодиоды демонстрируют невысокую чувствительность и низкое быстродействие, германиевые ФД обладают значительным темновым током и высоким уровнем шума. Добавление тонкого эпитаксиального слоя Ge или использование сплава GeSi для создания гибридного GeSi ФД позволяет повысить быстродействие и чувствительность в определенных участках спектра, но высокая плотность дефектов, возникающих из-за рассогласования кристаллических решеток Si и Ge, приводит к высокому темновому току. Фотодиоды на основе соединений InSb и CdHgTe обладают высокой чувствительностью потенциально во всем инфракрасном диапазоне (от 1 до 30 мкм), но для работы требуют низких криогенных температур (77 К и ниже) для подавления теплового шума, что в свою очередь снижает их стабильность.

Благодаря прямозонной зонной структуре полупроводниковых соединений GaAs и InAs и развитой технологии синтеза гетероструктур на основе системы материалов InGaAlAs продемонстрированы эффективные ИК полосковые и микродисковые лазеры, фотодиоды и солнечные элементы с активной областью на основе КЯТ. Использование гибридных низкоразмерных структур квантовых яма-точек в активной области лазерных p-i-n гетероструктур InGaAs/GaAs/AlGaAs в отсутствии накачки при вводе внешнего излучения с торца позволяет реализовать волноводные фотодиоды в диапазоне от видимого до длины волны 1,1 мкм быстродействием до 5 ГГц, подходящие для интеграции в комплексные оптоволоконные системы. Однако до настоящего времени в силу новизны и трудностей численного моделирования остаются недостаточно изученными типы межзонных оптических переходов в InGaAs/GaAs КЯТ, условия стабильной лазерной генерации и величина предельного модального усиления в лазерных гетероструктурах GaAs/AlGaAs и влияние параметров на степень анизотропии поляризационных характеристик волноводных p-i-n фотодиодов с активной областью на основе КЯТ.

В диссертационной работе Харченко А.А. была проведена серия экспериментальных исследований волноводных гетероструктур с активной областью на основе квантовых яма-точек. Проведено сравнение активных областей приборных структур на основе InGaAs/GaAs КЯ, InAs/GaAs КТ и низкоразмерных гетероструктур InGaAs/GaAs гибридного типа. Дан обзор

методов измерения оптического поглощения и усиления для корректного определения насыщенного усиления через поглощение в отсутствие накачки. Получена оценка максимального коэффициента усиления слоя $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ КЯТ и выполнено сравнение данного параметра с эталонными КТ с учетом вклада активной области и волновода. Исследована поляризационная зависимость фоточувствительности волноводных фотодиодов и установлена природа основного и возбуждённого оптических переходов в структурах $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}/\text{GaAs}$ КЯТ. Рассмотрены механизмы возникновения двухуровневой генерации в торцевых лазерах с активной областью на основе $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ КЯ и InAs/GaAs КЯТ, связанные с увеличением внешних оптических потерь и повышением тока накачки, и определены условия переключения длины волны лазерной генерации в лазерных структурах с КЯТ. Полученные результаты расширяют понимание физики неоднородных квантово-размерных систем и создают основу для инженерного проектирования оптоэлектронных приборов на их основе.

Таким образом, тема диссертационной работы Харченко А.А. является **актуальной**, а решаемые в её рамках задачи обладают, как научной значимостью для развития физики полупроводниковых наногетероструктур, так и прикладным значением для создания активных областей оптоэлектронных приборов на основе гибридных квантово-размерных гетероструктур в системе материалов InGaAlAs .

Основные научные результаты

Наиболее важные результаты, полученные автором, заключаются в следующем:

1. Предложен способ отдельного учёта вклада геометрии волновода $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ и свойств активной области $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ в модальное усиление (поглощение) без точного вычисления Г-фактора. Метод особенно эффективен для гетероструктур, обладающих неоднородностями по толщине и составу, где расчёты Г-фактора затруднены.
2. Выполнено прямое экспериментальное сравнение КЯТ $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ и самоорганизованных по механизму Странского-Крастанова КТ InAs/GaAs по максимальному значению оптического усиления, на основе которого показано, что КЯТ обеспечивают на порядок большее значение максимального модального усиления в сопоставимых по эффективной ширине оптической моды волноводных структурах.
3. Из исследования зависимости фоточувствительности волноводных гетероструктур с КЯТ от поляризации падающего излучения установлена схожесть КЯТ и эталонных однородных $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ квантовых ям по природе межзонных оптических переходов с участием тяжелых и лёгких дырок.
4. Обнаружено, что в волноводных фотодиодах с КЯТ чувствительность к поляризации монотонно ослабевает при увеличении произведения длины волновода и/или количества слоёв КЯТ.
5. Показано, что в торцевых лазерах с КЯТ $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ генерация на основном оптическом переходе (около 1050 нм) сохраняется вплоть до переключения на генерацию из волноводного слоя GaAs , как при увеличении внешних оптических потерь, так и с ростом плотности тока накачки до 48 кА/см^2 , тогда

как в аналогичных приборах на КЯ наблюдается переключение на коротковолновый межзонный оптический переход (930 нм).

6. Установлено, что двухчастотная генерация (на основном и более коротковолновом оптических переходах) в лазерах с КЯТ возможна при использовании вертикально расширенных (до 780 нм) волноводов и связана с возбуждением волноводных оптических мод высших порядков.

Научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов

Научная новизна:

1. Впервые для p-i-n структур GaAs/AlGaAs с одним слоем КЯТ InGaAs/GaAs проведена оценка модального поглощения.
2. Впервые произведено сопоставление КЯТ и КТ по величине максимального коэффициента усиления на слой, который был получен на основе измерений модального поглощения в отсутствие электрической накачки и отдельного учета вклада активной области и геометрии волновода в значение модального поглощения и усиления.
3. Для волноводных фотодиодов на основе лазерных гетероструктур с InGaAs/GaAs КЯТ впервые исследована чувствительность к поляризации падающего излучения в зависимости от длины волновода и количества слоёв активной области.
4. Впервые определены типы межзонных оптических переходов в КЯТ на основе исследования поляризационной анизотропии спектров фоточувствительности.
5. Рассмотрены лазерные гетероструктуры с КЯТ с широким и узким волноводом GaAs/AlGaAs и впервые определены условия двухуровневой генерации и переключения лазерной генерации на коротковолновый оптический переход.

Теоретическая значимость

Определены энергии оптических переходов в структурах с InGaAs/GaAs КЯТ с использованием модели симметричной квантовой ямы InGaAs/GaAs с учётом флуктуаций толщины и содержания индия в КЯТ. С использованием математического аппарата матриц Мюллера рассмотрены механизмы взаимодействия поляризованного излучения с активной областью на основе InGaAs/GaAs КЯТ, которые могут приводить к наблюдаемому в эксперименте спаду поляризационной чувствительности волноводных фотодиодов с увеличением длины волновода и количества слоёв КЯТ.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что:

1. Предложен подход для нахождения показателя, характеризующего усиление одного слоя, как произведения материального усиления на толщину слоя, который позволяет проводить сравнительный анализ усиления и поглощения волноводных оптоэлектронных приборов с активной областью на основе различных типов низкоразмерных гетероструктур, не требующий сложного численного расчёта Г-фактора при проектировании волноводных структур.

2. Проведено сравнение и экспериментально подтверждено превосходство волноводных гетероструктур с КЯТ над структурами с InAs КТ в активной области с сопоставимым волноводом GaAs по величине модального поглощения и максимального модального усиления на один слой, которое подтверждает возможность использования КЯТ в качестве активной области твердотельных приборов с высокой выходной мощностью (лазеры с торцевым выводом излучения, суперлюминесцентные диоды) и высокочувствительных фотоэлектрических преобразователей.
3. Обнаружена чувствительность волноводных фотодиодов к поляризации вводимого излучения в зависимости от геометрических параметров прибора, что открывает возможность целенаправленного управления степенью поляризационной анизотропии ФД и создания гетероструктур, нечувствительных к состоянию поляризации входного сигнала посредством подбора длины GaAs волновода и количества низкоразмерных $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ слоёв в активной области.
4. Продемонстрированная стабильная работа лазерных диодов на основном оптическом переходе, как при экстремальных значениях тока накачки (до 48 кА/см^2), так и при увеличении внешних оптических потерь путём уменьшения длины резонатора, подтверждает возможность реализации мощных полупроводниковых лазеров с активной областью на основе $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As/GaAs}$ КЯТ.

Достоверность, надежность результатов и выводов

Достоверность и надёжность результатов, представленных в диссертационной работе, обеспечивается применением взаимодополняющих экспериментальных подходов, детальной проработкой условий измерений и согласованностью данных, полученных независимыми способами. Исследуемые гетероструктуры выращивались методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на установке Aixtron AIX200. Экспериментальные исследования спектров фоточувствительности, электролюминесценции и лазерной генерации проводились на современном оборудовании известных мировых производителей с использованием методики синхронного детектирования, что позволило снизить влияние шумов и паразитных сигналов. Воспроизводимость данных подтверждается многочисленными измерениями на большой выборке образцов, как с различными геометрическими параметрами, так и количеством InGaAs слоёв в InGaAs/GaAs активной области. Экспериментальные результаты согласуются с расчётными данными, полученными в рамках принятых теоретических моделей, а также с опубликованными сведениями по оптическим характеристикам низкоразмерных гетероструктур системы материалов InGaAs/GaAs. Основные положения диссертации имеют логическое обоснование и сопровождаются оценками точности измерений. Результаты работы опубликованы в авторитетных реферируемых журналах и докладывались на всероссийских конференциях с международным участием.

Результаты работы могут быть рекомендованы для внедрения в исследовательскую и производственную практику профильных научных центров и производственных объединений, занимающихся разработкой и производством широкого спектра оптоэлектронных приборов ближнего ИК-диапазона, включая инжекционные лазеры, полупроводниковые оптические усилители, суперлюминесцентные диоды, сверхчувствительные детекторы и волноводные фотоприемники. Предложенные в работе методы и решения, а также полученные результаты по реализации эпитаксиальных гетероструктур с активной областью на основе InGaAs/GaAs КЯТ могут быть использованы для практической реализации в учреждениях Российской Академии Наук и на предприятиях электронной промышленности, специализирующихся на проектировании и создании широкого спектра перспективных высокоэффективных устройств для современной интегральной нанофотоники, в том числе в ФТИ им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), НТЦ микроэлектроники РАН (г. Санкт-Петербург), «ФТИ-Оптроник» (г. Санкт-Петербург), АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха» (г. Москва), НИУ ВШЭ - Санкт-Петербург (г. Санкт-Петербург), НПО «Орион» (г. Москва).

Личный вклад автора в получение научных результатов.

Харченко А. А. проводил экспериментальные исследования оптических и оптоэлектронных характеристик волноводных InGaAs/GaAs гетероструктур на основе квантовых яма-точек. В диссертации изложены результаты, которые были получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Харченко А. А. самостоятельно проводил численные вычисления, эксперименты, анализировал полученные результаты, и проводил сопоставление данных, полученных экспериментально, с результатами численного моделирования. Оценивая личный вклад соискателя, необходимо отметить внушительный объем выполненных им лично экспериментальных исследований. Автор продемонстрировал высокий уровень владения различными сложными методиками оптических измерений характеристик полупроводниковых лазерных гетероструктур. Автором решена задача прецизионного измерения спектров фоточувствительности и электролюминесценции в волноводной геометрии, а также детально исследованы поляризационные характеристики волноводных структур с InGaAs/GaAs КЯТ. Высокая степень вовлеченности на всех этапах выполнения работы подтверждается участием автора в представлении и обсуждении результатов диссертации на профильных научных конференциях. Исследования, выполненные Харченко А. А., были проведены на высоком научно-методическом уровне.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа Харченко А. А. оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ, изложена грамотным языком, содержит необходимые иллюстрации и таблицы. Материал работы представлен логично и последовательно. Диссертационная работа выполнена на актуальную тему,

связанную с экспериментальным и теоретическим исследованием волноводных гетероструктур с гибридной квантово-размерной активной областью. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях и прошли апробацию на профильных конференциях. В опубликованных статьях автора и автореферате в полной мере отражено содержание диссертации.

По результатам анализа и обсуждения диссертационной работы были сформулированы следующие **замечания**:

1. В работе проводится сопоставление значения насыщенного модального 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.

Указанные замечания по материалам диссертации Харченко А. А. не являются принципиальными, не затрагивают основные результаты и не снижают высокую оценку диссертации.

Заключение

Диссертация Харченко Антона Александровича «Оптическое поглощение и излучение в волноводных гетероструктурах GaAs/AlGaAs с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs» по содержанию и полученным результатам соответствует специальности 1.3.11 — «Физика полупроводников» и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему и содержащую решение важной научной задачи по сравнительному анализу оптических и оптоэлектронных свойств p-i-n-структур с активной областью на основе КЯТ и традиционных гетероструктур на основе InGaAs/GaAs квантовых ям и InAs/GaAs квантовых точек. Полученные результаты обладают научной новизной и практической ценностью, их достоверность не вызывает сомнений. В опубликованных статьях автора и автореферате в полной мере отражено содержание диссертации. По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению диссертационная работа соответствует критериям, установленным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения учёных степеней» (в действующей редакции).

Диссертационная 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.

Доклад по материалам диссертации Харченко Антона Александровича «Оптическое поглощение и излучение в волноводных гетероструктурах GaAs/AlGaAs с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs», был заслушан и получил положительную оценку на научном семинаре в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научно-технологическом центре микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук. Отзыв рассмотрен, обсужден и утвержден на этом же заседании, протокол № 2/26 от 3 июня 2026 года.

Отзыв составил:

Научный сотрудник, Лаборатория технологии наногетероструктур

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук

Кандидат физ.-мат. наук

_____ С.О. Усов

Электронная почта: s.usov@mail.ioffe.ru.

Тел.: +7 (812) 292-7132

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук (НТЦ микроэлектроники РАН),
Российская Федерация, 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул. 26, литер 3, каб. 608.

Тел. +7 (812) 297-4059,

Факс: +7 (812) 297-8640,

Сайт в информационно-телекоммуникационной сети "Интернет":

<http://www.ntcm-ras.ru>,

Электронная почта: info@ntcm-ras.ru.