

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

Политехническая ул., д. 26, литер 3, каб. 608
г. Санкт-Петербург, 194021
Телефон: (812) 297-40-59
Факс: (812) 297-86-40
E-mail: info@ntcm-ras.ru
www.ntcm-ras.ru

ОКПО 13186532, ОГРН 1037804013983,
ИНН/КПП 7802030940/780201001

«УТВЕРЖДАЮ»
И.о. директора

д.ф.-м.н. А.Ф. Цапульников

13 июля 2026 № 116 / 2
На _____
№ _____ от _____

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Мельниченко Ивана Алексеевича
«Влияние поверхностных явлений и динамики носителей заряда на характеристики
микродисковых лазеров с квантоворазмерной активной областью на основе
InGaAs/GaAs»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических
наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников

Актуальность темы диссертации

Актуальность диссертационной работы Мельниченко И. А. определяется необходимостью разработки компактных и энергоэффективных источников когерентного излучения для фотонных интегральных схем и систем оптической передачи данных на чипе. Микролазеры и микродисковые лазеры (МДЛ) с модами шепчущей галереи (МШГ) на основе прямозонных полупроводниковых соединений A^3B^5 являются одним из перспективных классов компактных источников излучения. Малые размеры, небольшой объём оптической моды и распространение излучения преимущественно в плоскости эпитаксиальных слоёв делают МДЛ подходящими для интеграции в комплексные оптоволоконные системы. При уменьшении размеров МДЛ существенно возрастает роль поверхностных явлений. Боковая поверхность резонатора, формируемая в процессе постростовой обработки, может содержать дефекты, возникающие при эпитаксиальном росте в системах материалов InAlGaAs и InAlGaAs, обладающих значительным рассогласованием постоянных решеток между бинарными соединениями, и поверхностные состояния, выступающие центрами безызлучательной рекомбинации носителей заряда. Одним из подходов к снижению скорости поверхностной рекомбинации является пассивация боковой поверхности широкозонными диэлектрическими слоями. Поэтому количественное определение скорости поверхностной рекомбинации и длины латеральной диффузии носителей заряда в структурах с InGaAs/GaAs слоями и поиск эффективных подходов снижения плотности поверхностных состояний за счет применения методов пассивации, не требующих длительного высокотемпературного или плазменного воздействия на структуру, является важной задачей.

Использование в активной области таких полупроводниковых приборов гибридных наноструктур квантовых ям-точек (КЯТ) InGaAs/GaAs, которые представляют собой квазипериодические области с повышенным (более 40 %) содержанием индия, находящиеся внутри остаточной обеднённой индием InGaAs квантовой ямы, открывает широкие

возможности для создания фотодетекторов, солнечных элементов и источников когерентного излучения, работающих в видимой и ближней инфракрасной (ИК) области. Вместе с тем, динамика носителей заряда, процессы их захвата, рекомбинации и латерального транспорта в таких структурах остаются все еще недостаточно изученными, что ограничивает возможности целенаправленного проектирования характеристик микролазеров на их основе.

Высокая концентрация электромагнитного поля МШГ вблизи боковой поверхности определяет перспективность применения МДЛ не только в качестве источников излучения, но и в качестве активных рефрактометрических и биохимических сенсоров, чувствительных к изменению показателя преломления окружающей среды, которое приводит к спектральному сдвигу лазерной линии излучения. Поскольку эффективность, как эванесцентной связи МДЛ с волноводом, так и взаимодействия лазерной моды с анализируемой средой непосредственно зависит от пространственной локализации и порядка генерируемой МШГ необходимо изучение влияния поверхностной рекомбинации и утекания электромагнитного поля в подложку на выбор лазерной МШГ для выявления условий, определяющих модовый состав излучения МДЛ.

Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной, а решаемые в её рамках задачи имеют важное прикладное значение для развития нанофотоники и оптоэлектроники и соответствуют основным тенденциям развития технологии полупроводниковых гетероструктур и приборов твердотельной электронной техники.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Работа изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок и 2 таблицы. Список литературы включает 190 наименований. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 научных статьях: 4 — в изданиях, включённых в перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки России, и 4 — в журналах, индексируемых в базах данных Scopus или Web of Science.

Во введении отражена актуальность темы диссертационной работы, показана степень разработанности темы, определены цель и решаемые задачи, изложены научная новизна, практическая значимость и достоверность результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой обзор литературы по теме диссертации, в которой рассмотрены физические принципы формирования и оптического ограничения МШГ, основные конструкции микродисковых и микрокольцевых резонаторов, способы их изготовления, а также особенности полупроводниковых микролазеров с оптической и электрической накачкой. Проведено сравнение оптического усиления, локализации носителей заряда, температурной стабильности и чувствительности к поверхностной рекомбинации, реализуемые в полупроводниковых МДЛ с различной активной областью, содержащей квантовые ямы (КЯ) InGaAs/GaAs и квантовые точки (КТ) InAs/InGaAs. Обоснована перспективность использования массивов гибридных низкоразмерных структур InGaAs/GaAs, которые обеспечивают высокий уровень оптического усиления с возможностью реализации лазерной генерации при комнатной и повышенных температурах. Рассмотрено влияние поверхностных состояний и дефектов боковых стенок на безызлучательную рекомбинацию в полупроводниковых КЯТ InGaAs/GaAs. Указана необходимость дальнейшей оптимизации InGaAs/GaAs активной области и разработки воспроизводимых методов пассивации поверхности и боковых граней таких микроструктур для снижения потерь и обеспечения стабильности характеристик микродисковых лазеров.

Во второй главе описаны экспериментальные методы, которые использовались для исследования оптических свойств полупроводниковых лазерных гетероструктур (ГС) на основе системы материалов InGaAsN, выращенных методами молекулярно-пучковой (МПЭ) и методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) на

подложках GaAs (100). Изложены общие принципы спектроскопии фото- (ФЛ) и электролюминесценции, приведены схематические изображения экспериментальных установок и дан обзор методик регистрации сигнала время-разрешенной ФЛ с помощью метода ап-конверсии с помощью модуля FOG-100 (CDP Systems) и сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) на установке NT-MDT Ntegra Spectra II. Рассмотрены методы формирования пассивирующих покрытий на поверхности InGaAs/GaAs МДЛ с помощью атомно-слоевого осаждения (АСО) слоя Al_2O_3 из газовой фазы на установке PICOSUN® R-200 Advanced и приведена схема синтеза золь-гель слоя SiO_2 на всей поверхности структуры, осуществляемого с помощью гидролиза и последующей поликонденсации тетраэтоксилана.

В третьей главе представлены результаты исследования динамики фотолюминесценции эпитаксиальной гетероструктуры с одиночным слоем КЯТ InGaAs/GaAs, выращенной методом МОГФЭ на вицинальной подложке GaAs (100). КЯТ были сформированы посредством осаждения слоя $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ толщиной 8 монослоёв в матрице GaAs. Исследования методом время-разрешённой спектроскопии фотолюминесценции с ап-конверсией проведены в диапазоне температур 10–300 К. Установлено, что захват фотоиндуцированных носителей заряда из матрицы GaAs происходит в состояния КЯТ, соответствующие оптическим переходам $e1\text{--}hh1$ и $e1\text{--}lh1$, а характерное время нарастания ФЛ при комнатной температуре составляет около 10 пс. Наблюдаемое на последующей стадии плато интенсивности ФЛ связано с заполнением доступных состояний КЯТ и обменом носителями заряда с матрицей GaAs. При комнатной температуре характерное время спада ФЛ основного перехода достигает около 4,5 нс, тогда как при температурах ниже 100 К оно уменьшается приблизительно до 0,7 нс. Температурная зависимость времени спада удовлетворительно описана двухуровневой моделью скоростных уравнений, согласно которой при низких температурах время спада определяется преимущественно излучательной рекомбинацией, а при повышении температуры возрастает вследствие термического выброса и повторного захвата носителей заряда. В результате моделирования определены время излучательной рекомбинации около 0,7 нс и энергетические барьеры для электронов и дырок, составляющие соответственно 50 и 150 мэВ.

В четвёртой главе выполнен экспериментальный и теоретический анализ влияния поверхностной безызлучательной рекомбинации и латерального транспорта носителей заряда на оптические свойства цилиндрических мезаструктур с активной областью на основе КЯТ InGaAs/GaAs. На основе совместного анализа размерных зависимостей интегральной интенсивности и времени спада ФЛ с использованием модели диффузии носителей заряда определены диффузионная длина $L_D = 1,3$ мкм, коэффициент амбиполярной диффузии $D = 3,7$ см²/с, скорость поверхностной рекомбинации $v_s = 2,8 \times 10^4$ см/с и время жизни носителей в отсутствие поверхностной рекомбинации $\tau_0 = 4,6$ нс. Показано, что уменьшение диаметра мезаструктур приводит к снижению интенсивности и времени спада ФЛ вследствие возрастания вклада безызлучательной рекомбинации на боковой поверхности.

В этой же главе исследовано влияние различных методов пассивации поверхности на оптические свойства мезаструктур и характеристики микродисковых лазеров. Рассмотрена пассивация мезаструктур с КЯ InGaAs/GaAs слоями Al_2O_3 , сформированными методом атомно-слоевого осаждения, а также золь-гель пассивация слоями SiO_2 толщиной около 10 нм для мезаструктур с КЯ InGaAs/GaAs, КЯТ InGaAs/GaAs и КТ InAs/InGaAs. Показано, что эффективность пассивации зависит от типа квантоворазмерной активной области и наиболее выражена для структур с КЯ. Для мезаструктур с КЯ InGaAs/GaAs диаметром 1,25 мкм зарегистрировано увеличение интегральной интенсивности ФЛ после золь-гель пассивации до 50 раз. Исследование МДЛ с активной областью на основе КЯ InGaAsN/GaAs показало существенное улучшение их характеристик после пассивации SiO_2 : для приборов с инжекционной накачкой во всём исследованном диапазоне диаметров наблюдалось снижение порогового тока и увеличение внешней дифференциальной эффективности; для

МДЛ диаметром 16 мкм плотность порогового тока снизилась более чем в два раза — с 45,8 до 20,1 кА/см².

В пятой главе экспериментально и теоретически исследованы факторы, определяющие азимутальный и радиальный порядок лазерных МШГ в МДЛ. Показано, что выбор радиального порядка лазерной МШГ определяется конкуренцией двух основных факторов. Поверхностная безызлучательная рекомбинация приводит к снижению концентрации носителей заряда в приповерхностной области и тем самым уменьшает модовое усиление для МШГ малых радиальных порядков, локализованных вблизи боковой поверхности резонатора. В то же время для МШГ высоких радиальных порядков возрастает утеkanie электромагнитного поля в подложку GaAs и соответствующие оптические потери. Численное моделирование показало существование промежуточного радиального порядка, для которого достигается максимальное модовое усиление. Полученные расчётные значения согласуются с экспериментальными оценками, выполненными по распределению интенсивности излучения и межмодовому расстоянию. Методом сканирующей ближнепольной оптической микроскопии экспериментально исследовано пространственное распределение излучения МШГ в подложке GaAs вблизи МДЛ диаметром 50 мкм, что подтвердило наличие утечки лазерной моды в подложку.

В заключительной части главы исследована возможность использования МДЛ с активной областью на основе КТ InAs/InGaAs в качестве рефрактометрических сенсоров. Показано, что электромагнитное поле МШГ имеет эванесцентно затухающую компоненту за пределами боковой поверхности резонатора, вследствие чего спектральное положение мод чувствительно к показателю преломления окружающей среды. Для МДЛ, помещённых в водные растворы NaCl и глюкозы различной концентрации, получена чувствительность в диапазоне 5,5–9,4 нм/RIU. Установлено, что различие значений чувствительности связано с радиальным порядком МШГ и степенью перекрытия её эванесцентного поля с окружающей средой.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов

Научная новизна:

1. Впервые для ГС, содержащих в активной области КЯТ InGaAs/GaAs, проведены исследования времен нарастания и спада ФЛ в диапазоне температур от 10 до 300 К с использованием ФЛ в непрерывном режиме и время-разрешённой спектроскопии ФЛ методом ап-конверсии.
2. Рассмотрены уравнения диффузии для описания изменения концентрации носителей в пределах объема мезоструктуры с учетом амбиполярной диффузии при постоянном и равномерном по площади уровне возбуждения, и впервые получено аналитическое выражение, определяющее скорости поверхностной рекомбинации на латеральных стенках мезоструктур.
3. Обнаружено увеличение времени жизни носителей заряда до 2 нс и увеличение интенсивности ФЛ более, чем в 8 раз для мезоструктур диаметром 19 мкм, пассивированных слоем Al₂O₃ за счет снижения плотности поверхностных состояний оборванных связей на поверхности латеральных стенок мезоструктур.
4. Использование золь-гель пассивации SiO₂, реализованная впервые для МДЛ с активной областью на основе КЯ InGaAsN/GaAs, позволила снизить порог лазерной генерации для МДЛ диаметром 16 мкм с инжекционной накачкой более чем в 2 раза.
5. Обнаружено, что при одинаковых условиях пассивации слоем SiO₂ наблюдаемое усиление сигнала ФЛ максимально для пассивированных мезоструктур с активной областью на основе с КЯ InGaAs/GaAs и практически отсутствует для структур с КТ InAs/GaAs вследствие ограничения транспорта носителей заряда в латеральной плоскости КТ.

6. Впервые продемонстрировано, что ограничение лазерной генерации МШГ связано с поверхностной рекомбинацией носителей с одной стороны и утеканием МШГ в подложку GaAs с другой.
7. Впервые экспериментально получены распределения интенсивности лазерной МШГ в подложке GaAs вблизи МДЛ диаметром 50 мкм с активной областью, содержащей пять слоев КЯТ InGaAs/GaAs, измеренные методом СБОМ.
8. Продemonстрирована чувствительность МДЛ с активной областью на основе массива КТ InAs/InGaAs к изменению показателя преломления окружающей среды на примере водных растворов NaCl (7 нм/RIU) и глюкозы C₆H₁₂O₆ (9 нм/RIU), заключающаяся в длинноволновом смещении резонанса МШГ при увеличении концентрации раствора.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты дополняют и расширяют устоявшуюся теорию, описывающую динамику носителей заряда, поверхностную рекомбинацию и оптические свойства МДЛ. Для анализа температурной зависимости время-разрешённой ФЛ гетероструктур с КЯТ InGaAs/GaAs была использована система скоростных уравнений, описывающая обмен носителями заряда между матрицей GaAs и квантоворазмерными состояниями КЯТ InGaAs/GaAs. Совместное рассмотрение экспериментальных данных и приближенных решений уравнений диффузии для описания характеристик латерального транспорта и скорости поверхностной рекомбинации позволило сформировать модельный подход для определения скорости поверхностной рекомбинации, длины и коэффициента амбиполярной диффузии носителей заряда в одиночном слое КЯТ InGaAs/GaAs активной области МДЛ. Численное моделирование пространственного распределения МШГ в МДЛ с учетом их утекания в подложку, которое проводилось с использованием метода конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics, позволило описать механизм, определяющий выбор радиального порядка лазерной МШГ в МДЛ.

Практическая значимость результатов диссертационной работы состоит в разработке и экспериментальной апробации подходов, направленных на повышение эффективности и расширение функциональных возможностей полупроводниковых микродисковых лазеров ближнего ИК диапазона на основе GaAs.

1. Изучена взаимосвязь динамики интенсивности сигнала ФЛ для излучательных переходов в слое КЯТ InGaAs/GaAs и матрице GaAs, и определены значения излучательного времени жизни и энергетических барьеров для электронов и дырок в КЯТ, которые подтверждают возможность применения гибридных низкоразмерных структур в активной области лазерных диодов с высокой выходной мощностью.
2. Проведена аппроксимация экспериментальных данных интегральной интенсивности и времени спада ФЛ для мезоструктур различного диаметра, а также получены значения скорости поверхностной рекомбинации, длины диффузии и коэффициента диффузии для структур с КЯТ InGaAs/GaAs.
3. Рассмотрено влияние пассивации слоем Al₂O₃ толщиной до 10 нм и слоем SiO₂ толщиной ~10 нм на время жизни носителей заряда и интенсивность ФЛ мезоструктур диаметром от 1,25 до 19 мкм, сформированных с использованием одинакового шаблона, с различным типом квантоворазмерной активной области на основе InGaAs/GaAs КЯ, InGaAs/GaAs КЯТ и сформированных на поверхности GaAs(100) по механизму Странского-Крастанова InAs/InGaAs КТ, соответственно.
4. Исследована эффективность покрытий слоями Al₂O₃, сформированными методом АСО, и слоями SiO₂, полученными золь-гель осаждением по методу Штобера.
5. Продemonстрировано стабильное усиление интегральной интенсивности сигнала ФЛ в 50 раз для пассивированных мезоструктур малого диаметра около 1,25 мкм с КЯ InGaAs/GaAs по сравнению с исходными гетероструктурами.

6. Показано, что использование золь-гель пассивации боковой поверхности МДЛ приводит к снижению порога лазерной генерации, появлению спектре ФЛ высокоинтенсивной лазерной линии МШГ при комнатной температуре и увеличению дифференциальной квантовой эффективности МДЛ, работающих при инжекционной накачке.
7. Продemonстрировано улучшение пороговых лазерных характеристик МДЛ с активной областью на основе 3 КЯ $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{N}_{0.02}\text{As}_{0.98}/\text{GaAs}$ после пассивации SiO_2 золь-гель слоем для всех рассмотренных диаметров МДЛ.
8. Расчет пространственного распределения электрического поля МШГ выполненный в квази-трехмерном случае показал, что порядок лазерной МШГ определяется совместным действием двух факторов: уменьшением концентрации носителей заряда в приповерхностной области вследствие влияния поверхностной рекомбинации, ограничивающим генерацию МШГ малых радиальных порядков, и увеличением оптических потерь вследствие утекания электромагнитного поля в подложку GaAs для МШГ более высоких радиальных порядков.
9. Получены экспериментальные распределения интенсивности лазерных МШГ в подложке GaAs рядом с МДЛ, и на МДЛ в области волноводного слоя с КЯТ $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$.
10. Продemonстрирована возможность использования массива МДЛ диаметром 7-10 мкм с активной областью на основе КТ $\text{InAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$, помещенного в прозрачную кювету из полидиметилсилаксана, в качестве компактных рефрактометрических сенсоров, работа которых основана на регистрации сдвига спектрального положения линии лазерной генерации $\sim 1,3$ мкм для определения изменения показателя преломления среды, окружающей МДЛ.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов обеспечивается корректной постановкой задач, применением комплекса современных взаимодополняющих аттестованных экспериментальных методик, большим количеством исследованных образцов. Полученные результаты экспериментов воспроизводимы, а основные выводы внутренне согласованы и подтверждаются результатами аналитического и численного моделирования с применением специализированных программных комплексов, а также известными представлениями о динамике носителей заряда, поверхностной рекомбинации и модах шепчущей галереи. Экспериментальная часть работы выполнена с использованием современного высококласного оборудования известных мировых производителей. Положения диссертации обоснованы. Результаты опубликованы в рецензируемых российских и международных научных изданиях и прошли апробацию на профильных всероссийских и международных конференциях.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты работы могут быть рекомендованы для внедрения в исследовательскую и опытно-конструкторскую практику профильных научных центров и предприятий, занимающихся разработкой оптоэлектронных приборов ближнего ИК-диапазона, фотонных интегральных схем и компактных рефрактометрических сенсоров. Предложенный метод определения параметров поверхностной рекомбинации и латеральной диффузии, технология золь-гель пассивации SiO_2 и установленные закономерности выбора радиального порядка МШГ лазерных гетероструктур могут использоваться при проектировании инжекционных микролазеров и других приборов с активной областью на основе квантоворазмерных гетероструктур $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$. Полученные результаты представляют интерес и могут быть использованы для практической реализации в учреждениях Российской Академии Наук и на предприятиях электронной промышленности, в том числе в ФТИ им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), НТЦ микроэлектроники РАН (г. Санкт-Петербург), АО «НИИ «Полус» им.

М.Ф. Стельмаха» (г. Москва), НПО «Орион» (г. Москва), ООО «Коннектор Оптикс» (г. Санкт-Петербург) и др.

Личный вклад автора в получение научных результатов

Диссертационная работа Мельниченко И. А. является обобщением научных результатов, полученных автором в период обучения в аспирантуре под руководством д.ф.-м.н. Крыжановской Натальи Владимировны. Автор принимал непосредственное участие в постановке целей и задач исследования, анализе научной литературы и планировании экспериментальной работы. Все основные экспериментальные измерения спектральных, мощностных, электролюминесцентных, время-разрешённых и ближнепольных характеристик исследуемых мезоструктур и МДЛ на основе InAlGaAsN были выполнены автором самостоятельно. Обработка экспериментальных данных, их анализ и интерпретация также проводились автором. Теоретический анализ полученных результатов, включая разработку моделей для описания динамики носителей заряда, поверхностной рекомбинации и факторов, определяющих порядок лазерной МШГ, был выполнен автором совместно с научным руководителем. Исследования, выполненные Мельниченко И. А., были проведены на высоком научно-методическом уровне.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа Мельниченко И. 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 способов снижения влияния безызлучательной рекомбинации на поверхности полупроводниковых InGaAs/GaAs гетероструктур на оптические свойства мезоструктур и условия лазерной генерации в МДЛ с МШГ на их основе. 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 не приведено сравнение величин полученного времени захвата носителей заряда для гетероструктур с квантовыми яма-точками InGaAs/GaAs с известными характерными значениями для структур с квантовыми ямами и квантовыми точками на основе InGaAs.
2. В работе отсутствует указание на иной возможный механизм влияния пассивирующего слоя SiO₂ на характеристики МДЛ, связанный с изменением показателя преломления на латеральных стенках лазерной структуры.
3. Следовало бы привести значения погрешности определения полученных значений для диффузионной длины, коэффициента диффузии и скорости поверхностной рекомбинации.

Указанные замечания по материалам диссертации Мельниченко И. А. не являются принципиальными, не затрагивают основные результаты и не снижают общую высокую оценку 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» является самостоятельной завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в

которой изложены научно обоснованные и экспериментально подтвержденные результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью. Диссертация оформлена в соответствии с установленными требованиями и написана ясным, доступным для понимания языком. По тематике и содержанию диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.3.11 – Физика полупроводников. Достоверность основных положений и выводов не вызывает сомнений. По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению диссертационная работа соответствует критериям, установленным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения ученых 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. Алферова Российской академии наук» с точки зрения актуальности, новизны и практической значимости полученных результатов, а ее автор, Мельниченко Иван Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Доклад по материалам диссертации Мельниченко И. А. «Влияние поверхностных явлений и динамики носителей заряда на характеристики микродисковых лазеров с квантоворазмерной активной областью на основе InGaAs/GaAs» был заслушан и получил положительную оценку. Отзыв рассмотрен, обсужден и утвержден на научном семинаре в НТИЦ микроэлектроники РАН, протокол № 4/26 от 9 июля 2026 года.

Отзыв составил:

Научный сотрудник, Лаборатория технологии наногетероструктур
НТИЦ микроэлектроники РАН

Кандидат физ.-мат. наук

Электронная почта: S.Usov@mail.ioffe.ru.

Тел.: +7 (812) 292-7132

_____ С.О. Усов

Подпись С.О. Усова удостоверено:

Старший инспектор по кадрам

_____ Т.Н. Гусева

Сведения о ведущей организации:

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