

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, начальника научно-производственного
комплекса АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стелмаха»

Ладугина Максима Анатольевича

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

Актуальность темы диссертации. В связи с ростом требований к скорости и энергоэффективности обработки и передачи информации актуальным становится разработка альтернативной традиционным электрическим межсоединениям технологии оптической передачи данных на плате. В качестве перспективных компактных источников когерентного излучения, которые могут быть совмещены с различными компонентами фотонной интегральной схемы, сейчас рассматриваются полупроводниковые микродисковые и микрокольцевые лазеры на основе GaAs. В таких лазерах генерация возникает на высокочастотных модах шепчущей галереи (МШГ), благодаря чему можно существенно уменьшить размер излучателя, энергопотребление и обеспечить высокую скорость переключений.

При уменьшении размеров таких полупроводниковых лазеров до нескольких единиц микрон, существенно возрастает влияние поверхностных эффектов на характеристики микродискового лазера (МДЛ). Поверхностные состояния и технологические дефекты, возникающие в процессе создания резонатора МДЛ, увеличивают скорость поверхностной безызлучательной рекомбинации, изменяют профиль пространственного распределения носителей заряда, что приводит к изменению модового состава излучения микролазера и

ухудшению пороговых характеристик. Поскольку поле МШГ сосредоточено преимущественно у периферии микролазера, то для МДЛ это влияние поверхности оказывается существенным. Рассмотренные в диссертационной работе вопросы влияния поверхности на характеристики МДЛ, а также поиск технологически приемлемых способов снижения потерь, вносимых поверхностью, являются актуальными задачами физики и технологии полупроводниковых микролазеров. В качестве активной области исследуемых микроструктур используются высокоплотные массивы InGaAs/GaAs квантовых точек (КТ), формируемые на разориентированных подложках GaAs (001) без реализации классического механизма Странски–Крастанова, называемые квантовыми яма-точками (КЯТ). МДЛ на основе КЯТ InGaAs/GaAs демонстрируют высокие значения выходной мощности и хорошую температурную стабильность характеристик. Несмотря на активное исследование и развитие технологии оптоэлектронных приборов на основе КЯТ InGaAs/GaAs, систематические исследования динамики время-разрешённой фотолюминесценции (ФЛ), включая времена захвата носителей на квантоворазмерные состояния КЯТ и времена спада интенсивности излучения в объёмных и мезоструктурах, практически отсутствуют. Научная новизна и актуальность работы сформированы выполненными в работе исследованиями физических свойств активной области МДЛ на основе КЯТ.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Работа изложена на 125 страницах, содержит 51 рисунок, 2 таблицы и библиографию из 190 наименований.

В работе исследована динамика носителей заряда в одиночном слое КЯТ InGaAs/GaAs в широком диапазоне температур. Определены характерные времена захвата и рекомбинации носителей заряда, а температурная зависимость кинетики описана двухуровневой моделью скоростных уравнений. Совместный анализ зависимостей интегральной интенсивности ФЛ и постоянной времени спада сигнала ФЛ от диаметра исследованных цилиндрических мезоструктур позволил определить такие важные параметры активной среды, как длина и коэффициент амбиполярной диффузии, время жизни носителей в отсутствие поверхностных потерь и скорость поверхностной рекомбинации.

Значительная часть работы посвящена исследованию пассивации боковой поверхности МДЛ слоями Al_2O_3 с помощью метода атомно-слоевого осаждения и слоями SiO_2 с помощью метода золь-гель. Показано, что применение различных методов пассивации поверхности позволяет эффективно снизить вклад поверхностной безызлучательной рекомбинации и существенно улучшить излучательные свойства мезоструктур и микролазеров на основе GaAs. Рассмотрена конкуренция факторов приповерхностного обеднения

материального усиления на периферии МДЛ и утечки поля МШГ в подложку, влияющих на радиальный порядок лазерной моды; результаты моделирования сопоставлены с результатами измерений ближнепольной оптической микроскопии. Следует отдельно отметить выполненную в работе демонстрацию высокой чувствительности спектральных характеристик МДЛ с активной областью на основе КТ InAs/InGaAs к изменению показателя преломления окружающей среды. Экспериментально показана возможность использования МДЛ для создания сенсоров, работающих в жидких средах.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в комплексном исследовании динамики носителей заряда и поверхностных процессов в полупроводниковых мезоструктурах и микродисковых лазерах. Впервые определены временные характеристики фотолюминесценции КЯТ InGaAs/GaAs в диапазоне 10–300 К и предложен аналитический подход к оценке параметров латеральной диффузии и поверхностной рекомбинации. Проведено сравнительное исследование пассивации структур с различными квантоворазмерными активными областями слоями Al_2O_3 и SiO_2 , включая золь-гель пассивацию микродисковых лазеров с квантовой ямой InGaAsN/GaAs. Установлено влияние приповерхностного обеднения носителей и утечки оптического поля в подложку на модовый состав лазерного излучения, экспериментально визуализированы распределения интенсивности мод шепчущей галереи и продемонстрирована возможность применения микродисковых лазеров в качестве рефрактометрических сенсоров.

Научная и практическая значимость. Научно-практическая значимость работы состоит в разработке и апробации методов количественной оценки поверхностной рекомбинации, диффузии носителей и связанных с ними потерь в полупроводниковых мезоструктурах. Показана эффективность золь-гель пассивации SiO_2 : для мезоструктур с КЯ InGaAs/GaAs достигнуто увеличение интегральной интенсивности ФЛ до 50 раз, а для микродисковых лазеров с КЯ InGaAsN/GaAs реализована генерация при комнатной температуре и более чем двукратное снижение порога при инжекционной накачке. Апробирована методика визуализации утечки оптического поля в подложку с помощью ближнепольной микроскопии и разработана модель выбора радиального порядка лазерной моды, учитывающая совместное влияние поверхностного обеднения носителей и утечки излучения. Установлено снижение чувствительности к поверхностной рекомбинации при переходе от квантовых ям к квантовым точкам, тогда как квантовые яма-точки занимают промежуточное положение. Кроме того, подтверждена возможность применения микродисковых лазеров в качестве компактных рефрактометрических сенсоров с чувствительностью до 9,4 нм/RIU.

Возможное использование результатов. Результаты могут быть использованы в научно-исследовательских организациях и на предприятиях оптоэлектронного профиля при разработке полупроводниковых лазеров диапазона 1,0–1,3 мкм, элементов фотонных интегральных схем и компактных оптических сенсоров. Представленная методика определения длины и коэффициента амбиполярной диффузии, времени жизни носителей в отсутствие поверхностных потерь и скорости поверхностной рекомбинации обладает универсальностью и может быть распространена на иные случаи.

Замечания и вопросы по диссертационной работе. Отмечая высокий научный уровень и практическую направленность исследования, считаю необходимым высказать 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 микролазеров – чтобы не путаться в определениях и потенциальных применениях подобных типов лазеров;

3. в обзоре литературы упоминается широкое развитие ВОЛС и телекоммуникационных технологий, а также применение ФИС с полупроводниковыми источниками излучения. Однако, среди используемых источников не упомянут самый распространенный в настоящее время, а именно торцевой РОС-лазер и его модификации (DFB, DBR, DML, EML);

4. в экспериментах по эпитаксиальному росту было бы полезно рассмотреть различные режимы получения гетероструктур с квантоворазмерными слоями, так как оптимизация данных режимов могла бы позволить снизить скорость поверхностной рекомбинации на гетерограницах СР, КЯ и/или 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 мезаструктуры с золь-гелем может вызвать проблемы с практическим применением данных МДЛ. Как вы оцениваете перспективность предложенных способов пассивации с точки зрения надежности?

Высказанные замечания не ставят под сомнение большой объем проделанного научного исследования и достоверность основных результатов, а также общей высокой оценки диссертационной работы.

Заключение. Диссертационная работа Мельниченко Ивана Алексеевича «Влияние поверхностных явлений и динамики носителей заряда на характеристики микродисковых лазеров с квантоворазмерной активной областью на основе InGaAs/GaAs» представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, в котором решена актуальная задача установления закономерностей влияния динамики носителей и поверхностных процессов на оптические и лазерные характеристики полупроводниковых микрорезонаторов. Полученные результаты обладают научной новизной, обоснованы совокупностью экспериментальных и расчётных данных и имеют значение для физики полупроводников и разработки микrolазеров.

По актуальности, научной новизне, степени обоснованности и достоверности положений и выводов, а также научной и практической значимости диссертация соответствует требованиям Положения о присуждении учёных 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 учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Мельниченко Иван Алексеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 Физика полупроводников.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
начальник научно-производственного комплекса
АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Ладугин
Максим Анатольевич

09 сентября 2026 г.

Место работы: АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Адрес места работы: 117342, г. Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1

Телефон: +7 495 333-33-25

Электронная почта: maximladugin@mail.ru

Подпись Ладугина М.А. заверяю

Ученый секретарь АО «НИИ «Полюс»

им. М.Ф. Стельмаха»,

кандидат физико-математических наук

/ Кротов Ю.А. /