

Кадыков Александр Михайлович

**Фотоотклик и стимулированное излучение в структурах на
основе соединений HgCdTe в среднем и дальнем ИК диапазонах**

05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и
наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2018

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН — филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИФМ РАН)

Научный руководитель: Морозов Сергей Вячеславович,
кандидат физико-математических наук,
зав. лаб. Института физики микроструктур РАН -
филиала ФГБНУ ФИЦ ИПФ РАН

Официальные оппоненты: Хохлов Дмитрий Ремович, член-корреспондент
РАН, доктор физико-математических наук,
заведующий кафедрой общей физики и физики
конденсированного состояния ФГБОУВО
«Московский государственный университет имени
М. В. Ломоносова»

Шалыгин Вадим Александрович, доктор физико-
математических наук, профессор кафедры физики
полупроводников и наноэлектроники ФГАОУВО
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»

Ведущая организация: ФГБУН «Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук»

Защита состоится 20 декабря 2018 г. в 14 часов на заседании диссертационного
совета Д 002.069.03 при ФИЦ ИПФ РАН по адресу: 603087, Нижегородская обл.,
Кстовский район, д. Афоново, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ РАН и на сайте
http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/KadykovAM/Thesises_KadykovAM.pdf

Автореферат разослан “__” ноября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.069.03
доктор физико-математических наук

Д.Ю. Водолазов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В последние годы структуры на основе узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ привлекают повышенный интерес исследователей как в России, так и за рубежом, что обусловлено наличием у них целого ряда замечательных свойств. В них возможна реализация состояния топологического изолятора, бесщелевой зонной структуры с линейным (графеноподобным) законом дисперсии, гигантского расщепления Рашбы. Благодаря значительному прогрессу в технологии роста (молекулярно-лучевой эпитаксии), достигнутому в последнее десятилетие, стало возможным получать эпитаксиальные структуры на основе HgCdTe высокого качества, как объемные слои твердого раствора $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, так и гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$. В тоже время структуры на основе соединений HgCdTe представляют интерес как материал для детекторов среднего и дальнего инфракрасного (ИК) диапазона. Поскольку, HgTe имеет так называемую инвертированную зонную структуру с «отрицательной» шириной запрещенной зоны, а CdTe — нормальную зонную структуру, в твердых растворах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ можно получить произвольную ширину запрещенной зоны от 0 до 1.6 эВ. Вследствие этого данный материал широко используется для создания детекторов среднего ИК диапазона, в том числе работающих в окнах прозрачности атмосферы 3 – 5 мкм и 8 – 14 мкм, а также имеет перспективы для использования в дальнем ИК диапазоне. С другой стороны, такие структуры с КЯ $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ за счёт высокой подвижности носителей заряда в КЯ с толщиной близкой к критической могут быть использованы в качестве материала для полевых транзисторов (FET), детектирующих ТГц излучение по механизму Дьяконова — Шура. Как известно, полевые транзисторы являются одними из основных элементов ТГц оптоэлектроники. Их способность детектировать ТГц излучение за счёт плазмонного механизма Дьяконова — Шура была предсказана [1,2] и продемонстрирована [3–5] ещё 15 лет назад. Однако, несмотря на то, что полевые транзисторы уже используются в коммерческих системах ТГц сканирования и

телекоммуникации, их ключевые показатели могут быть существенно улучшены за счёт использования структур с графеноподобным законом дисперсии на основе КЯ $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$, с высокой подвижностью носителей заряда.

Значительный интерес представляет использование структур на основе HgCdTe в качестве источников излучения среднего и дальнего ИК диапазонов. Как известно, в среднем ИК диапазоне существуют квантово-каскадные лазеры (ККЛ), излучающие на длинах волн 3 – 20 мкм [6] при комнатной температуре и обладающие большой мощностью [7,8]. Также ККЛ работают и в ТГц диапазоне вплоть до частот порядка 5 ТГц [9–12]. Однако, в области длин волн от 25 – 60 мкм ККЛ на основе традиционно используемых соединений A_3B_5 не могут работать вследствие сильного решеточного поглощения. Представляется, что именно в диапазоне 25 – 60 мкм межзонные лазеры на основе гетероструктур HgCdTe могут составить конкуренцию ККЛ на основе полупроводников A_3B_5 , поскольку энергия оптических фононов в твердых растворах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ существенно меньше и располагается в диапазоне 60 – 110 мкм. Заметим, что в дальнем ИК диапазоне существуют межзонные лазеры на основе халькогенидов свинца и олова PbSnSe и PbSnTe , работающие вплоть до длины волны 46 мкм [13,14]. Однако, чрезвычайно низкая мощность, низкие рабочие температуры, быстрая деградация характеристик и технологические проблемы существенно ограничивают их использование даже для спектроскопических приложений.

Таким образом, КЯ на основе узкозонных структур HgCdTe с высокой подвижностью представляют большой интерес для детектирования дальнего ИК и ТГц излучения, как за счет межзонных переходов, так и по механизму Дьяконова — Шура. Они представляются перспективными для создания источников стимулированного излучения в диапазоне 25 – 60 мкм, недостижимом для ККЛ на основе соединений A_3B_5 .

Степень разработанности темы исследований

В последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в технологии изготовления структур на основе HgCdTe , в том числе, появилась возможность

изготовления качественных гетероструктур с КЯ HgCdTe/CdHgTe методом молекулярно-лучевой эпитаксии с *in-situ* эллипсометрическим контролем состава и толщины слоёв [15–17], что открывает большие возможности для использования данных структур для широкого круга задач. Зонная структура КЯ HgTe/CdHgTe изучалась в десятках работ, однако лишь в нескольких из них исследования проводились вблизи топологического фазового перехода. При этом в большинстве работ этот переход реализовывался при достаточно высокой температуре (90 К [18], 185 К [19] и 200 К [20]), что не позволяло наглядным образом продемонстрировать бесщелевую зонную структуру с линейным (графеноподобным) законом дисперсии, являющуюся характерным признаком топологического фазового перехода. Таким образом явления, связанные с фазой топологического изолятора и фазовым переходом из состояния топологического изолятора к тривиальному полупроводнику в КЯ HgTe/CdHgTe до сих пор остаются не до конца изученными.

Что касается использования структур на основе HgCdTe в качестве излучателей на межзонных оптических переходах, то такие работы велись достаточно давно, но наибольшая полученная длина волны стимулированного излучения составляла 5.3 мкм [21]. В недавней работе с участием автора диссертации была обнаружена фотолюминесценция из объёмных слоёв твёрдых растворов HgCdTe на рекордно большой длине волны 26 мкм [22]. Логическим продолжением этих исследований является получение стимулированного излучения в данных структурах на межзонных переходах.

Основные цели работы

Основной целью работы является разработка физических основ создания детекторов и источников стимулированного излучения в ТГц диапазоне частот на основе узкозонных структур HgCdTe. Это включает в себя следующие задачи:

- 1) Исследование фотоотклика на ТГц излучение полевых транзисторов и холловских мостиков с затвором, выполненных на основе двумерных топологических изоляторов с КЯ HgTe/CdHgTe в зависимости от величины индукции магнитного поля, затворного напряжения и силы тока через канал.

Совместный анализ спектров ТГц фотоотклика и магнитотранспортных характеристик для выявления особенностей, связанных с положением уровней Ландау.

2) Исследование топологического фазового перехода при изменении температуры. Проведение магнитотранспортных измерений при различных температурах, отслеживание осцилляций Шубникова — де Гааза на продольном магнетосопротивлении и фундаментальных холловских плато поперечного магнетосопротивления. Отслеживание положения нулевых уровней Ландау и их пересечения (антипересечения) в критическом магнитном поле при различных температурах.

3) Исследование спектров фотолюминесценции и стимулированного излучения при различных температурах и мощностях оптического возбуждения в эпитаксиальных пленках твёрдых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и волноводных гетероструктурах с КЯ.

Научная новизна

Научная новизна заключается в следующем:

1) Исследованы спектры суб-ТГц фотоотклика по механизму Дьяконова — Шура полевого транзистора, выполненного на основе гетероструктуры с КЯ $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ толщиной 8.3 нм. При этом впервые обнаружен сигнал фотоотклика на излучение с частотой 292 и 660 ГГц, соответствующий фазовому переходу из инвертированной зонной структуры в нормальную при изменении величины индукции магнитного поля.

2) Выполнена «визуализация» уровней Ландау методом суб-ТГц фотоотклика на частоте 292 ГГц и температуре 4.2 К по механизму Дьяконова — Шура в холловском мостике с затвором, выполненном на основе КЯ $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ толщиной 6.5 нм. При этом было получено положение нулевых уровней Ландау и значение критического магнитного поля, соответствующего их пересечению.

3) При исследовании магнитотранспортных характеристик холловского мостика с затвором на основе гетероструктуры двумерного топологического изолятора с КЯ $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ толщиной 6.5 нм были получены «карты» уровней Ландау при

различных температурах от 1.7 до 40 К. Анализируя положения нулевых уровней Ландау и отслеживая их пересечение (антипересечение) при различных температурах впервые наглядно был продемонстрирован топологический фазовый переход, определена критическая температура, составившая 27 К.

4) При оптической импульсной накачке и температуре 100К за счёт подавления безызлучательной рекомбинации Шокли — Рида — Холла при увеличении мощности возбуждения получены спектры стимулированного излучения в образце на основе эпитаксиальной пленки твёрдого раствора $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с содержанием $x_{\text{Cd}} \approx 0.22$ на длине волны $\lambda \approx 8.4$ мкм. Дальнейшее увеличение накачки приводило к резкому уменьшению эффективного показателя преломления активной части структуры при высоких концентрациях неравновесных носителей и к делокализации ТЕ моды.

5) В гетероструктурах с КЯ $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ толщиной 3.65 нм с волноведущими барьерными слоями за счёт подавления Оже-рекомбинации (по сравнению с объёмными слоями твёрдого раствора HgCdTe) при температуре от 18К до 80К получено стимулированное излучение на рекордной длине волны $\lambda \approx 10.2$ мкм, сопровождающееся обужением линии фотолюминесценции вплоть до ≈ 1 кВТ и сверхлинейным ростом интенсивности при увеличении мощности возбуждения. Данный результат по длине волны значительно превосходит результат, полученный ранее в данных материалах. При этом пороговая плотность мощности составила ≈ 0.12 кВт/см² при 18 К и 1 кВт/см² при 80К.

Теоретическая и практическая значимость работы

Научная значимость работы заключается в получении новых знаний об оптических свойствах узкозонных структур на основе HgCdTe и о природе топологического фазового перехода в двумерных топологических изоляторах с КЯ $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$.

Исследован фотоотклик на суб-ТГц излучение на частотах 292 и 660 ГГц в полевом транзисторе на основе двумерного топологического изолятора с КЯ $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ толщиной 8.3 нм. Обнаружено увеличение сигнала фотоотклика, связанного с топологическим переходом между состояниями инвертированной и нормальной зонной структуры при изменении величины магнитного поля.

Впервые магнитотранспортным методом наглядно продемонстрирован топологический фазовый переход под действием температуры в двумерном топологическом изоляторе, выполненном на основе гетероструктуры с КЯ HgTe/CdHgTe. Измерена критическая температура фазового перехода, составившая $T \approx 27$ К для КЯ HgTe/Cd_{0.65}Hg_{0.35}Te толщиной 6.5 нм.

Было продемонстрировано стимулированное излучение на межзонных переходах с рекордно большой длиной волны $\lambda \approx 10.2$ мкм в гетероструктуре с КЯ HgCdTe/CdHgTe с волноведущими слоями.

Полученные в работе результаты могут быть использованы для создания детекторов в ТГц диапазоне и источников стимулированного излучения в дальнем ИК диапазоне на основе узкозонных структур HgCdTe.

Методология и методы исследования

В работе использовались апробированные методы исследования:

- 1) Измерение вольтамперных и переходных характеристик исследуемых устройств.
- 2) Исследование спектров магнитопоглощения в ТГц и дальнем ИК диапазоне методом фурье-спектрометрии.
- 3) Исследование фотоотклика на ТГц излучение в магнитном поле.
- 4) Исследование магнитотранспортных характеристик при различных температурах.
- 5) Исследование спектров фотолюминесценции методом фурье-спектроскопии в дальнем и среднем ИК диапазонах.

Основные положения, выносимые на защиту

- 1) Исследование нерезонансного фотоотклика ДЭГ при большой концентрации (большом числе заполненных уровней Ландау) в КЯ HgTe/CdHgTe с инвертированным зонным спектром позволяет определять значения критического магнитного поля, соответствующего антипересечению «нулевых» уровней Ландау.

- 2) Исследования нерезонансного фотоотклика и транспорта в двумерном электронном газе в квантующих магнитных полях позволяют визуализировать уровни Ландау и определять момент фазового перехода от инвертированной к нормальной зонной структуре при изменении температуры.
- 3) В волноводных эпитаксиальных структурах, содержащих в активной области узкозонный твердый раствор HgCdTe, при межзонном оптическом возбуждении возможна реализация инверсии населенностей и стимулированного излучения на межзонных оптических переходах на длинах волн, существенно превышающих достигнутое ранее значение 5.3 мкм.
- 4) В волноводных эпитаксиальных структурах с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe с нормальной зонной структурой в активной области пороговый уровень оптического возбуждения снижается более чем на порядок по сравнению с объемным материалом с той же шириной запрещенной зоны, что связывается с подавлением оже-рекомбинации вследствие «симметрии» законов дисперсии электронов и дырок.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Обсуждаемые в работе результаты были получены апробированными в ИФМ РАН и в других лабораториях методами.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XVIII-XXII Международных симпозиумах «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород 2014-2018 г.), 19th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors EDISON19 (Саламанка, Испания, 2015), 8th THz days (Arêches-Beaufort, Франция, 2015), 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON) (9-11 Мая 2016, Краков, Польша), 4 Российском симпозиуме «Полупроводниковые лазеры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 2014), Конференции и школе молодых учёных по актуальным проблемам физики полупроводниковых структур (Новосибирск, 2014), 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (Копенгаген, Дания, 2016), XII и XIII Российских конференциях по физике полупроводников (Ершово, 2015,

Екатеринбург, 2017), XXIV Международной научно-технической конференции, школы молодых специалистов и выставки по фотоэлектронике и приборам ночного видения (24-27 мая 2016 г., Москва), 24th International Symposium “Nanostructures: physics and technologies” (Санкт-Петербург, 2016), 33rd International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS2016) (31.07.2016 – 5.08.2016, Beijing, China), 5th Russia-Japan-USA-Europe Symp. On Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (2016, Tohoku University, Sendai, Japan), Российской конференции по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники "Фотоника 2015" (Новосибирск, 12-16 октября 2015), 4th Russia-Japan-USA Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUS TeraTech-2015) (9-12 Июня, 2015, Черноголовка, Россия), Joint Conference of New Trends in Topological Insulators and 17th International Conference on Narrow Gap Systems (Würzburg, Germany, July 24—29, 2016), а также на семинарах ИФМ РАН.

Публикации

По теме диссертации опубликованы 32 печатные работы, в том числе 10 статей в реферируемых журналах и 22 публикации в сборниках тезисов докладов и трудов конференций, симпозиумов и совещаний. Все вышеперечисленное в совокупности свидетельствует о достоверности полученных результатов и сделанных на их основании выводов.

Личный вклад автора

Все результаты настоящей диссертации получены автором лично или при его непосредственном участии. Вклад автора является определяющим при подготовке и проведении исследований спектров ТГц фотоотклика и магнитотранспортных характеристик структур на основе квантовых ям HgTe/CdHgTe, и равнозначным (совместно с научным руководителем и В.В. Румянцевым) при исследовании спектров фотолюминесценции и стимулированного излучения эпитаксиальных пленок твердого раствора HgCdTe и гетероструктур с КЯ HgCdTe/CdHgTe.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из **Введения**, **основной части**, **Заключения** и списка используемой литературы. Объем диссертации составляет 164 страницы, включая 68 рисунков и три таблицы. Список цитируемой литературы содержит 154 наименования.

Содержание работы

Основная часть работы делится на две **Главы**, первая из которых посвящена исследованию суб-ТГц фототклика и магнитотранспорта структур с КЯ HgTe/CdHgTe, а вторая — исследованию излучательных свойств структур на основе соединений HgCdTe с целью создания источников стимулированного излучения. Каждая глава основной части содержит обзор литературы, теоретическое обоснование, исследовательскую часть и заключение.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформированы цели и задачи работы, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена исследованию ТГц фотоотклика гетероструктур и магнитотранспорта гетероструктур с КЯ HgTe/CdHgTe. В разделе 1.1 даются общие сведения о свойствах структур на основе HgCdTe и обсуждаются предпосылки использования их в качестве детекторов ТГц излучения. В разделе 1.2 обсуждаются основные механизмы возникновения фотоотклика на ТГц излучение, в пункте 1.2.3 приводится обзор литературы. В разделе 1.3 даётся описание исследуемых в главе 1 гетероструктур и устройств, выполненных на их основе. В разделе 1.4 обсуждаются результаты исследования ТГц фотоотклика транзистора, выполненного на основе двумерного топологического изолятора с КЯ HgTe/CdHgTe. Раздел 1.5 посвящен исследованию холловского мостика с затвором, выполненным на основе двумерного топологического изолятора с КЯ HgTe/CdHgTe, где в подразделе 1.5.2 топологический фазовый переход под действием температуры исследуется

магнитотранспортными методами, а в подразделе 1.5.3 - методом ТГц фотоотклика. В результате исследования магнитотранспортных характеристик холловского мостика с затвором, выполненным на основе топологического изолятора с КЯ HgTe/CdHgTe, был впервые наглядно продемонстрирован топологический фазовый переход при увеличении температуры. «Визуализируя» «нулевые» уровни Ландау удалось определить значения критического магнитного поля B_c при различных температурах. На Рис. 1 сравниваются значения критического магнитного поля B_c , определённого из анализа поперечной (холловской) проводимости σ_{xy} и продольной проводимости σ_{xx} с расчётными значениями (в рамках модели Кейна 8×8 с

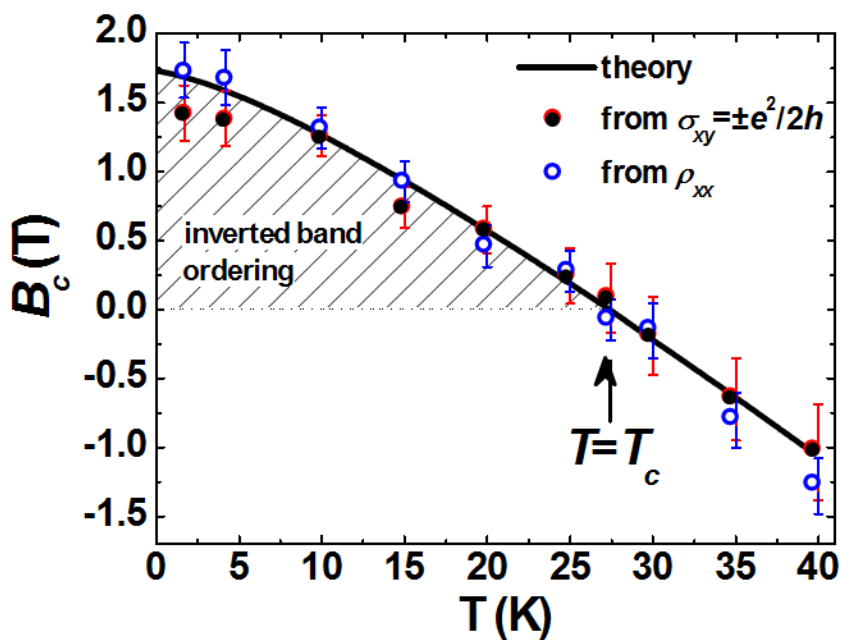


Рис. 1. Сравнение теоретических (сплошная кривая) и полученных в ходе эксперимента (открытые символы) значений критического магнитного поля B_c от температуры.

параметрами, зависящими от температуры). Погрешность определения критического магнитного поля B_c возрастает с увеличением температуры в связи с размытием уровней Ландау вследствие рассеяния на фононах. Как видно из рисунка теоретические значения критического магнитного поля достаточно хорошо согласуются с

полученными в ходе эксперимента, что свидетельствует о наблюдении топологического фазового перехода и позволяет определить критическую температуру, которая составляет $T_c \approx 27$ К.

Одновременно с этим при исследованиях ТГц фотоотклика этого же образца при различных затворных напряжениях и значениях магнитного поля была получена карта уровней Ландау. Пересечение «нулевых» уровней Ландау также позволило определить величину критического магнитного поля, которое составило $B_c \approx 0.7$ Тл при 2 К в отличие от значения $B_c \approx 1.5$ Тл, полученного из анализа

магнитотранспортных данных. Данное рассогласование может быть следствием как разогрева двумерного электронного газа ТГц излучением, так и разогрева непосредственно самого канала холловского мостика протекающим током, величина которого более чем на два порядка превосходила ток, используемый в ходе магнитотранспортных измерений.

Во **2-ой главе** исследуется возможность использования узкозонных структур HgCdTe в качестве источников излучения дальнего ИК диапазона. В разделе 2.1 обсуждаются предпосылки получения в данных структурах стимулированного излучения (СИ) в дальнем ИК диапазоне (2.1.1) и основные механизмы межзонной рекомбинации (п. 2.1.2). В разделе 2.2 изложена методика исследования, а в разделе 2.3 описаны сами исследуемые структуры. Раздел 2.4 посвящён изучению стимулированного излучения из эпитаксиальной плёнки с объёмным слоем твёрдого раствора HgCdTe, а 2.5 — стимулированного излучения в гетероструктурах с КЯ HgTe/CdHgTe и толстыми волноведущими барьерами. Показано, что структуры на основе HgCdTe являются перспективными для использования в качестве лазеров в среднем ИК диапазоне. В волноводной эпитаксиальной структуре с активным слоем твердого раствора $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с содержанием Cd $x \approx 0.22$ при $T = 100$ К было обнаружено возникновение суперлюминесценции, проявляющееся в обужении линии излучения на длине волны $\lambda \approx 8.4$ мкм и сверхлинейным ростом ее интенсивности при увеличении мощности межзонного оптического возбуждения. Эффект связывается с насыщением канала безызлучательной рекомбинации Шокли — Рида — Холла при большой мощности возбуждения. При дальнейшем увеличении мощности возбуждения наблюдалось насыщение интенсивности излучения, что обусловлено уменьшением локализации TE моды волновода вследствие изменения показателя преломления активного слоя при увеличении концентрации неравновесных носителей. При исследовании СИ структур с КЯ HgTe/CdHgTe с толстыми барьерными слоями, используемыми в качестве диэлектрических волноводов СИ было обнаружено вплоть до длин волн $\lambda = 10.2$ мкм, что практически в два раза превосходит лучшие результаты, опубликованные ранее в литературе. На Рис. 2

представлены спектры СИ исследуемых структур при температурах $T = 18$ и 80 К. Полуширины линий СИ составляют $2 - 4$ мэВ при температуре 18 К, в то время как этот же параметр для спектров спонтанной ФЛ превышает 10 мэВ. При увеличении мощности возбуждения были обнаружены как обужение линии излучения до менее $1k_B T$, так и пороговый характер возникновения линии СИ. При этом увеличение длины волны СИ от 4 мкм до 10.2 мкм не сопровождалось значительным возрастанием пороговой плотности мощности возбуждения, которая для СИ на длине волны 10.2 мкм составила 0.12 кВт/см² и 1 кВт/см² при 80 К. Продемонстрировано, что структуры на основе HgCdTe могут использоваться в качестве активной среды для длинноволновых лазеров ИК диапазона.

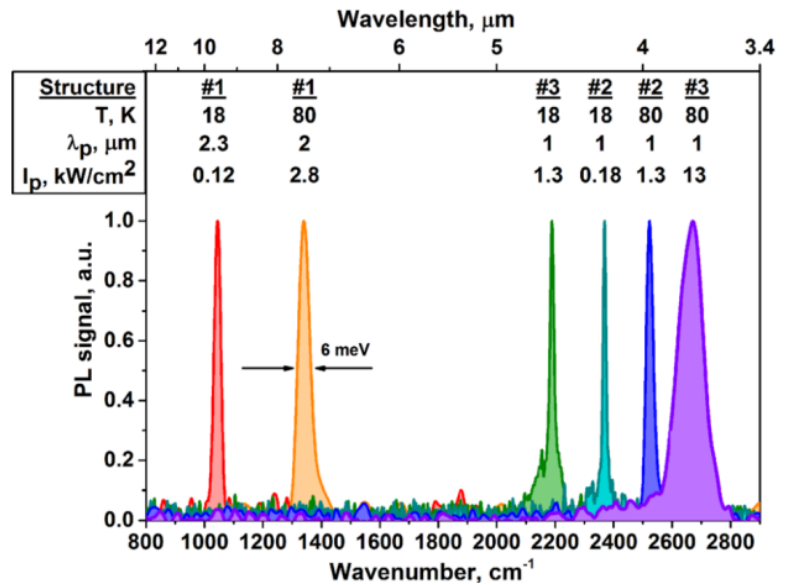


Рис. 2. Спектры СИ исследуемых структур, полученные при различных значениях (подписаны сверху) температуры (T), длины волны возбуждения (λ_p) и плотности мощности возбуждения (I_p).

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты работы

- 1) 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 ≈ 6 Тл связано с топологическим переходом между состоянием инвертированной и нормальной зонной структуры при изменении величины магнитного поля.
- 2) 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.

3) В холловском мостике с затвором, выполненном на основе гетероструктуры с КЯ HgTe/CdHgTe толщиной 6.5 нм, были получены карты уровней Ландау магнитотранспортным методом при температурах от 1.7 до 40 К. При этом впервые наблюдался топологический фазовый переход при изменении температуры вблизи ≈ 27 К.

4) В эпитаксиальной плёнке $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с содержанием $x_{\text{Cd}} \approx 0.22$ при температуре 100 К за счёт подавления безызлучательной рекомбинации Шокли — Рида — Холла при увеличении мощности возбуждения обнаружено стимулированное излучение на длине волны $\lambda \approx 8.4$ мкм, сопровождающееся обужением линии фотолюминесценции и сверхлинейным ростом интенсивности при увеличении мощности возбуждения. При дальнейшем увеличении мощности возбуждения обнаружилось насыщение интенсивности линии фотолюминесценции, что связано с уменьшением локализации TE моды в активном слое из-за уменьшения эффективного показателя преломления активного слоя при увеличении концентрации неравновесных носителей.

5) В гетероструктурах с узкими КЯ HgCdTe/CdHgTe толщиной 3.65 нм и волноведущими слоями за счёт подавления Оже-рекомбинации (по сравнению с объёмными слоями твёрдого раствора HgCdTe) получено стимулированное излучение с наибольшей длиной волны $\lambda \approx 10.2$ мкм, сопровождающееся обужением линии фотолюминесценции вплоть до ≈ 1 кВТ при температуре 80 К и сверхлинейным ростом интенсивности при увеличении мощности возбуждения. При этом пороговая плотность мощности составила ≈ 0.12 кВт/см² при 18 К и 1 кВт/см² при 80 К.

Таким образом, в работе продемонстрированы широкие перспективы структур на основе HgCdTe для использования в качестве длинноволновых излучателей и детекторов в ТГц диапазоне частот.

Список цитируемой литературы

1. Dyakonov, M. *Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor: New mechanism of plasma wave generation by dc current* / Dyakonov M., Shur M. // Phys. Rev. Lett. American Physical Society – 1993. - Vol. 71. - P. 2465–2468
2. Dyakonov, M. *Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid* / Dyakonov M., Shur M. // IEEE Trans. Electron Devices – 1996. - Vol.43. - №3. - P.380–387
3. Knap, W. *Nonresonant detection of terahertz radiation in field effect transistors* / W. Knap, V. Kachorovskii, Y. Deng, S. Romyantsev, J.-Q. Lu, R. Gaska, M. S. Shur, G. Simin, X. Hu, and M. Asif Khan, C. A. Saylor, L. C. Brunel // J. Appl. Phys. American Institute of Physics AIP – 2002. - Vol. 91. - №11. - P. 9346–9353
4. Knap, W. *Resonant detection of subterahertz and terahertz radiation by plasma waves in submicron field-effect transistors* / Knap, W., Deng, Y., Romyantsev, S., & Shur, M. S. // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics AIP – 2002. - Vol. 81. - №24. - P. 4637–4639
5. Knap, W. *Resonant detection of subterahertz radiation by plasma waves in a submicron field-effect transistor* / Knap, W., Deng, Y., Romyantsev, S., Lü, J. Q., Shur, M. S., Saylor, C. A., & Brunel, L. C. // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics AIP – 2002. - Vol. 80. - №18. - P. 3433–3435
6. Vitiello, M.S. *Quantum cascade lasers: 20 years of challenges* / Vitiello, M. S., Scalari, G., Williams, B., & De Natale, P. // Opt. Express. Optical Society of America – 2015. - Vol. 23. - №4. - P. 5167
7. Sergachev, I. *Gain-guided broad area quantum cascade lasers emitting 23.5 W peak power at room temperature* / Sergachev, I., Maulini, R., Bismuto, A., Blaser, S., Gresch, T., & Muller, A. // Opt. Express. Optical Society of America – 2016. - Vol. 24. - №17. - P. 19063
8. Bandyopadhyay, N. *High power operation of $\lambda = 5.2\text{--}11\ \mu\text{m}$ strain balanced quantum cascade lasers based on the same material composition* / Bandyopadhyay, N., Bai, Y., Slivken, S., & Razeghi, M. // Appl. Phys. Lett. AIP Publishing - 2014 - Vol. 105. - №7. - P. 071106
9. Lu, Q.Y. *Continuous operation of a monolithic semiconductor terahertz source at room temperature* / Lu, Q. Y., Bandyopadhyay, N., Slivken, S., Bai, Y., & Razeghi, M. // Appl. Phys. Lett. AIP Publishing - 2014. - Vol. 104. - №22. - P. 221105
10. Lu, Q.Y. *Widely tunable room temperature semiconductor terahertz source* / Lu, Q. Y., Slivken, S., Bandyopadhyay, N., Bai, Y., & Razeghi, M // Appl. Phys. Lett. AIP Publishing - 2014. - Vol. 105. - № 20. - P. 201102

11. Williams, B.S. *Terahertz quantum-cascade lasers* / Williams B.S. // Nat. Photonics. Nature Publishing Group - 2007. - Vol.1. - №9. - P. 517–525
12. Xu, G. *Surface-emitting terahertz quantum cascade lasers with continuous-wave power in the tens of milliwatt range* / Xu, G., Li, L., Isac, N., Halioua, Y., Giles Davies, A., Linfield, E. H., & Colombelli, R. // Appl. Phys. Lett. AIP Publishing - 2014. - Vol. 104. - №9. - P. 091112
13. Kurbatov, L.N. *Far-IR heterojunction lasers tunable to 46.2 microns* / Kurbatov, L. N.; Britov, A. D.; Karavaev, S. M.; Sivachenko, S. D.; Maksimovskii, S. N.; Ovchinnikov, I. I.; Rzaev, M. M.; Starik, P. M. // J. Exp. Theor. Phys. Lett. - 1983. - Vol. 37 - № 9. - P. 499–502
14. Maremyanin, K. V. *Terahertz injection lasers based on PbSnSe alloy with an emission wavelength up to 46.5 μm* / Maremyanin, K. V., Rummyantsev, V. V., Ikonnikov, A. V., Bovkun, L. S., Chizhevskii, E. G., Zaslavitskii, I. I., & Gavrilenko, V. I. // Semiconductors. Pleiades Publishing - 2016. - Vol. 50 - №12. - P. 1669–1672
15. Mikhailov, N.N. *Growth of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ nanostructures by molecular beam epitaxy with ellipsometric control* / Mikhailov, N. N., Smirnov, R. N., Dvoretzky, S. A., Sidorov, Y. G., Shvets, V. A., Spesivtsev, E. V., & Rykhlytski, S. V. // Int. J. Nanotechnol. - 2006. - Vol. 3 - №1. - P. 120
16. Dvoretzky, S. *Growth of HgTe Quantum Wells for IR to THz Detectors* / Dvoretzky, S., Mikhailov, N., Sidorov, Y., Shvets, V., Danilov, S., Wittman, B., & Ganichev, S. // J. Electron. Mater. Springer US - 2010. - Vol. 39 - № 7. - P. 918–923
17. Varavin, V.S. *HgCdTe epilayers on GaAs: growth and devices* / Varavin, V. S., Vasiliev, V. V., Dvoretzky, S. A., Mikhailov, N. N., Ovsyuk, V. N., Sidorov, Yu.G. Sidorov & Aseev, A. L. // Opto-Electronics Review. International Society for Optics and Photonics - 2003. - Vol. 11 - №2. - P. 99–111
18. Marcinkiewicz, M. *Temperature-driven single-valley Dirac fermions in HgTe quantum wells* / M. Marcinkiewicz, S. Ruffenach, S. S. Krishtopenko, A. M. Kadykov, C. Consejo, D. B. But, W. Desrat, W. Knap, J. Torres, A. V. Ikonnikov, K. E. Spirin, S. V. Morozov, V. I. Gavrilenko, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, and F. Teppe // Phys. Rev. B. American Physical Society - 2017. - Vol. 96 - №3. - P. 035405
19. Ikonnikov, A.V. *Temperature-dependent magnetospectroscopy of HgTe quantum wells* / A. V. Ikonnikov, S. S. Krishtopenko, O. Drachenko, M. Goiran, M. S. Zholudev, V. V. Platonov, Yu. B. Kudasov, A. S. Korshunov, D. A. Maslov, I. V. Makarov, O. M. Surdin, A. V. Philippov, M. Marcinkiewicz, S. Ruffenach, F. Teppe, W. Knap, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, and V. I. Gavrilenko // Phys. Rev. B. American Physical Society - 2016. - Vol. 94 - №15. - P. 155421
20. Wiedmann, S. *Temperature-driven transition from a semiconductor to a topological insulator* / Wiedmann, S., Jost, A., Thienel, C., Brüne, C., Leubner, P., Buhmann,

Molenkamp L. W., Maan J. C. & Zeitler, U. // Phys. Rev. B. American Physical Society - 2015. - Vol. 91 - № 20. - P. 205311

21. Arias, J.M. *HgCdTe infrared diode lasers grown by MBE* / Arias, J. M., Zandian, M., Zucca, R., & Singh, J. // Semicond. Sci. Technol. IOP Publishing - 1993. - Vol. 8 - №1S. - P. S255–S260.
22. Morozov, S.V. *Efficient long wavelength interband photoluminescence from HgCdTe epitaxial films at wavelengths up to 26 μm* / Morozov, S. V., Rummyantsev, V. V., Antonov, A. V., Maremyanin, K. V., Kudryavtsev, K. E., Krasilnikova, L. V., Mikhailov N. N., Dvoretiskii S. A. & Gavrilenko, V. I. // Appl. Phys. Lett. - 2014. - Vol. 104 - № 7. - P. 072102.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

- A1. 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.
- A2. Ruffenach, S. *HgCdTe-based heterostructures for terahertz photonics* / Kadykov A.M., Rummyantsev 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., Dvoretiskii S.A., Gavrilenko V.I., Morozov S.V., Teppe F. // Appl. Phys. Lett. Materials. - 2017. – Vol. 5 - №3 - P. 35503.
- A3. Morozov S. V. *Long wavelength stimulated emission up to 9.5 μm from HgCdTe quantum well heterostructures* / Rummyantsev V. V., Kadykov A. M., Dubinov A. A., Kudryavtsev K. E., Antonov A. V., Mikhailov N. N., Dvoretiskii S. A. and Gavrilenko V. I. // Appl. Phys. Lett. – 2016. – Vol. 108 – 092104.
- A4. 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., Dvoretiskii S. A. and Teppe F. // Applied Physics Letters. – 2016. – Vol. 108. – №. 26. – P. 262102.
- A5. Morozov S. V. *Long wavelength superluminescence from narrow gap HgCdTe epilayer at 100 K* / Rummyantsev, V. V., Dubinov, A. A., Antonov, A. V., Kadykov, A. M., Kudryavtsev, K. E., Kuritsin, D. I., Mikhailov, N. N., Dvoretiskii, S. A., Gavrilenko, V. I. // Applied Physics Letters. – 2015. – Vol. 107. – №. 4. – P. 042105.
- A6. 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.

- A7. Kadykov A. M. *Observation of topological phase transition by terahertz photoconductivity in HgTe based transistors* / C. Consejo, M. Marcinkiewicz, L. Viti, M. S. Vitiello, S. S. Krishtopenko, S. Ruffenach, S. V. Morozov, W. Desrat, N. Dyakonova, W. Knap, V. I. Gavrilenko, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, and F. Teppe // *physica status solidi (c)*. – 2016. – Vol. 13. – №. 7-9. – P. 534-537.
- A8. Morozov S. V. *Investigation of possibility of VLWIR lasing in HgCdTe based heterostructures* / Morozov S.V., Rumyantsev V.V., Kadykov A.M., Dubinov A.A., Antonov A.V., Kudryavtsev K.E., Kuritsin D.I., Mikhailov N.N., Dvoretzky S.A., Teppe F., Gavrilenko V.I. // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2015. – Vol. 647. – №. 1. – P. 012008.
- A9. Kadykov A. *Terahertz excitations in HgTe-based field effect transistors* / C. Consejo, F. Teppe, W. Desrat, L. Viti, M. S. Vitiello, D. Coquillat, S. Ruffenach, S. Morozov, S. Kristopenko, M. Marcinkiewicz, N. Dyakonova, W. Knap, V. Gavrilenko, N. N. Michailov, S.A. Dvoretzky. // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2015. – Vol. 647. – №. 1. – P. 012009.
- A10. Румянцев В. В. *Длинноволновое стимулированное излучение и времена жизни носителей в волноводных структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe* / Фадеев М.А., Морозов С.В., Дубинов А.А., Кудрявцев К.Е., Кадыков А.М., Тузов И.В., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Гавриленко В.И., Тeppe F // *Физика и техника полупроводников*. – ФТИ им. А.Ф. Иоффе – 2016. – Vol. 50. – №. 12. – P. 1679-1684.

Кадыков Александр Михайлович

**Фотоотклик и стимулированное излучение в структурах на
основе соединений HgCdTe в среднем и дальнем ИК диапазонах**

Автореферат

Подписано к печати . Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН — филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики Российской академии наук»

603950, Нижний Новгород, ГСП-105