

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.238.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 10.11.2022 № 9

О присуждении Морозову Сергею Вячеславовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Стимулированное излучение в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe» по специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств – принята к защите 01 августа 2022 г. (протокол заседания №6) диссертационным советом 24.1.238.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения (ФГБНУ) «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, приказ о создании диссертационного совета номер 670/нк от 30 июня 2017 года.

Соискатель Морозов Сергей Вячеславович, 1975 года рождения, в 1998 году окончил Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского по направлению «Физика», работает в должности ведущего научного сотрудника отдела физики полупроводников Института физики микроструктур РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в отделе физики полупроводников Института физики микроструктур РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – Гавриленко Владимир Изяславович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом физики полупроводников Института физики микроструктур РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

1. Жуков Алексей Евгеньевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН профессор, руководитель департамента, заместитель декана по научной работе Санкт-Петербургской школы физико-математических и компьютерных наук, Санкт-Петербургского филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург).
2. Фирсов Дмитрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.
3. Хохлов Дмитрий Ремович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, заведующий кафедрой физического факультета МГУ.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном Митягиным Юрием Алексеевичем, кандидатом физико-математических наук, ведущим научным сотрудником, исполняющим обязанности заведующего лабораторией терагерцовой спектроскопии твердых тел ФИАН, обсужденном и одобренном на заседании Ученого совета Отделения физики твердого тела (ОФТТ) ФИАН (протокол №09/22 от 23.09.2022, подпись Демихова Евгения

Ивановича, председателя Ученого Совета ОФТТ ФИАН, главного научного сотрудника, исполняющего обязанности руководителя ОФТТ ФИАН, и утвержденного и.о. директора ФИАН доктором физико-математических наук профессором С.В.Рябовым, указала, что «Диссертация С.В. Морозова является законченной научно-исследовательской 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.». В конце отзыва делается заключение, что диссертационная работа С.В.Морозова «Стимулированное излучение в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, С.В.Морозов, несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Соискатель по теме диссертации имеет 43 опубликованные работы в рецензируемых научных журналах, наиболее важные приведены ниже:

1. Morozov, S. V. Efficient long wavelength interband photoluminescence from HgCdTe epitaxial films at wavelengths up to 26 μm / S. V. Morozov, V. V. Romyantsev, A. V. Antonov [et al.] // Applied Physics Letters. - 2014. - V. 104, № 7. - P. 072102.

2. Teppe, F. Temperature-driven massless Kane fermions in HgCdTe crystals / F. Teppe, M. Marcinkiewicz, S. S. Krishtopenko [et al.] // Nature communications. - 2016. - V. 7. - P. 12576.

3. Morozov, S. V. Time resolved photoluminescence spectroscopy of narrow gap $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ quantum well heterostructures / S. V. Morozov, V. V.

Rumyantsev, A. V. Antonov [et al.] // Applied Physics Letters. - 2014. - V. 105, № 2. - P. 022102.

4. Morozov, S. V. Coherent Emission in the Vicinity of 10 THz due to Auger-Suppressed Recombination of Dirac Fermions in HgCdTe Quantum Wells / S. V. Morozov, V. V. Rumyantsev, M. S. Zholudev [et al.] // ACS Photonics. - 2021. - V. 8, № 12. - P. 3526-3535.

5. Morozov, S. V. Long wavelength stimulated emission up to 9.5 μm from HgCdTe quantum well heterostructures / S. V. Morozov, V. V. Rumyantsev, A. M. Kadykov [et al.] // Applied Physics Letters. - 2016. - V. 108, № 9. - P. 092104-1-092104-5.

6. Morozov, S. V. Stimulated emission from HgCdTe quantum well heterostructures at wavelengths up to 19.5 μm / S. V. Morozov, V. V. Rumyantsev, M. A. Fadeev [et al.] // Applied Physics Letters. - 2017. - V. 111, № 19. - P. 192101.

7. Kudryavtsev, K. E. Toward Peltier-cooled mid-infrared HgCdTe lasers: Analyzing the temperature quenching of stimulated emission at $\sim 6 \mu\text{m}$ wavelength from HgCdTe quantum wells / K. E. Kudryavtsev, V. V. Rumyantsev, V. V. Utochkin [et al.] // Journal of Applied Physics. - 2021. - V. 130, № 21. - P. 214302.

8. Fadeev, M. A. Stimulated emission in the 2.8 - 3.5 μm wavelength range from Peltier cooled HgTe/CdHgTe quantum well heterostructures / M. A. Fadeev, V. V. Rumyantsev, A. M. Kadykov [et al.] // Optics Express. - 2018. - V. 26, № 10. - P. 12755-12760.

9. Rumyantsev, V. V. Optical Studies and Transmission Electron Microscopy of HgCdTe Quantum Well Heterostructures for Very Long Wavelength Lasers / V. V. Rumyantsev, A. A. Razova, L. S. Bovkun [et al.] // Nanomaterials. - 2021. - V. 11, № 7. - P. 1855.

10. Kudryavtsev, K. E. Temperature limitations for stimulated emission in 3–4 μm range due to threshold and non-threshold Auger recombination in HgTe/CdHgTe quantum wells / K. E. Kudryavtsev, V. V. Rumyantsev, V. Y. Aleshkin [et al.] // Appl. Phys. Lett. - 2020. - V. 117, № 8. - P. 083103.

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем работах в диссертации отсутствуют. Личный вклад соискателя в большинство опубликованных по теме диссертации работы является определяющим.

На автореферат диссертации поступило 4 отзыва (**все положительные**):

1) Дорохин Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Научно-исследовательского физико-технического института ФГАОУВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" дал положительную оценку на автореферат диссертации: «в качестве достоинств <...> следует отметить использование комбинации большого числа различных экспериментальных методик (измерение Фурье-спектроскопии, фотолуминесценции, фотопроводимость и пр.), которое сопровождалось подробным теоретическим анализом».

2) Соколовский Григорий Семенович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией интегральной оптики на гетероструктурах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук дал положительную оценку на автореферат диссертации, в которой «Несомненно, одним из наиболее ярких результатов является демонстрация в волноводных гетероструктурах с множественными квантовыми ямами стимулированного излучения в диапазоне 19.5-31 мкм, на длинноволновой границе которого локализация волноводной моды обеспечивается за счет ограничения ее проникновения в подложку вблизи области остаточных лучей арсенида галлия».

3) Цырлин Георгий Эрнстович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией эпитаксиальных нанотехнологий Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук» дал положительную оценку на автореферат диссертации и отметил, что

«Полученные в работе результаты <...> позволяют рассчитывать на создание эффективных источников диапазона 5-31 мкм на основе гетероструктур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe. Важно отметить, что в работе продемонстрировано высокое оптическое и структурное совершенство материалов, получаемых методом молекулярно-пучковой эпитаксии»

4) Шамирзаев Тимур Сезгирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики и технологии гетероструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН дал положительную оценку на автореферат диссертации, подчеркнув, что «Полученные в работе результаты раскрывают особенности межзонной фотопроводимости, а также стационарной и время разрешенной фотолюминесценции узкозонных объемных твердых растворов HgCdTe и КЯ на их основе».

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается тематической близостью диссертационного исследования соискателя и их научных исследований, посвященных полупроводниковым наноструктурам и оптическим методам их изучения (ведущая организация – более 10 публикаций, оппонент Жуков А.Е. – более 10 публикаций, оппонент Фирсов Д.А. – более 10 публикаций, оппонент Хохлов Д.Р. – более 10 публикации за последние 5 лет).

Диссертационный совет отмечает, что в работе, на основании выполненных соискателем исследований:

Разработана и реализована оригинальная методика измерения спектров фотолюминесценции в среднем и дальнем инфракрасных диапазонах в условиях сильной фоновой засветки.

Изучены спектры межзонной фотопроводимости и фотолюминесценции узкозонных слоев объемных твердых растворов HgCdTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, и показано их высокое структурное совершенство, проявляющееся в близкой к теоретическому пределу ширине линии фотолюминесценции при $T > 70$ К и малой величине энергии Урбаха.

В спектрах терагерцовой фотопроводимости и фотолюминесценции объемных слоев p-HgCdTe и квантовых ям HgCdTe/CdHgTe **обнаружены** линии фотовозбуждения нейтральных и однократно ионизованных вакансий ртути – двойных акцепторов. **Продемонстрировано** насыщение интенсивности линий вакансионной фотолюминесценции в квантовых ямах HgCdTe/CdHgTe с ростом интенсивности фотовозбуждения при одновременном росте интенсивности межзонной фотолюминесценции, свидетельствующее о насыщении скорости безызлучательной рекомбинации Шокли-Рида-Холла вследствие конечного числа ловушек – вакансий ртути.

Подтвержден эффект подавления безызлучательной оже-рекомбинации в квантовых ямах с малой долей Cd по сравнению с объемным материалом с той же шириной запрещенной зоны вследствие квазирелятивистского закона дисперсии электронов и дырок в таких квантовых ямах.

Зарегистрировано стимулированное излучение в волноводных структурах на основе HgCdTe вплоть до длины волны 31 мкм, недоступной для существующих квантовых каскадных лазеров. **Доказана** эффективность использования экстремально узких квантовых ям HgCdTe для генерации излучения в окне прозрачности воды 3-4 мкм при температурах близких к комнатной и достижимых при термоэлектрическом охлаждении.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:

- Развитые в диссертации методики диагностики однородности и дефектности объемных пленок и гетероструктур с квантовыми ямами приведенные в разделах 1 и 2, могут быть использованы для совершенствования технологии эпитаксии структур HgCdTe для инфракрасных фотоприемников.

- Развитая в работе методика измерения спектров фотолюминесценции и фотопроводимости в среднем и дальнем ИК диапазонах в условиях сильной фоновой засветки позволяет проводить исследования наряду со структурами на основе HgCdTe других перспективных узкозонных материалов, таких как халькогениды свинца-олова, структуры InAs/AlSb, BiSeIn и др.

- Результаты исследования дефектов в твердых растворах кадмий-ртуть-теллур – вакансий ртути важны для разработки источников и приемников излучения на основе твердых растворов кадмий-ртуть-теллур, поскольку данный тип дефектов в значительной степени определяет скорость рекомбинации неравновесных носителей в условиях слабого возбуждения.

- Результаты исследований стимулированного излучения в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами могут быть использованы для создания источников лазерного излучения на межзонных переходах на основе соединений кадмий-ртуть-теллур. Источники на основе кадмий-ртуть-теллур способны работать при температурах близких к комнатной в диапазоне длин волн до 5 мкм, а возможность температурной перестройки спектра позволяет рассматривать возможность их практического применения в приложениях спектроскопии газов.

Оценка достоверности результатов исследования:

- достоверность результатов работы обеспечивается использованием апробированных в ИФМ РАН и других лабораториях оптических методик;
- полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами и имеющимися литературными данными.

Личный вклад соискателя. Все основные результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии или руководстве. Постановка задач и интерпретация результатов проводилась непосредственно диссертантом, либо его вклад был определяющим. Экспериментальные результаты получены автором лично, либо под его руководством. Вклад автора диссертации в теоретические исследования состоит в постановке задач и сопоставлении полученных результатов с экспериментом.

В ходе защиты диссертации официальным оппонентом Д.Р. Хохловым было высказано замечание, что в диссертации не обсуждается возможность для лазерных структур, излучающих на длинах волн порядка 20 мкм, работать не при оптической, а при токовой накачке.

Соискатель Морозов С.В. в своём ответе сообщил, что как показано в диссертационной работе для получения стимулированного излучения с длиной волны около 20 мкм необходимо использовать длинноволновую накачку, предотвращающую разогрев носителей, включающий безызлучательную оже-рекомбинацию. В этом смысле инжекция носителей из барьерных слоев при создании *p-n*-перехода эквивалентна случаю коротковолновой оптической накачки. Более перспективным представляется создание латерального *p-n*-перехода с помощью двух затворов на поверхности, как это уже было продемонстрировано в графене.

На заседании 10.11.2022 г. диссертационный совет за развитие представлений о свойствах объемных и квантоворазмерных структур на основе CdHgTe и решение научной проблемы подавления безызлучательной рекомбинации неравновесных носителей в квантовых ямах HgCdTe/CdHgTe, разработку технических и технологических решений, которые могут быть использованы для создания лазеров среднего и дальнего инфракрасного диапазонов с рекордными характеристиками, принял решение присудить Морозову С.В. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (2.2.2. — электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств), участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 17, против 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета



Красильник З.Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета

Водолазов Д.Ю.

Дата оформления Заключения 10.11.2022 г.