

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д002.069.03,  
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 20.12.2018 № 16

О присуждении Кадыкову Александру Михайловичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Фотоотклик и стимулированное излучение в структурах на основе соединений HgCdTe в среднем и дальнем ИК диапазонах» по специальности «05.27.01 — твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» — принята к защите 18 октября 2018 г. (протокол заседания № 11) диссертационным советом Д002.069.03, 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, БОКС - 120, ул. Ульянова, 46, приказ от 30 июня 2017 года номер 670/нк о создании диссертационного совета.

Соискатель Кадыков Александр Михайлович, 1990 года рождения, в 2014 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по направлению подготовки "011800 Радиофизика", освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в

аспирантуре Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (срок обучения 01.09.2014 — 31.08.2018), работает в должности младшего научного сотрудника отдела физики полупроводников (отдел 8110) Института физики микроструктур РАН — филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИФМ РАН).

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 (ИФМ РАН).

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, Морозов Сергей Вячеславович, заведующий лабораторией физики полупроводниковых гетероструктур и сверхрешеток Института физики микроструктур РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Официальные оппоненты:

1) Хохлов Дмитрий Ремович, член-корр. РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

2) Шалыгин Вадим Александрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого",

**дали положительные отзывы на диссертацию.**

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева» Российской академии наук (ФИАН), г.Москва – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном Митягиным Юрием Алексеевичем, кандидатом физико-математических наук, ведущим научным сотрудником Отделения физики твердого тела ФИАН, и утвержденном Савиновым Сергеем Юрьевичем, доктором физико-математических наук, заместителем директора ФИАН, указала, что рецензируемая диссертационная работа посвящена решению ряда актуальных научных задач, направленных на использование структур на основе соединений HgCdTe в качестве материалов для детекторов среднего и дальнего ИК диапазона, а также исследованиям фотолюминесценции и вынужденного излучения на межзонных переходах в эпитаксиальных слоях  $Hg_{1-x}Cd_xTe$ , направленным на создание лазерных источников излучения в среднем ИК диапазоне. Отмечено, что диссертационная работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор А.М. Кадыков, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «05.27.01 — твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

По теме диссертации соискатель имеет 32 опубликованных работы, в числе которых 10 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в список журналов, рекомендованных ВАК. Наиболее значительные работы:

1. **Kadykov, A.M.** *Temperature-Induced Topological Phase Transition in HgTe Quantum Wells* / Krishtopenko S.S., Jouault B., Desrat W., Knap W., Ruffenach S., Consejo C., Torres J., Morozov S.V., Mikhailov N.N., Dvoretiskii S.A., Teppe F. // *Phys. Rev. Lett.* – 2018. – Vol. 120. - P.086401.

2. Ruffenach, S. *HgCdTe-based heterostructures for terahertz photonics* / **Kadykov A.M.**, Rumyantsev V.V., Torres J., Coquillat D., But D., Krishtopenko S.S., Consejo C., Knap W., Winner S., Helm M., Fadeev M.A., Mikhailov N.N., Dvoretzky S.A., Gavrilenko V.I., Morozov S.V., Teppe F. // *Appl. Phys. Lett. Materials*. - 2017. – Vol. 5 - №3 - P. 35503.
3. Morozov S. V. *Long wavelength stimulated emission up to 9.5 $\mu$ m from HgCdTe quantum well heterostructures* / Rumyantsev V. V., **Kadykov A. M.**, Dubinov A. A., Kudryavtsev K. E., Antonov A. V., Mikhailov N. N., Dvoretzky S. A. and Gavrilenko V. I. // *Appl. Phys. Lett.* – 2016. – Vol. 108 – 092104.
4. **Kadykov A. M.** *Terahertz imaging of Landau levels in HgTe-based topological insulators* / Torres J., Krishtopenko S. S., Consejo C., Ruffenach S., Marcinkiewicz M., But D., Knap W., Morozov S. V., Gavrilenko V. I., Mikhailov N. N., Dvoretzky S. A. and Teppe F. // *Applied Physics Letters*. – 2016. – Vol. 108. – №. 26. – P. 262102.
5. Morozov S. V. *Long wavelength superluminescence from narrow gap HgCdTe epilayer at 100 K* / Rumyantsev, V. V., Dubinov, A. A., Antonov, A. V., **Kadykov, A. M.**, Kudryavtsev, K. E., Kuritsin, D. I., Mikhailov, N. N., Dvoretzky, S. A., Gavrilenko, V. I. // *Applied Physics Letters*. – 2015. – Vol. 107. – №. 4. – P. 042105.
6. **Kadykov A. M.** *Terahertz detection of magnetic field-driven topological phase transition in HgTe-based transistors* / Teppe F., Consejo C., Viti L., Vitiello M.S., Krishtopenko S.S., Ruffenach S., Morozov S.V., Marcinkiewicz M., Desrat W., Dyakonova N., Knap W., Gavrilenko V.I., Michailov N.N., Dvoretzky S.A. // *Applied Physics Letters*. – 2015. – Vol. 107. – №. 15. – P. 152101.

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

На автореферат диссертации поступили 2 отзыва:

- 1) Андрианов Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, в своем **положительном** отзыве на автореферат диссертации отмечает: «При выполнении диссертационной работы был получен целый ряд важных с фундаментальной точки зрения результатов», «впечатляющие результаты были достигнуты при исследовании спектров стимулированного излучения структур с КЯ HgTe/CdHgTe и диэлектрическими волноводами, где за счёт подавления Оже рекомбинации в следствие симметричного закона дисперсии, было получено стимулированное излучение на рекордной для таких структур длине волны 10.2 мкм». Отзыв содержит следующее **замечание**: «структура автореферата (и соответственно диссертации) выглядит немного необычной: диссертация разделена только на две главы, в первой излагаются результаты исследования детектирования ТГц излучения и топологического фазового перехода, а во второй – исследование спектров фотолюминесценции и стимулированного излучения. В большинстве случаев каждый оригинальный законченный результат оформляется в виде отдельной главы и присутствует глава, посвящённая обзору литературы по теме диссертации».
- 2) Попов Вячеслав Валентинович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, в своём **положительном** отзыве на автореферат диссертации отмечает: «особо впечатляет комплексный подход, объединяющий изучение транспортных и излучательных характеристик исследуемых структур». Отзыв не содержит замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован тематической близостью их научных исследований и диссертационного исследования соискателя, посвященных исследованию оптических и магнитотранспортных свойств структур на основе соединений HgCdTe.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**Обнаружено** увеличение сигнала фотоотклика на излучение с частотой 292 и 660 ГГц в полевом транзисторе на основе гетероструктуры с КЯ HgTe/CdHgTe толщиной 8.3 нм при величине индукции магнитного поля  $\approx 6$  Тл, соответствующей топологическому переходу от инвертированной к нормальной зонной структуре при изменении величины магнитного поля.

В холловском мостике с затвором, выполненным на основе гетероструктуры с КЯ HgTe/CdHgTe толщиной 6.5 нм, была **получена** карта уровней Ландау методом анализа суб-ТГц фотоотклика на частоте 170 ГГц, позволившая определить значение критического магнитного поля. Магнитотранспортным методом **получены** карты уровней Ландау при различных температурах от 1.7 до 40 К, что позволило наблюдать топологический фазовый переход вблизи 27 К.

В эпитаксиальной плёнке  $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  при температуре 100 К при увеличении мощности оптического возбуждения **обнаружено** стимулированное излучение на длине волны  $\lambda \approx 8.4$  мкм, сопровождающееся обужением линии фотолюминесценции и сверхлинейным ростом интенсивности. Дальнейшее увеличение мощности возбуждения приводило к насыщению интенсивности линии фотолюминесценции, что объяснено уменьшением локализации ТЕ моды в активном слое из-за уменьшения эффективного показателя преломления при увеличении концентрации неравновесных носителей.

В гетероструктурах с узкими КЯ HgCdTe/CdHgTe толщиной 3.65 нм и диэлектрическими волноводами **получено** стимулированное излучение с наибольшей длиной волны  $\lambda \approx 10.2$  мкм. При увеличении мощности оптического возбуждения наблюдалось обужение линии излучения вплоть до  $\approx 1$  кВТ при температуре 80 К и сверхлинейный рост ее интенсивности. Пороговая плотность мощности возбуждения составила  $0.12$  кВТ/см<sup>2</sup> при 18 К и  $1$  кВТ/см<sup>2</sup> при 80 К.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что:

- **обнаружено** проявление эффектов электрон-электронного взаимодействия в нерезонансном фотоотклике в суб-ТГц диапазоне в гетероструктуре с квантовой ямой HgTe/CdHgTe с инвертированным зонным спектром;

- магнитотранспортными методами наглядно **продемонстрирован** топологический фазовый переход от инвертированной к нормальной зонной структуре в квантовой яме HgTe/CdHgTe при увеличении температуры.

**Значение полученных соискателем результатов для практики** подтверждается тем, что:

- продемонстрировано стимулированное излучение на межзонных переходах на рекордно большой длине волны 10,2 мкм в гетероструктуре с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe с диэлектрическим волноводом;

- показана перспективность использования квантовых ям HgTe/CdHgTe для создания источников излучения дальнего ИК диапазона.

**Оценка достоверности** результатов исследования выявила:

- экспериментальные исследования выполнены апробированными в ИФМ РАН и других научных организациях в России и за рубежом методами;

- полученные соискателем результаты находятся в хорошем качественном и количественном согласии с данными результаты теоретических расчетов зонной структуры;

- установлено соответствие авторских результатов с экспериментальными результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике, в тех случаях, когда такое сравнение является обоснованным.

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

На заседании 20.12.2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Кадыкову А.М. учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19, человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (05.27.01 — твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах), участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 19, против 0 (нет), недействительных бюллетеней 0 (нет).

Председатель диссертационного совета



Гапонов С.В.

Ученый секретарь диссертационного совета

Водолазов Д.Ю.

Дата оформления Заключения 20.12.2018 г.