

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

# ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



имени

*П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

**Ф И А Н**

119991, Москва, ГСП-1

Ленинский проспект, 53, ФИАН

Телефоны: +7 (499) 135 14 29

+7 (499) 132 65 54

Телефакс: +7 (499) 135 78 80

E-mail: office@sci.lebedev.ru

www.lebedev.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

И. о. директора

Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки

Физического института им. П.Н. Лебедева

Российской академии наук (ФИАН)

Доктор физ.-мат. наук, профессор

В.А. Рябов

« 03 » октябрь 2022 г.

## О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу Морозова Сергея Вячеславовича

### **Стимулированное излучение в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe**

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Диссертационная работа С.В. Морозова посвящена решению ряда *актуальных* научных задач, направленных на использование квантово-размерных структур на основе соединений HgCdTe для реализации компактных источников стимулированного излучения среднего ИК диапазона

#### **Актуальность темы исследования.**

Проявляемый в последние годы интерес к структурам с квантовыми ямами на основе твердых растворов  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  обусловлен как прогрессом в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяющей получать структуры достаточно высокого качества, так и рядом особенностей их электронного спектра, таких, как состояние топологического изолятора, бесщелевая структура зон с линейным спектром и т.п. Возможность вариации ширины запрещенной зоны изменением состава  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  делает эти соединения

основным и широко применяемым материалом для детекторов и детектирующих матриц среднего ИК диапазона.

Достигнутый в последние годы прогресс в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур HgCdTe, обусловил интерес к структурам с квантовыми ямами HgCdTe с малой шириной запрещенной зоны, поскольку за счет изменения ширины и состава квантовых ям возможно в широких пределах управлять энергией межзонных переходов, делая её соответствующей энергии квантов излучения среднего и дальнего инфракрасного диапазонов. Дополнительным достоинством этой системы является еще и то обстоятельство, что фононные частоты в HgCdTe сдвинуты в низкочастотную область по сравнению с широко используемыми при разработке ИК лазеров соединениями  $A^3B^5$ .

Основной проблемой, требовавшей решения для продвижения межзонных лазеров в сторону длинных волн, была задача ослабления и подавления процессов безызлучательной, прежде всего Оже-рекомбинации, препятствовавших достижению нужной степени инверсной заселенности. В данной работе были проведены исследования физических основ этой задачи при разработке длинноволновых межзонных HgCdTe-лазеров и предложен метод подавления безызлучательной оже-рекомбинации за счет использования особенностей зонной структуры узких квантовых ям HgTe /Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te с малой шириной запрещенной зоны.

Диссертационная работа С.В.Морозова состоит из введения, 6 глав, выводов и списка использованных источников литературы, содержащей 201 наименование. Общий объем диссертации составляет 238 страниц, включая 9 таблиц и 58 рисунков. По теме диссертации имеется 43 публикации.

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования, изложены цели и задачи работы, методы исследования, показана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертация посвящена обзору литературы. В ней **приведена** информация о твердых растворах HgCdTe, их использовании для создания ИК фотоприемников, квантовых ямах HgTe/CdHgTe, их зонной структуре. Дан обзор работ по оптическим свойствам объемных твердых растворов HgCdTe и квантовых ям на их основе.

Во **второй главе** диссертации представлены результаты исследования межзонной фотопроводимости и фотолюминесценции объемных твердых растворов HgCdTe и магнитопоглощения в широком спектральном диапазоне, проведенных с целью изучения оптических свойств слоев HgCdTe, полученных методом низкотемпературной МЛЭ на полуизолирующих подложках GaAs.

**Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию оптических свойств гетероструктур с квантовыми ямами Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te/Cd<sub>y</sub>Hg<sub>1-y</sub>Te с помощью спектроскопии

фотопроводимости и фотолюминесценции в среднем и дальнем ИК диапазонах, частности, волноводных структур с массивами квантовых ям, помещенных внутри широкозонных слоев CdHgTe.

**Четвертая глава** диссертации посвящена исследованию состояний акцепторов, наблюдаемых в спектрах фотопроводимости и фотолюминесценции как в эпитаксиальных пленках твердого раствора HgCdTe, так и в гетероструктурах с квантовыми ямами, и связанных с вакансиями ртути – двойными акцепторами в HgCdTe.

**Пятая глава** диссертации посвящена исследованиям стимулированного излучения в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe в диапазоне длин волн от 4 – 5 мкм до 25 – 31 мкм.

**В шестой главе** изложены результаты исследований стимулированного излучения на межзонных переходах в гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe в диапазоне 3 – 4 мкм (в окне прозрачности атмосферы), в которых удалось существенно ослабить влияние оже-процессов на рекомбинацию носителей и существенно повысить максимальную температуру генерации.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

### ***Основные научные результаты, полученные автором***

К наиболее значимым **новым** результатам работы можно отнести следующие:

1. Экспериментально и, по-видимому, впервые продемонстрирована наличие квазирелятивистского закона дисперсии электронов и легких дырок в твердых растворах  $Hg_{1-x}Cd_xTe$ . Показана возможность перестройки зонного спектра от инвертированного к бесщелевому и нормальному посредством варьирования температуры.
2. Экспериментально продемонстрирована возможность подавления оже-рекомбинации в структурах с квантовыми ямами HgCdTe, и показано, что именно в узких квантовых ямах с небольшим содержанием кадмия реализуется максимальный энергетический порог для процессов оже-рекомбинации за счет симметричных квазигиперболических законов дисперсии для электронов и дырок и сильного размерного.
3. Впервые исследована динамика пропускания структуры КЯ с шириной запрещенной зоны  $E_g = 20$  мэВ методом накачка-зондирование с временным разрешением  $\sim 10$  пс, что позволило оценить плотность мощности, требуемую для получения инверсии населенностей как 10 кВт/см<sup>2</sup>.
4. Показано, что линии, наблюдающиеся около 10 и 20 мэВ в спектрах фотопроводимости объемных слоев  $p$ - $Hg_{1-x}Cd_xTe$  ( $x = 0.19 - 0.295$ ) обусловлены переходами с основного на

мелкие возбужденные состояния акцептора с большим матричным элементом с последующей термической ионизацией, а не переходами дырок непосредственно в континуум валентной зоны.

5. Впервые исследована температурная зависимость акцепторной ФП в отожженных слоях HgCdTe *p*-типа, и показано, что интенсивность линии ФП, возникающей из-за отрыва второй дырки от вакансии ртути убывает с температурой медленнее, чем интенсивность линии ФП, связанной с отрывом первой дырки, из-за большей энергии связи возбужденного состояния однократно ионизованного центра, с которого происходит термическая ионизация.

6. Обнаружена ТГц ФЛ, обусловленная оптическими переходами между возбужденными и основными состояниями нейтрального и однократно ионизованного двойного акцептора – вакансии ртути.

7. Предложен дизайн гетероструктур с квантовыми ямами на основе CdHgTe на подложке GaAs с диэлектрическими волноводами. В изготовленных волноводных структурах впервые получено стимулированное ИК излучение в диапазоне длин волн 19.5 – 31 мкм. Эффект достигнут за счёт подавления (по сравнению с объёмными слоями) безызлучательной Оже-рекомбинации. В гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe, излучающих в диапазоне 3 – 4 мкм (в окне прозрачности атмосферы), также удалось существенно ослабить влияние оже-процессов на рекомбинацию носителей и существенно повысить максимальную температуру генерации.

***Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.***

Достоверность научных положений, результатов и выводов обусловлена применением общепризнанных современных, и во многом оригинальных экспериментальных методов. Интерпретация результатов измерений основана на фундаментальных физических принципах, и полученные данные не противоречат данным других научных групп. Полученные результаты неоднократно докладывались на многих международных и Российских конференциях, опубликованы в рецензируемых журналах.

***Положения***, вынесенные на защиту, достаточно четко сформулированы и обоснованы на основе результатов диссертационной работы.

Основные результаты диссертации отражены в 43 опубликованных научных трудах в реферируемых научных журналах. Публикации и автореферат достаточно полно отражают содержание диссертации.

***Теоретическая и практическая значимость работы***

Развитые методики диагностики однородности и дефектности объемных пленок и гетероструктур с квантовыми ямами могут быть использованы для совершенствования технологии эпитаксии структур на основе CdHgTe, а данные о распространенных в CdHgTe дефектах – вакансиях ртути - имеют практическую значимость для разработки источников и приемников излучения на основе CdHgTe, поскольку данный тип дефектов в значительной степени определяет скорость рекомбинации неравновесных носителей. Результаты исследований стимулированного излучения в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами могут быть использованы для создания источников лазерного излучения среднего и дальнего ИК диапазонов.

Диссертация, автореферат, количество опубликованных по теме диссертации печатных работ *соответствуют* требованиям ВАК, предъявленным к докторским диссертациям. Представленных в диссертации и автореферате данных достаточно для понимания заявленных элементов научной новизны и практической значимости, личного вклада соискателя, и иных результатов представленной работы.

**Тема диссертационной работы и ее содержание** соответствуют специальности 2.2.2 — «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

#### ***Замечания по работе:***

1. Во введении автор упоминает об уже существующих инжекционных лазерах среднего ИК диапазона на основе узкозонных полупроводников  $A^4B^6$ , в которых в свое время – и достаточно давно – достигнута генерация вынужденного излучения на длинах волн вплоть до 50 мкм. В то же время никакого сравнения их характеристик, достоинств и недостатков, возможностей и перспектив применения, с таковыми предлагаемых в данной работе устройств на основе квантовых ям HgTe/CdHgTe, автор не проводит, что не мешало бы сделать.

Сделанные замечания не умаляют научную и практическую ценность диссертационной работы С..В.Морозова.

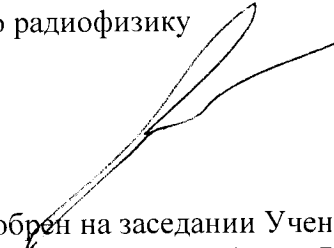
#### ***Заключение***

Диссертация С..В.Морозова является законченной научно – исследовательской работой работой, в которой исследованы оптические свойства гетероструктур с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe, выявлены механизмы безызлучательной рекомбинации в них, продемонстрирована возможность подавления Оже-рекомбинации и получена

генерация вынужденного ИК излучения на межзонных переходах в гетероструктурах HgTe/CdHgTe. Диссертационная работа С..В.Морозова «Стимулированное излучение в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe» является логически завершенным исследованием и удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, С..В.Морозов, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 — «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

**Отзыв составил:**


Ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего Лабораторией терагерцовой спектроскопии твердых тел Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.03–радиофизика, включая квантовую радиофизику

  
Митягин Юрий Алексеевич

Настоящий отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого Совета Отделения физики твердого тела Физического института им. П.Н.Лебедева РАН,


протокол № 09/22 от 23 сентября 2022 г.

Председатель Ученого Совета ОФТТ ФИАН,  
главный научный сотрудник, исполняющий  
обязанности руководителя ОФТТ ФИАН,  
доктор физико-математических наук

  
Демихов Евгений Иванович

Подписи Митягина Ю.А. и Демихова Е. И. заверяю:

Ученый секретарь ФИАН кандидат физико-математических наук

  
Колобов Андрей Владимирович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФГБУН ФИ РАН), Россия, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53, тел. 8(499)135-42-64, факс 8(499)135-78-80, <http://www.lebedev.ru/>; [postmaster@lebedev.ru](mailto:postmaster@lebedev.ru)