

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 КАНДИДАТА
НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 18.11.2021 № 8

О присуждении Фадееву Михаилу Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование магнитопоглощения, спонтанного и стимулированного излучения в гетероструктурах с квантовыми ямами $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}/\text{CdHgTe}$ и $\text{InAs}/\text{Ga}(\text{In})\text{Sb}/\text{InAs}$ » по специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств – принята к защите 16 сентября 2021 г. (протокол заседания № 7) 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 Фадеев Михаил Александрович, 1993 года рождения, в 2016 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по направлению «Физика», освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре Института физики микроструктур РАН (срок обучения 01.09.2016 – 31.08.2020), работает

в должности младшего научного сотрудника лаборатории основ наноэлектронной компонентной базы информационных технологий 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 руководитель – Морозов Сергей Вячеславович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Физики полупроводниковых гетероструктур и сверхрешеток 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. Хохлов Дмитрий Ремович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой общей физики и физики конденсированного состояния ФГБОУВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»
2. Фирсов Дмитрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФГБУН ФИ РАН) – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном Митягиным Юрием Алексеевичем, кандидатом физико-математических наук, ведущим научным сотрудником Лаборатории терагерцовой спектроскопии твердых тел Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт имени П. Н. Лебедева

Российской академии наук, и утвержденном Колачевским Николаем Николаевичем, физико-математических наук, директором ФГБУН ФИ РАН, указала, что «В гетероструктурах с инвертированной зонной структурой экспериментально получено наибольшее значение запрещенной зоны, составляющее 17 мэВ. Продемонстрирована возможность определения наличия/отсутствия инверсии зон магнитооптическими методами. Показана возможность увеличения ширины запрещенной зоны посредством использования напряженных структур. В волноводных структурах с квантовыми ямами определен дизайн квантовых ям, позволяющий существенно ослабить роль Оже-рекомбинации и получить генерацию вынужденного излучения с длинами волн вплоть до 18 мкм.». В конце отзыва делается заключение, что диссертация является логически завершенным исследованием и удовлетворяет требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор, Фадеев Михаил Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. —«Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники квантовых устройств».

Соискатель имеет 55 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 38 работ, из них в рецензируемых научных журналах опубликовано 28 статей. Наиболее значительные работы:

1 S.V. Morozov, V.V. Rumyantsev, M.A. Fadeev, M.S. Zholudev, K.E. Kudryavtsev, A.V. Antonov, A.M. Kadykov, A.A. Dubinov, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, and V.I. Gavrilenko. *Stimulated emission from HgCdTe quantum well heterostructures at wavelengths up to 19.5 μm*, Applied Physics Letters 111(19), 192101 (2017).

2 S. Ruffenach, A. Kadykov, V.V. Rumyantsev, J. Torres, D. Coquillat, D. But, S.S. Krishtopenko, C. Consejo, W. Knap, S. Winner, M. Helm, M.A. Fadeev, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov, and F. Teppe. *HgCdTe-based heterostructures for Terahertz photonics*. APL Materials.5(3), 035503 (2017).

- 3 S.S. Krishtopenko, S. Ruffenach, F. Gonzalez-Posada, G. Boissier, M. Marcinkiewicz, M.A. Fadeev, A.M. Kadykov, V.V. Rumyantsev, S.V. Morozov, V.I. Gavrilenko, C. Consejo, W. Desrat, B. Jouault, W. Knap, E. Tournié, and F. Teppe. *Temperature-dependent terahertz spectroscopy of inverted-band three-layer InAs/GaSb/InAs quantum well*, Physical Review B 97(24), 245419 (2018).
- 4 M.A. Fadeev, A.A. Dubinov, V.Ya. Aleshkin, V.V. Rumyantsev, V.V. Utochkin, V.I. Gavrilenko, F. Teppe, H-W Hübers, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretiskii, S.V. Morozov. *Effect of Cd content in barriers on the threshold energy of Auger recombination in waveguide structures with HgTe/CdxHg1-xTe quantum wells, emitting at a wavelength of 18 μm*. Quantum Electronics, 49(6), 556 (2019).
- 5 V.V. Rumyantsev, M.A. Fadeev, V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, V.V. Utochkin, A.V. Antonov, D.A. Ryzhov, D.I. Kuritsin, V.I. Gavrilenko, Z.F. Krasilnik, C. Sirtori, F. Teppe, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, S.V. Morozov. *Terahertz emission from HgCdTe QWs under long-wavelength optical pumping*. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 41, 750-757 (2020).

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

На автореферат диссертации поступило 3 отзыва (**все положительные**):

1) Шалыгин Вадим Александрович, доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» в отзыве на автореферат отмечает, что в работе впервые исследованы спектры магнитооптического поглощения напряженных гетероструктур InAs/Ga(In)Sb/InAs с инвертированной зонной структурой, соответствующей состоянию двумерного топологического изолятора. **Замечания:** 1) В 4-м положении, вынесенном на защиту, автор говорит, что при накачке с длиной волны 2 мкм диапазон уровней возбуждения, обеспечивающих эмиссию длинноволнового стимулированного излучения, значительно более узкий, чем

при накачке с длиной волны 10.6 мкм. И утверждает, что это «обусловлено разогревом неравновесных носителей» при накачке с длиной волны 2 мкм. Вообще говоря, при накачке с длиной волны 10.6 мкм также имеет место некоторый разогрев неравновесных носителей. Поэтому, на наш взгляд, формулировка 4-го положения требует уточнения, касающегося степени разогрева неравновесных носителей при разных длинах волн накачки. 2) На с. 3 автор пишет, ссылаясь, в частности, на работу [3], что в квантовых ямах HgTe/HgCdTe и InAs/GaSb, а также в двумерных пленках 1T-WTe₂ «транспорт краевых состояний ... проявляется лишь при криогенных температурах существенно ниже 1 К». Это противоречит тексту на с.4, где указывается на «демонстрацию краевого транспорта в слоях 1T-WTe₂ при температурах до 100 К» в работе [3].

2) Квон Зе Дон, профессор, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики низкоразмерных электронных систем Института физики полупроводников Сибирского отделения РАН, дает положительную оценку на автореферат диссертации, в которой «убедительно продемонстрировано, что использование множественных квантовых ям с различным содержанием кадмия в материале указанных ям и барьеров приводит к изменениям зонного спектра структуры и позволяет управлять характеристиками стимулированного излучения». **Замечание:** Автор диссертации уделяет на первых страницах автореферата непропорционально много места рассуждениям о двумерных топологических изоляторах, не имеющих отношения к теме его работы. В результате читаем на стр.3 его автореферата "Поэтому транспорт краевых состояний в вышеупомянутых полупроводниковых системах проявляется лишь при криогенных температурах существенно ниже 1 К. Это служит препятствием, как для "исследований таких структур, так и для их практического применения". Во-первых, краевой транспорт появляется при температуре 10 К, и никаких препятствий для его исследования нет. Во-вторых, говорить о практическом

применении топологических изоляторов можно в неумеренных фантазиях, но не в научной работе.

3) Мынбаев Карим Джафарович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией фотоэлектрических явлений в полупроводниках Федерального бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт ФТИ им. А.Ф. Иоффе» РАН в своем отзыве на автореферат диссертации подчеркивает, что при характеристике серии волноводных гетероструктур с КЯ $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$ методами спектроскопии фотолюминесценции и магнитооптического поглощения установлено, что КЯ с номинальным (заявленным изготовителем) бинарным составом могут в действительности содержать Cd в диапазоне составов от 0 до 10%. При этом показано, что наибольшая температура гашения СИ достигается в структурах, использующих ямы из чистого HgTe и барьеры CdHgTe с высоким (молярной долей ~ 0.7) содержанием теллурида кадмия. **Замечания:** 1) Из автореферата не вполне ясно, какую именно модель оже-рекомбинации использовал при анализе температуры гашения СИ. В тексте автореферата речь идет только об увеличении порога оже-рекомбинации. Из этого текста не ясно, рассматривались ли, например, беспороговые и квазипороговые механизмы оже-рекомбинации, специфичные для структур с барьерами и, в частности, для КЯ на основе HgCdTe . 2) В тексте автореферата встречаются опечатки. Так, например, в самом начале автореферата неоднократно упоминаются квантовые ямы « Hg/HgCdTe ».

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается тематической близостью диссертационного исследования соискателя и их научных исследований, посвященных изучению физики сверхпроводимости (ведущая организация - 10 публикаций, оппонент Хохлов Д.Р. - 9 публикаций, оппонент Фирсов Д.А. - 9 публикации, за последние 5 лет).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Изучены оптические свойства гетероструктур $\text{InAs}/\text{Ga}(\text{In})\text{Sb}/\text{InAs}$ с инверсией зон методами спектроскопии магнитооптического поглощения в квантующих магнитных полях и фотолюминесценции при различных температурах.

Определена ширина запрещенной зоны и порядок расположения зон в структурах с тройными квантовыми ямами $\text{InAs}/\text{GaSb}/\text{InAs}$ при различных температурах. **Подтверждена** слабая зависимость величины запрещенной зоны при изменении температуры в структурах с тройными квантовыми ямами $\text{InAs}/\text{Ga}(\text{In})\text{Sb}/\text{InAs}$ с инвертированным зонным спектром. **Продемонстрировано**, что за счет изменения встроенных упругих напряжений в слоях, образующих тройную яму возможна перестройка зонного спектра от случая топологического изолятора до двумерного полуметалла.

Показано, что изменение концентрации Cd во внутреннем слое HgCdTe гетероструктур с квантовыми ямами $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}/\text{HgCdTe}$, возникающее в процессе роста, приводит к существенному изменению зонного спектра таких структур и отражается на температурной зависимости спектров фотолюминесценции и спектров поглощения в магнитном поле.

Доказано, что изменения зонного спектра гетероструктур с квантовыми ямами $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}/\text{HgCdTe}$ при изменении состава барьерных слоев и квантовой ямы оказывают существенное влияние на характеристики стимулированного излучения в таких структурах. Определены оптимальные параметры гетероструктур, обеспечивающие наибольшую температуру гашения стимулированного излучения. **Зарегистрировано** стимулированное излучение с длиной волны 18 мкм при 20 К.

При исследовании вынужденного излучения в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}/\text{CdHgTe}$ с оптической накачкой **обнаружен** эффект разогрева электронного газа накачкой с длиной волны 2 мкм, что приводит к подавлению вынужденного излучения. **Показано**, что влияние разогрева может быть ослаблено за счет использования возбуждающего излучения с длиной волны 10.6 мкм.

Теоретическая значимость исследования связана с полученной зависимостью характеристик стимулированного излучения от параметров квантовых ям в гетероструктурах $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}/\text{CdHgTe}$, что может быть использовано для описания скорости процессов излучательной и безызлучательной рекомбинации.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:

– предложен способ определения порядка расположения зон и ширины запрещенной зоны в гетероструктурах с тройными квантовыми ямами $\text{InAs}/\text{GaSb}/\text{InAs}$ на основе анализа спектров магнитооптического поглощения и спонтанной фотолюминесценции

– полученные результаты исследования влияния параметров квантовых ям $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}/\text{HgCdTe}$ и параметров оптического возбуждения на характеристики стимулированного излучения могут быть использованы для создания источников излучения среднего ИК диапазона на основе этих структур.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

– достоверность результатов работы обеспечена использованием апробированных экспериментальных методик для анализа исследуемых структур

– полученные экспериментальные результаты проверены с помощью дополняющих друг друга экспериментальных методик

– результаты работы согласуются с теоретическими расчетами и данными, известными из литературы.

Личный вклад соискателя: Основные результаты, представленные в рассмотренной диссертационной работе, были получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Постановка цели и задач диссертационного исследования, интерпретация полученных результатов и формулировка выводов осуществлены совместно с научным руководителем.

На заседании 18.11.2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Фадееву М.А. учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 4 доктора наук по специальности рассматриваемой диссертации (2.2.2. — электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств), участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали за 19, против 0.

Заместитель председателя диссертационного совета



Красильник З.Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета

Водолазов Д.Ю.

Дата оформления Заключения 18.11.2021 г.