

В диссертационный совет АУ 02.01,
созданный на базе федерального государственного
бюджетного учреждения высшего образования и
науки «Санкт-Петербургский национальный
исследовательский Академический университет
имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Доктора физико-математических наук,
профессора физического факультета Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Биленко Игоря Антоновича
на диссертационную работу Мельниченко Ивана Алексеевича на тему «Влияние
поверхностных явлений и динамики носителей заряда на характеристики
микродисковых лазеров с квантоворазмерной активной областью на основе
InGaAs/GaAs»
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников»

Развитие фотонных интегральных схем и систем оптической передачи данных на чипе требует создания компактных и энергоэффективных источников когерентного излучения. Одним из перспективных классов таких источников являются полупроводниковые микродисковые лазеры с модами шепчущей галереи (МШГ). Малые размеры, небольшой объем оптической моды и преимущественно латеральное распространение излучения делают их удобными для интеграции с планарными волноводами. Вместе с тем при существенном уменьшении размеров резонатора возрастает влияние боковой поверхности на все ключевые (спектральные, пороговые, мощностные и т.д.) характеристики лазера. Дефекты и поверхностные состояния на поверхности полупроводникового резонатора могут выступать центрами безызлучательной рекомбинации, изменять распределение носителей заряда в активной области и тем самым влиять на модовое усиление и порог лазерной генерации. Поэтому исследования поверхностных явлений в полупроводниковых микролазерах с МШГ являются актуальными для физики полупроводников. Особый интерес представляет использованная в работе активная область на основе квантовых яма-точек InGaAs/GaAs. Эти структуры сочетают высокую плотность излучателей и значительное оптическое усиление, характерное для квантовых ям, одновременно обеспечивая эффективную латеральную локализацию носителей заряда, свойственную квантовым точкам. Использование квантовых яма-точек представляется весьма перспективным для создания эффективных микролазеров ближнего инфракрасного диапазона, пригодных для

внедрения в фотонные интегральные схемы. В связи с этим высокой актуальностью как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения обладают затронутые в работе вопросы по динамике носителей заряда, их рекомбинации, латеральному транспорту и процессам захвата в квантовые точки.

Известно, что условия лазерной генерации могут быть выполнены для большого числа различных высокочастотных мод в дисковом резонаторе. Это открывает широкие перспективы для управления модовым составом лазера, т.е. характеристиками излучения. В связи с этим высокой актуальностью обладают выполненные исследования по определению ключевых факторов, определяющих модовый состав микродисковых лазеров.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Она изложена на 125 страницах, содержит 51 рисунок и 2 таблицы; список литературы включает 190 наименований. Основные результаты опубликованы в восьми научных статьях. Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложены основные сведения о полупроводниковых микрорезонаторах с МШГ и квантоворазмерной активной области для получения излучения в ближнем инфракрасном диапазоне. Рассмотрены поверхностная рекомбинация и методы пассивации боковой поверхности микроструктур.

Во второй главе описаны использованные методы формирования эпитаксиальных структур, мезоструктур и микродисковых лазеров, а также комплекс методов их оптической характеристики. Стационарная и время-разрешенная спектроскопия фотolumинесценции, спектроскопия электролюминесценции, ближнепольная оптическая спектроскопия обеспечили получение взаимодополняющих данных об исследуемых структурах. Приведены протоколы пассивации методами атомно-слоевого осаждения Al_2O_3 и формирования слоев SiO_2 золь-гель методом.

В третьей главе исследованы временные процессы, развивающиеся в одиночном слое квантовых яма-точек $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$, при импульсной накачке короткой длительности в зависимости от температуры. Определено, что время нарастания сигнала фотolumинесценции определяется совокупностью процессов диффузии, захвата и релаксации носителей заряда и при комнатной температуре составляет около 10 пикосекунд. В рамках двухуровневой модели определено время излучательной рекомбинации и оценены энергетические барьеры для электронов и дырок в квантовой яма-точке $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ — 50 мэВ и 150 мэВ соответственно. Температурная зависимость объяснена термическим выбросом носителей в матрицу и их повторным захватом.

Четвертая глава посвящена поверхностной рекомбинации, латеральному транспорту носителей и пассивации. Из совместного анализа размерных

зависимостей интенсивности и времени спада фотолюминесценции для мезоструктур с квантовыми яма-точками InGaAs/GaAs определены длина диффузии 1,3 мкм, коэффициент диффузии 3,7 см²/с, время жизни носителей в отсутствие поверхностной рекомбинации 4,6 нс и скорость поверхностной рекомбинации около $2,8 \times 10^4$ см/с. Влияние пассивации оказало наиболее выраженный эффект на интенсивность фотолюминесценции структур с квантовыми ямами. После пассивации золь-гель слоем SiO₂ интенсивность фотолюминесценции мезоструктур диаметром 1,25 мкм возросла до 50 раз. Для инжекционного микролазера диаметром 16 мкм получено снижение пороговой плотности тока с 45,8 до 20,1 кА/см².

В пятой главе рассмотрены факторы, определяющие радиальный порядок лазерной моды шепчущей галереи. Для малых радиальных порядков усиление снижается из-за приповерхностного обеднения носителями, тогда как для высоких порядков возрастают потери вследствие утекания поля в подложку GaAs. Выводы моделирования согласуются с полученными экспериментальными данными. Продемонстрирована возможность использования микродисковых лазеров с активной средой на основе квантовых точек в качестве рефрактометрических сенсоров с чувствительностью до 9,4 нм/RIU.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Диссертационная работа И.А. Мельниченко обладает целостностью и ясной внутренней логикой. Автор последовательно переходит от исследования динамики носителей в полупроводниковой эпитаксиальной структуре к количественной оценке поверхностной рекомбинации в микроструктурах, проверке способов подавления безизлучательной поверхностной рекомбинации и анализу влияния приповерхностного обеднения на характеристики излучения лазера.

Научная новизна диссертации определяется комплексным характером установленных закономерностей. Получены новые данные о временной динамике носителей заряда в квантовых яма-точках InGaAs/GaAs и предложен подход к определению параметров латерального транспорта и поверхностной рекомбинации. Существенное значение имеют сравнительные результаты по пассивации различных квантоворазмерных структур. Детально исследовано как уменьшение усиления в приповерхностной области и утеkanie поля в подложку влияет на радиальный порядок лазерной моды. В совокупности результаты расширяют представления о физических процессах в полупроводниковых микролазерах на основе GaAs.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечиваются корректной постановкой задач, применением современных взаимодополняющих методов и систематическим характером исследований. Полученные зависимости воспроизводимы, а выводы внутренне согласованы и подтверждаются

аналитическим и численным моделированием. Определенные параметры соответствуют известным физическим представлениям о переносе и рекомбинации носителей, а результаты анализа мод согласуются со спектральными и ближнепольными измерениями. Результаты опубликованы в рецензируемых изданиях и апробированы на профильных конференциях.

Практическая значимость работы состоит в разработке и апробации подходов к повышению эффективности микродисковых лазеров. Предложенный способ определения скорости поверхностной рекомбинации, длины диффузии и коэффициента диффузии носителей заряда по размерным зависимостям интенсивности и времени спада фотолюминесценции может быть использован для моделирования приборов на основе квантовых яма-точек InGaAs/GaAs и оценки безызлучательных потерь на латеральных стенках. Результаты пассивации золь-гель слоем SiO_2 и с помощью атомно-слоевого осаждения Al_2O_3 и закономерности выбора радиального порядка моды представляют интерес как возможный метод подавления таких потерь. Продемонстрирована также возможность создания компактных рефрактометрических сенсоров на основе микролазеров с оптической накачкой.

Результаты диссертации можно рекомендовать для использования научными группами, которые проводят разработку и исследование микролазеров, лазерных диодов, фотодетекторов, солнечных элементов, а также других оптоэлектронных приборов на основе GaAs. Расчеты величин скорости поверхностной рекомбинации, диффузионной длины и связанный с ними критический диаметр мезоструктур, характеризующий падение интенсивности фотолюминесценции на порядок, могут найти прямое применение в проектировании конструкций полупроводниковых миниатюрных приборов. Продемонстрированные в пятой главе результаты исследования рефрактометрических сенсоров могут быть использованы для дальнейшей разработки биосенсоров на их основе.

При общей высокой оценке диссертационной работы считаю необходимым отметить следующие замечания, требующие дополнительного обсуждения.

1. Учитывался ли наклон боковой стенки МДЛ в моделировании распределения лазерной 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. Как изменятся факторы, определяющие радиальный порядок лазерной МШГ, если активную область на основе КЯТ InGaAs/GaAs заменить квантовой ямой или квантовыми точками?

Перечисленные вопросы не затрагивают достоверность положений, выносимых на защиту, и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. В тексте встречаются отдельные стилистические неточности, однако они не препятствуют восприятию представленных результатов.

Диссертация Мельниченко Ивана Алексеевича «Влияние поверхностных явлений и динамики носителей заряда на характеристики микродисковых лазеров с квантоворазмерной активной областью на основе InGaAs/GaAs» является самостоятельной завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему. В ней изложены научно обоснованные и экспериментально подтвержденные результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью. По актуальности, научной новизне, степени обоснованности положений и выводов диссертация соответствует 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», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Мельниченко Иван Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников».

Официальный оппонент

д.ф.-м.н., профессор физического факультета
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова»

Биленко Игорь Антонович

«2» сентября 2026 г.

Место работы: ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, кафедра физики колебаний.

Адрес места работы: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, д. 1, стр. 2, физический факультет

Телефон: +7 (495) 939-40-34

Электронная почта: igorbilenko@phys.msu.ru

Подпись заверяю:

и.о. декана физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор

В.В. Белокуров