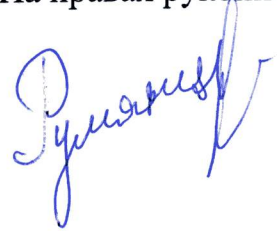


На правах рукописи



Румянцев Владимир Владимирович

**Фотопроводимость и фотолюминесценция
эпитаксиальных пленок и структур с квантовыми ямами
на основе HgCdTe в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне**

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 - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН)

Научный руководитель: Гавриленко Владимир Изяславович,
доктор физико-математических наук,
зам. директора ИФМ РАН

Официальные оппоненты: Мынбаев Карим Джафарович,
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией фотоэлектрических
явлений в полупроводниках
Физико-технического института
им. А.Ф. Иоффе РАН

Фирсов Дмитрий Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой физики
полупроводников и наноэлектроники
радиофизического факультета Санкт-
Петербургского государственного
политехнического университета

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени
М. В. Ломоносова»

Защита состоится 25 декабря 2014 г. в 14 часов на заседании диссертационного
совета Д 002.098.01 при Институте физики микроструктур РАН (607680,
Нижегородская обл., Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ РАН.

Автореферат разослан “__” ноября 2014 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор


Гайкович К.П.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В настоящее время твердые растворы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (кадмий-ртуть-теллур, КРТ) занимают лидирующее положение среди материалов, на основе которых разрабатываются фотоэлектрические детекторы излучения среднего инфракрасного диапазона, в том числе на окна прозрачности атмосферы 3 – 5 мкм и 8 – 14 мкм. Благодаря тому, что HgTe обладает инвертированной зонной структурой или, иначе, «отрицательной» шириной запрещенной зоны, в твердом растворе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ можно получить произвольную ширину запрещенной зоны от 0 до 1,6 эВ. Гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ открывают дополнительные возможности по управлению энергией межзонных переходов и «дизайну» энергетического спектра носителей.

Тем не менее, несмотря на большое количество информации по технологии и свойствам этих соединений, полученной за годы исследований, свойства узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, отвечающих составам с $x < 0,2$ и энергиям межзонных переходов менее 100 мэВ, остались плохо изученными. Считается, что «продвижению» объемных КРТ структур в длинноволновую область (красная граница фундаментального поглощения $\lambda > 15$ мкм) препятствуют флуктуации состава твердого раствора x , что при малых значениях ширины запрещенной зоны E_g приводит к недопустимо большим флуктуациям E_g .

Современные методы молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяют проводить рост слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при низких температурах и выращивать как эпитаксиальные слои $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ высокого качества с $x < 0,2$, так и структуры с КЯ на основе узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Это привело к возрождению интереса к таким системам, в которых был продемонстрирован ряд «экзотических» фундаментальных эффектов, в том числе гигантское расщепление Рашбы, антипересечение уровней Ландау электронов и дырок, наличие состояний топологического изолятора. Однако, помимо фундаментального интереса,

возможность получения сколь угодно узкой запрещённой зоны делает системы на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ привлекательными и для приложений, в частности, для приборов дальней инфракрасной и терагерцовой оптоэлектроники (диапазон длин волн $\lambda > 20$ мкм). Естественной представляется задача продвижения $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ приемников в дальний инфракрасный диапазон. Кроме того, благодаря улучшению качества материала возникают и предпосылки для создания длинноволновых источников излучения на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Так, в квантовых ямах из «инвертированного» материала с барьерами из «нормального» материала существует критическое значение толщины ямы, при котором ширина запрещённой зоны обращается в ноль, а электроны и дырки имеют линейный, «графеноподобный» закон дисперсии. Многочисленные работы, посвященные созданию длинноволновых лазеров на основе графена, позволяют рассматривать вопрос о возможности перенесения полученных в этих работах результатов на существенно более гибкие с точки зрения технологии гетеросистемы на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

Решение вышеперечисленных задач требует изучения оптических свойств материала в соответствующем диапазоне длин волн, а также процессов межзонной рекомбинации носителей в полупроводниковых структурах на основе узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Учитывая, что темпы рекомбинации во многом определяются уровнями в запрещенной зоне, данная задача неразрывно связана со спектроскопией примесей и дефектов в исследуемых образцах.

Таким образом, достигнутое в последние годы существенное улучшение качества эпитаксиальных слоев и гетероструктур с КЯ на основе узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ делает актуальной задачу об изучении оптических свойств данных материалов в длинноволновых участках спектра (диапазон длин волн $\lambda > 20$ мкм) с целью создания источников и приемников излучения соответствующего диапазона.

Степень разработанности темы исследований

Большая часть исследований твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ выполнена для значений $x > 0,2$, при которых длина волны излучения, соответствующая ширине запрещенной зоны материала, попадает в диапазон $\lambda < 15$ мкм. Меньшая степень изученности более узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ связана со сложностью получения материала с низким содержанием кадмия [1]. В последние десятилетия наблюдается прогресс в технологии роста эпитаксиальных структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, как объемных слоев [2], так и гетероструктур $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ с КЯ [3] с шириной запрещенной зоны менее 100 мэВ, однако их свойства плохо изучены. Так, не была исследована фотопроводимость узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с $x < 0,2$, и структур с квантовыми ямами с красной границей межзонных переходов, отвечающей длинам волн более 20 мкм.

Времена рекомбинации в твердых растворах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ также в основном изучались для $x > 0,2$ [4-8]. Было установлено, что основным механизмом рекомбинации в твердых растворах с $x \sim 0,2$ и низкой темновой концентрацией носителей является рекомбинация Шокли-Рида-Холла [7], но остался открытым вопрос о роли излучательной и оже-рекомбинации при высокой концентрации носителей [6]. Таким образом, неисследованным остался излучательный потенциал таких структур. В частности, в литературе практически нет данных о люминесценции из полупроводниковых структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в длинноволновом диапазоне (длины волн более 15 мкм), в то время как исследование излучательных свойств таких систем представляется перспективным с точки зрения создания лазеров на диапазон 20 – 50 мкм, недоступный для приборов на основе полупроводников АЗВ5 из-за сильного решеточного поглощения.

Таким образом, процессы фотопроводимости и фотолюминесценции в узкозонных полупроводниковых структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в длинноволновом диапазоне (длина волны более 15 мкм) остаются неисследованными, несмотря на очевидную важность данной тематики для практических приложений.

Основные цели работы

Основной целью диссертационной работы являлось получение нового научного знания о свойствах эпитаксиальных слоев и гетероструктур с КЯ на основе узкозонных и бесщелевых твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Это включает в себя решение следующих задач:

1. Исследование спектров фотопроводимости эпитаксиальных слоев и гетероструктур на основе узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и выявление особенностей, обусловленных наличием примесей и дефектов. Изучение трансформации спектров фотопроводимости при изменении температуры, сравнительный анализ спектров фотопроводимости и зонной структуры образцов; выявление хвостов плотности состояний в запрещенной зоне.
2. Исследование кинетики фотопроводимости и времен жизни носителей в эпитаксиальных слоях и гетероструктурах с квантовыми ямами на основе узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Оценка предельной чувствительности и эквивалентной мощности шума приемников на основе исследуемых структур, выявление доминирующих механизмов межзонной рекомбинации носителей при различных интенсивностях оптического возбуждения.
3. Исследование спектров фотолюминесценции эпитаксиальных слоев и гетероструктур с КЯ на основе узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в условиях непрерывного и импульсного оптического возбуждения при различных температурах; выявление особенностей, обусловленных наличием примесей и дефектов, сопоставление результатов с имеющимися литературными данными.
4. Исследование кинетики фотолюминесценции эпитаксиальных слоев и гетероструктур с КЯ на основе узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, сравнение кинетики фотопроводимости и фотолюминесценции при разных температурах и при различной интенсивности возбуждающего излучения, оценка необходимой мощности оптической накачки для обеспечения инверсной населенности в исследуемых структурах.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Идентифицированы особенности спектров фотопроводимости эпитаксиальных слоев узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ n-типа как обусловленные резонансными состояниями акцепторов, переходы в которые ранее наблюдались только для бесщелевых составов материала.
2. Исследована кинетика релаксации межзонной фотопроводимости в эпитаксиальных слоях твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и гетероструктурах с квантовыми ямами на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в длинноволновом ИК диапазоне, ранее исследовавшаяся лишь в структурах с шириной запрещенной зоны, соответствующей энергиям квантов среднего ИК диапазона, и продемонстрировано, что с ростом уровня возбуждения доминирующим механизмом рекомбинации становится излучательная, а не оже-рекомбинация, как полагалось ранее.
3. Исследованы спектры межзонной фотолуминесценции в длинноволновом ИК диапазоне вплоть до 26 мкм в эпитаксиальных слоях узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, ранее изученные лишь до длин волн 12-16 мкм.
4. Исследования спектров фотолуминесценции с временным разрешением в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с шириной запрещенной зоны 60-80 мэВ показали, что время релаксации фотолуминесценции в квантовых ямах при интенсивном оптическом возбуждении может достигать 5 мкс, что на 2 порядка превышает известное для таких структур время релаксации межзонной фотопроводимости при слабом возбуждении. Эффект связывается с насыщением канала безызлучательной рекомбинации по механизму Шокли-Рида-Холла.
5. В гетероструктурах с квантовыми ямами при импульсном оптическом возбуждении обнаружена полоса фотолуминесценции в области длин волн ~ 3 мкм, обусловленная переходами с участием глубоких центров в барьерных слоях $\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$, которые ранее наблюдались в более длинноволновом диапазоне в твердых растворах с меньшим содержанием Cd $x = 0,2-0,4$, на фоне которой при низкой температуре $T = 18$ К наблюдается узкая (20 см^{-1}) линия излучения, которая может быть связана со стимулированным излучением.

Теоретическая и практическая значимость работы

Научная значимость работы заключается в получении нового научного знания об оптических свойствах и процессах рекомбинации в эпитаксиальных слоях $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и гетероструктурах с квантовыми ямами на основе узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в терагерцовом, дальнем инфракрасном и среднем инфракрасном диапазонах. Обнаружены резонансные состояния акцепторов в эпитаксиальных слоях узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Впервые продемонстрирована межзонная фотолюминесценция на длинах волн вплоть до 26 мкм в эпитаксиальных слоях $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Показано, что в гетероструктурах с квантовыми ямами температурное гашение фотолюминесценции выражено слабее по сравнению с объемными образцами с близкой шириной запрещенной зоны и сигнал фотолюминесценции сохраняется до комнатной температуры.

Измерены времена рекомбинации носителей и оценены характеристики потенциального приемника, которые могут быть реализованы на базе исследуемых структур. Большое время спада сигнала фотолюминесценции указывает на перспективность квантовых ям на основе узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ как активной среды для генерации длинноволнового излучения на межзонных переходах. Таким образом, полученные в диссертации результаты могут быть использованы при создании новых оптоэлектронных приборов терагерцового и дальнего инфракрасного диапазона.

Методология и методы исследования

В работе использованы апробированные методики исследования. Оптические свойства эпитаксиальных слоев и гетероструктур с квантовыми ямами на основе узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ исследовались методами фурье-спектроскопии фотопроводимости и спектроскопии люминесценции с временным разрешением. Для изучения процессов рекомбинации и времени жизни носителей использовалась прямая методика исследования кинетики релаксации фотопроводимости при межзонном возбуждении короткими (1,5 пс – 7 нс) импульсами длинноволнового излучения.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Особенности в виде резких пиков в окрестности 150 см^{-1} и 270 см^{-1} , наблюдаемые в спектрах фотопроводимости узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при низких температурах, обусловлены наличием резонансных с континуумом зоны проводимости состояний акцепторов.
2. В эпитаксиальных слоях объемного твердого раствора $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21 - 0,23$), выращенных методом МЛЭ, зависимость времени релаксации фотопроводимости от ширины запрещенной зоны на начальном участке кинетики фотоотклика указывает на доминирующую роль излучательной рекомбинации носителей в условиях сильного возбуждения.
3. В эпитаксиальных слоях объемного твердого раствора $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ обнаружена межзонная фотолюминесценция в длинноволновом ИК диапазоне вплоть до длины волны 26 мкм при $x = 0,19$. Показано, что в структурах с квантовыми ямами температурное гашение фотолюминесценции выражено слабее, чем в объемных твердых растворах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с близкой шириной запрещенной зоны.
4. Время релаксации межзонной фотолюминесценции в структурах с квантовыми ямами с шириной запрещенной зоны в диапазоне $480 - 650 \text{ см}^{-1}$ возрастает с увеличением интенсивности оптического возбуждения до 5 мкс при концентрации неравновесных носителей выше 10^{13} см^{-2} , что должно приводить к усилению на межзонных оптических переходах.
5. В гетероструктурах с квантовыми ямами с барьерными слоями $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ обнаружена новая линия фотолюминесценции на частоте 2700 см^{-1} , соответствующая энергиям переходов меньше половины ширины запрещенной зоны в барьерах. Долговременная (единицы микросекунд) кинетика нарастания и спада интенсивности линии позволяет связать ее с переходами с участием глубоких центров (ловушек). При низкой температуре (18 К) на коротковолновом краю линии возникает узкий (20 см^{-1}) пик, предположительно связанный со стимулированным излучением.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность результатов исследований, представленных в диссертации, обеспечивается применением апробированных в ИФМ РАН и в других исследовательских центрах методик. Результаты экспериментальных исследований приводятся в сопоставлении с теоретическими расчетами, а также с другими данными, представленными в литературе. Основные результаты диссертации докладывались на XVI - XVIII Международных симпозиумах «Нанозоника и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2012, 2013, 2014 г.); 13 и 15 Всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2011, 2013 г.); 11 Российской конференции по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2013 г.); XXII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2012 г.); 16 Международной конференции «International Conference on Solid Films and Surfaces» (Генуя, Италия, 2012 г.); а также на семинарах ИФМ РАН. Все вышеперечисленное в совокупности свидетельствует о достоверности полученных результатов и сделанных на их основании выводов.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 28 печатных работ, в том числе 6 статей в реферируемых журналах и 22 публикации в сборниках тезисов докладов и трудов конференций и симпозиумов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 126 страниц, включая 58 рисунков и 3 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 109 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, показана научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели работы, приведены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 представляет собой обзор литературы по теме диссертации. В первом параграфе дано определение узкозонных полупроводников, к числу которых относятся исследуемые в работе твердые растворы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, отмечены их основные свойства и использование в приложениях. Во втором параграфе приведены базовые сведения о процессах межзонного поглощения света в твердых растворах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Третий параграф посвящен описанию процессов рекомбинации носителей в узкозонных полупроводниках на примере твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Параграф 1.4 содержит обзор литературных данных по уровням примесей и дефектов, наблюдавшихся ранее в твердых растворах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. В параграфе 1.5 приведен краткий обзор предшествующих исследований фотолюминесценции и стимулированного излучения в среднем инфракрасном диапазоне в структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

Глава 2 посвящена исследованию спектров фотопроводимости эпитаксиальных слоев узкозонных и бесщелевых твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, а также гетероструктур с квантовыми ямами на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне.

В параграфе 2.1 приведены сведения об исследуемых образцах. В параграфе 2.2 описана использованная в данной работе методика регистрации спектров фотопроводимости. Параграф 2.3 посвящен исследованию длинноволнового края спектров фотопроводимости исследуемых образцов. Показано, что резкость длинноволновой границы спектров одинакова для объемных эпитаксиальных слоев узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и гетероструктур с квантовыми ямами, как из чистого HgTe , так и для ям с добавлением Cd .

Параграф 2.4 посвящен особенностям спектров фотопроводимости, обусловленным не межзонными переходами, а переходами с участием уровней,

создаваемых дефектами кристаллической решетки. В узкозонных твердых растворах n-типа (ширина запрещенной зоны менее 100 см^{-1}) установлено наличие состояний акцепторов с энергиями $\sim 150 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 270 \text{ см}^{-1}$, попадающих в континуум зоны проводимости, т.е. являющихся резонансными. Идентификация данных состояний проведена путем измерения спектров фотопроводимости в магнитном поле. С увеличением магнитного поля ширина запрещенной зоны материала увеличивается за счет квантования Ландау электронов, и уровни акцепторов, на которые относительно слабое магнитное поле (до 3 Т) не влияет, выходят из зоны проводимости, что приводит к исчезновению резких пиков чувствительности на спектрах фотопроводимости. Аналогичным образом данные состояния могут быть выявлены в измерениях спектров фотопроводимости при различных температурах. Показано, что подобные спектральные линии наблюдаются и в структурах с КЯ, исследовано их температурное гашение.

Глава 3 посвящена исследованию кинетики релаксации фотопроводимости в эпитаксиальных слоях узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и гетероструктурах с квантовыми ямами на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

Параграф 3.1 содержит описание методики измерения кинетики фотопроводимости, применяемой в данной работе.

В параграфе 3.2 представлены результаты исследования кинетики фотопроводимости в условиях слабого возбуждения, когда форма сигнала фотоотклика экспоненциальна. Установлено, что времена релаксации фотопроводимости увеличиваются с ростом ширины запрещенной зоны, что свидетельствует о доминировании безызлучательного механизма рекомбинации Шокли-Рида-Холла. Показано, что среди исследованных образцов время релаксации фотопроводимости в КЯ меньше, чем в объемных твердых растворах с близкой шириной запрещенной зоны. В конце параграфа приведены оценки чувствительности и эквивалентной мощности шума приемника (длина волна 20 мкм при $T = 77 \text{ К}$), который может быть создан на основе исследуемых образцов.

В параграфе 3.3 приведены результаты исследований кинетики релаксации фотопроводимости в условиях сильного возбуждения. Показано, что при

интенсивном возбуждении объемных эпитаксиальных слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21 - 0,23$) на осциллограмме фотоотклика возникает быстрый неэкспоненциальный участок спада. Форма данного участка близка к гиперболической, а время релаксации при фиксированной мощности возбуждения уменьшается с ростом ширины запрещенной зоны образца, что характерно для излучательной рекомбинации в условиях сильного уровня возбуждения. Таким образом, при увеличении мощности накачки излучательный канал рекомбинации в исследуемых объемных образцах становится доминирующим.

Глава 4 содержит результаты исследования фотолюминесценции эпитаксиальных слоев узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, а также гетероструктур с квантовыми ямами на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в длинноволновом ИК диапазоне. В параграфе 4.1 рассмотрены особенности исследования спектров фотолюминесценции в длинноволновом ИК диапазоне и описана методика измерения спектров ФЛ, использованная в работе.

В параграфе 4.2 представлены результаты исследования спектров фотолюминесценции при непрерывной накачке. Сигнал фотолюминесценции детектируется вплоть до 26 мкм (18К), при этом ширина линии фотолюминесценции при 18К составляет 6 – 8 мэВ. Показано, что температурное гашение фотолюминесценции в структурах с потенциальными и квантовыми ямами выражено слабее по сравнению с объемными образцами с близкой шириной запрещенной зоны.

Параграф 4.3 посвящен исследованию спектров и кинетики фотолюминесценции в условиях импульсного возбуждения. Время релаксации фотолюминесценции в объемных образцах при 18К составляет ~ 2 мкс. При исследованиях спектров фотолюминесценции в структурах с квантовыми ямами помимо линий, обусловленных межзонной рекомбинацией в яме и барьерах обнаружена полоса люминесценции в окрестности 3 мкм. Особенностью данной полосы «длинная» кинетика релаксации – 7 мкс. При $T = 18\text{К}$ на ее коротковолновом краю наблюдается узкая (20 см^{-1}) линия, которая, как и вся полоса, отсутствует на спектрах фотолюминесценции, полученных при

непрерывном возбуждении. При 100К время релаксации для данной полосы становится 3 мкс и узкая линия не наблюдается. Продемонстрировано, что время релаксации межзонной фотолюминесценции в квантовой яме увеличивается с ростом интенсивности накачки и достигает ~5 мкс. На основе данной величины произведена оценка необходимой интенсивности возбуждения на длине волны 1 мкм для достижения инверсной населенности в исследуемых структурах, которая составила всего 1 Вт/см².

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты работы

Исследования спектров фотопроводимости эпитаксиальных слоев узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в магнитном поле, а также при различных температурах позволили выявить состояния акцепторов, попадающих в континуум зоны проводимости, т.е. являющиеся резонансными. Показано, что в спектрах фотопроводимости структур с квантовыми ямами присутствуют аналогичные особенности [A3, A6].

С помощью исследований кинетики фотопроводимости в эпитаксиальных слоях и гетероструктурах с квантовыми ямами на основе узкозонных и бесщелевых твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ определены времена жизни носителей в данных структурах, оценена перспективность исследуемых структур как фотоприемников дальнего инфракрасного и терагерцового диапазона [A3, A5]. Установлена доминирующая роль излучательной рекомбинации носителей в эпитаксиальных слоях с составом $x = 0,21 - 0,23$ в условиях сильного уровня возбуждения ($10^{14} - 10^{15}$ фотонов в импульсе длительностью 7 нс на длине волны 11 мкм) [A4].

Впервые получены спектры длинноволновой (до 26 мкм) межзонной фотолюминесценции в узкозонных эпитаксиальных слоях $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и исследована их зависимость от температуры [A1]. Показано, что температурное гашение фотолюминесценции в гетероструктурах с квантовыми и потенциальными ямами на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ выражено слабее по сравнению с объемными образцами [A1, A2].

В эпитаксиальных слоях и гетероструктурах с квантовыми ямами на основе узкозонных твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ исследования спектров фотолюминесценции при импульсном возбуждении показали, что время релаксации сигнала фотолюминесценции в структурах с квантовыми ямами увеличивается с ростом интенсивности накачки и достигает 5 мкс; сделана оценка необходимой мощности накачки для достижения инверсной населенности в подобных ямах. В структурах с квантовыми ямами обнаружена узкая линия, связываемая со стимулированным излучением на переходах между состояниями континуума и уровнем глубокого центра, связанного с вакансиями катионов в барьерах [A2].

Полученные в работе результаты свидетельствуют о высоком потенциале наногетероструктур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ для создания длинноволновых лазеров и предполагают дальнейшее развитие исследований фотолюминесценции и поиски стимулированного излучения в специально сконструированных волноведущих структурах.

Список цитируемой литературы

1. Rogalski, A. *HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook* / A. Rogalski // Reports on Progress in Physics. —2005. — Т. 68. № 10. — С. 2267-2336.
2. Varavin, V.S. *HgCdTe epilayers on GaAs: growth and devices* / V.S. Varavin, V.V. Vasiliev, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, V.N. Ovsyuk, Y.G. Sidorov, A.O. Suslyakov, M.V. Yakushev, A.L. Aseev // Proceedings of SPIE. —2003. — Т. 5136. — С. 381-395.
3. Dvoretzky, S. *Growth of HgTe Quantum Wells for IR to THz Detectors* / S. Dvoretzky, N. Mikhailov, Y. Sidorov, V. Shvets, S. Danilov, B. Wittman, S. Ganichev // Journal of Electronic Materials. —2010. — Т. 39. № 7. — С. 918-923.
4. Chang, Y. *Carrier recombination lifetime characterization of molecular beam epitaxially grown HgCdTe* / Y. Chang, C.H. Grein, J. Zhao, C.R. Becker, M.E. Flatte, P.K. Liao, F. Aqariden, S. Sivananthan // Applied Physics Letters. —2008. — Т. 93. № 19. — С. 192111.
5. Donetsky, D. *Minority carrier lifetime in type-2 InAs–GaSb strained-layer superlattices and bulk HgCdTe materials* / D. Donetsky, G. Belenky, S. Svensson, S. Suchalkin // Applied Physics Letters. —2010. — Т. 97. № 5. — С. 052108.
6. Józwiowski, K. *The bulk generation-recombination processes and the carrier lifetime in mid-wave infrared and long-wave infrared liquid nitrogen cooled HgCdTe alloys* / K. Józwiowski, M. Kopytko, A. Rogalski // Journal of Applied Physics. —2012. — Т. 112. № 3. — С. 033718.

7. Krishnamurthy, S. *Minority carrier lifetimes in HgCdTe alloys* / S. Krishnamurthy, M.A. Berding, Z.G. Yu // Journal of Electronic Materials. —2006. — Т. 35. № 6. — С. 1369-1378.
8. Lopes V.C. *Minority carrier lifetime in mercury cadmium telluride* / V.C. Lopes, A.J. Syllaios, M.C. Chen // Semiconductor Science and Technology. —1993. — Т. 8. № 6S. — С. 824.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

- A1. Morozov, S. V. *Efficient long wavelength interband photoluminescence from HgCdTe epitaxial films at wavelengths up to 26 μ m* / S. V. Morozov, V. V. Rumyantsev, A. V. Antonov, K. V. Maremyanin, K. E. Kudryavtsev, L. V. Krasilnikova, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretiskii and V. I. Gavrilenko // Appl. Phys. Lett. –2014. – Vol. 104. – P. 072102
- A2. Morozov, S. V. *Time resolved photoluminescence spectroscopy of narrow gap Hg_{1-x}Cd_xTe/Cd_yHg_{1-y}Te quantum well heterostructures* / S. V. Morozov, V. V. Rumyantsev, A. V. Antonov, A.M. Kadykov, K. V. Maremyanin, K. E. Kudryavtsev, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretiskii and V. I. Gavrilenko // Appl. Phys. Lett. –2014. – Vol. 105. – P. 022102
- A3. Rumyantsev, V.V. *Spectra and kinetics of THz photoconductivity in narrow-gap Hg_{1-x}Cd_xTe (x<0.2) epitaxial films* / V.V.Rumyantsev, S.V.Morozov, A.V.Antonov, M.S.Zholudev, K.E.Kudryavtsev, V.I.Gavrilenko, S.A.Dvoretiskii, N.N.Mikhailov // Semicond. Sci. Technol. – 2013. – Vol.28. – P. 125007
- A4. Румянцев, В.В. *Особенности спектров и кинетики релаксации длинноволновой фотопроводимости в узкозонных эпитаксиальных пленках и гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe* / В.В. Румянцев, А.В. Иконников, А.В. Антонов, С.В. Морозов, М.С. Жолудев, К.Е. Спириин, В.И. Гавриленко, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов // Физика и техника полупроводников – 2013. – Т.47, вып.11. – С. 1446
- A5. Морозов, С.В. *Исследования времен жизни и релаксации фотопроводимости в гетероструктурах с квантовыми ямами Hg_xCd_{1-x}Te/Cd_yHg_{1-y}Te* / С.В. Морозов, М.С. Жолудев, А.В. Антонов, В.В. Румянцев, В.И. Гавриленко, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, О. Drachenko, S. Winnerl, H. Schneider, M. Helm // Физика и техника полупроводников – 2012. – Т.46, вып.11. – С. 1388
- A6. Иконников, А.В. *Терагерцовая спектроскопия узкозонных гетероструктур с квантовыми ямами на основе HgTe/CdTe* / А.В.Иконников, А.А.Ластовкин, К.Е.Спириин, М.С.Жолудев, В.В.Румянцев, К.В.Маремьянин, А.В.Антонов, В.Я.Алешкин, В.И.Гавриленко, С.А.Дворецкий, Н.Н.Михайлов, Ю.Г.Садофьев, N.Samal // Письма в ЖЭТФ – 2010. – Т. 92, вып.11. – С. 837.
- A7. *Узкозонные гетероструктуры с квантовыми ямами на основе HgTe/CdTe для приёмников терагерцового диапазона* / В.И. Гавриленко, А.В.Иконников, А.А. Ластовкин, К.Е. Спириин, М.С.Жолудев, В.В. Румянцев, К.В. Маремьянин, А.В. Антонов, В.Я. Алешкин, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов // VIII Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и

субмиллиметровых волн: тезисы докладов. — Нижний Новгород, 1-4 марта 2011. — с. 25.

- A8. *Терагерцовая фотопроводимость в гетероструктурах HgTe/CdHgTe (013) с квантовыми ямами* / К.Е. Спирин, М.С.Жолудев, А.В. Антонов, В.В. Румянцев, В.И. Гавриленко, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий. // Материалы XV Международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника». — Нижний Новгород, 14-18 марта 2011. — с. 151-152.
- A9. *Исследования времен жизни носителей в графеноподобных гетероструктурах с квантовыми ямами $Hg_yCd_{1-y}Te/Cd_{1-x}Hg_xTe$ методом терагерцовой pump-probe-спектроскопии* / С.В.Морозов, М.С.Жолудев, А.В. Антонов, В.В. Румянцев, В.И. Гавриленко, А.А. Дубинов, О. Drachenko, S. Winnerl, H. Schneider and M. Helm. // Материалы XV Международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника» — Нижний Новгород, 14-18 марта 2011. — с. 508-509.
- A10. *Узкозонные гетероструктуры с квантовыми ямами на основе HgTe/CdTe* / В.И. Гавриленко, К.Е. Спирин, А.В. Иконников, М.С. Жолудев, А.В. Антонов, А.А. Ластовкин, В.В. Румянцев, В.Я. Алешкин, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов // Материалы X Российской конференции по физике полупроводников. — Нижний Новгород, 19-23 сентября 2011. — с. 51
- A11. *Спектры и кинетика терагерцовой фотопроводимости в узкозонных твердых растворах $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x < 0,2$)* / В.В. Румянцев, В.И. Гавриленко // Материалы 13 всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и нанозлектронике. — Санкт-Петербург, 21-25 ноября 2011. — с.3
- A12. *Исследования времен жизни и релаксации фотопроводимости в гетероструктурах с квантовыми ямами $Hg_{1-y}Cd_yTe/Cd_{1-x}Hg_xTe$* / С.В. Морозов, М.С. Жолудев, А.В. Антонов, В.В. Румянцев, А.А. Дубинов, В.Я. Алешкин, В.И. Гавриленко, С.А.Дворецкий, Н.Н. Михайлов, О. Drachenko, S. Winnerl, H. Schneider and M. Helm // Материалы XVI Международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника». — Нижний Новгород, 12-16 марта 2012. —с.318-319.
- A13. *Спектрокинетические исследования терагерцовой фотопроводимости в объемных структурах $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x < 0,2$)* / В.В. Румянцев, С.В. Морозов, К.Е. Кудрявцев, А.В. Антонов, В.И. Гавриленко, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов // Материалы XVI Международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника». — Нижний Новгород, 12-16 марта 2012. — с.370-371.
- A14. *Терагерцовая фотопроводимость в узкозонных структурах на основе твердых растворов $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x < 0,2$)* / Румянцев В.В., Морозов С.В., Жолудев М.С., Кудрявцев К.Е., Антонов А.В., Гавриленко В.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н. // Труды XXII Международной научно-технической конференции, школы молодых специалистов и выставки по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — Москва, 22-25 мая 2012 г. — с. 129-132.
- A15. *THz spectroscopy of narrow-gap HgTe/CdHgTe QWs and HgCdTe films* / V.I. Gavrilenko, A.V. Ikonnikov, M.S. Zholudev, V.V. Rumyantsev, K.E. Spirin, A.A. Lastovkin, K.V. Maremyanin, A.V. Antonov, A.A. Dubinov, S.V. Morozov, V.Ya.

Aleshkin, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky // Abst. 2nd Int. Conf. “Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications” — Moscow, 20-22 June, 2012. — с.69.

- A16. *Investigation of THz photoconductivity and carriers lifetime in narrow-gap $Hg_yCd_{1-y}Te/Cd_{1-x}Hg_xTe$ QW and bulk structures with graphene-like energy-momentum law* / S.V.Morozov, V.V.Rumyantsev, V.Ya.Aleshkin, A.V.Antonov, M.S.Joludev, K.E.Kudryavtsev, V.I.Gavrilenko, N.N.Michailov, O.Drachenko, S.Winnerl, H.Schneider, M.Helm // Abstr. 3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science and technology. — Prague, Czech Republic, 17-20 June 2012. — с. 5317.
- A17. *Генерация и детектирование терагерцового излучения в узкозонных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе $HgTe/CdTe$ и эпитаксиальных слоях $CdHgTe$* / В.И. Гавриленко, В.В. Румянцев, М.С.Жолудев, А.В. Антонов, К.Е. Кудрявцев, Л.В.Красильникова, А.В. Иконников, А.А. Дубинов, С.В. Морозов, В.Я. Алёшкин, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий // IX Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн: тезисы докладов. — Нижний Новгород, 26 февраля - 1 марта 2013. — с. 23.
- A18. *Исследования спектров и кинетики фотопроводимости и спектров ФЛ в эпитаксиальных пленках $Hg_{1-x}Cd_xTe$ и $Hg_{1-x}Cd_xTe/Cd_yHg_{1-y}Te$ структурах с квантовыми ямами в ТГц диапазоне* / С.В. Морозов, А.В. Антонов, К.В. Маремьянин, В.В. Румянцев, Л.В. Красильникова, С.С. Сергеев, Д.И. Курицын, Н.Н. Михайлов и В.И. Гавриленко // Материалы XVII Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». — Нижний Новгород, 11-15 марта 2013. — с.529-530.
- A19. *Spin Hall Effect influence on transport properties of $HgCdTe$ 2D and 3D semiconductor systems* / F. Terpe, C. Consejo, W. Knap, N. Diakonova, С.В. Морозов, В.И. Гавриленко, В.В. Румянцев, М.С. Жолудев, Н.Н. Михайлов // Материалы XVII Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». — Нижний Новгород, 11-15 марта 2013. — с.531-532.
- A20. *О возможности создания лазера дальнего ИК диапазона на основе соединений кадмий-ртуть-теллур* / В.И. Гавриленко, С.В. Морозов, А.А. Дубинов, М.С. Жолудев, В.В. Румянцев, В.Я. Алёшкин, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий // Тез. докл. XI Росс. конф. по физике полупроводников. ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН. — С.Петербург, 2013 . — с.44
- A21. *Спектрокинетические исследования длинноволновой ИК фотопроводимости в узкозонных пленках и структурах с квантовыми ямами на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$* / В.В. Румянцев, С.В. Морозов, А.В. Антонов, К.Е. Кудрявцев, В.И. Гавриленко, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий // Тез. докл. XI Росс. конф. по физике полупроводников. ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН . — С.Петербург, 2013 . — с.112
- A22. *Длинноволновая фотолюминесценция в узкозонных объемных структурах $HgCdTe$ и квантовых ямах $Hg_{1-x}Cd_xTe/Cd_{1-y}Hg_yTe$.* / С.В. Морозов, А.В. Антонов, В.В. Румянцев, К.В. Маремьянин, Л.В. Красильникова, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, В.И. Гавриленко. // Тез. докл. XI Росс. конф. по

физике полупроводников. ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН. — С.Петербург, 2013 . — с.237

- A23. *Длинноволновая ИК фотолюминесценция и фотопроводимость в узкозонных твердых растворах $Hg_{1-x}Cd_xTe$ и КЯ $Hg_{1-x}Cd_xTe/Cd_yHg_{1-y}Te$* / В.В. Румянцев, В.И.Гавриленко // 15 Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (тезисы докладов) . — Санкт-Петербург, 25-29 ноября 2013 г. — с.37.
- A24. *Optical study of HgCdTe based narrow-gap heterostructures* / V.I.Gavrilenko, S.V.Morozov, V.V.Rumyantsev, M.S.Zholudev, A.V.Antonov, A.A.Dubinov, K.V.Maremyanin, K.E.Kudryavtsev, L.V.Krasilnikova, V.Ya.Aleshkin, N.N.Mihailov, S.A. Dvoretckiy // Proc. 21st Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology . — St.Petersburg, June 24-28, 2013. — с.252-253.
- A25. *Температурные исследования длинноволновой межзонной фотолюминесценции и фотопроводимости в узкозонных эпитаксиальных пленках $Hg_{1-x}Cd_xTe$* / В.В. Румянцев, С.В. Морозов, А.В. Антонов, С.М. Сергеев, А.М. Кадыков, Д.И. Курицын, В.И. Гавриленко, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий // Материалы XVIII Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». — Нижний Новгород, 10-14 марта 2014 г. — с. 613-614
- A26. *Времяразрешенная ФЛ спектроскопия узкозонных эпитаксиальных пленок $Hg_{1-x}Cd_xTe$ и $Hg_{1-x}Cd_xTe/Cd_yHg_{1-y}Te$ гетероструктур с квантовыми ямами в ТГц диапазоне* / С.В. Морозов, В.В. Румянцев, А.В. Антонов, К.Е. Кудрявцев, С.М. Сергеев, Д.И. Курицын, А.А. Дубинов, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, В.И. Гавриленко // Материалы XVIII Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». — Нижний Новгород, 10-14 марта 2014 г. — с. 563 -564.
- A27. *Исследования оптических свойств примесных центров в эпитаксиальных пленках $Hg_{1-x}Cd_xTe$ и $Hg_{1-x}Cd_xTe/Cd_yHg_{1-y}Te$ гетероструктурах с квантовыми ямами* / С.В. Морозов, А.В. Антонов, В.В. Румянцев, К.Е. Кудрявцев, С.М. Сергеев, А.М. Кадыков, Д.И. Курицын, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, В.И. Гавриленко // Материалы XVIII Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». — Нижний Новгород, 10-14 марта 2014 г. — с. 565 -566.
- A28. *Long wavelength PL from HgCdTe nanostructures* / V.I.Gavrilenko, S.V.Morozov, V.V.Rumyantsev, A.V.Antonov, A.A.Dubinov, K.E.Kudryavtsev, N.N. Mihailov, S.A. Dvoretckiy // Proc. 22nd Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology. — St.Petersburg, June 23-27, 2014. — с.64-65.

Румянцев Владимир Владимирович

**ФОТОПРОВОДИМОСТЬ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК И
СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ НА ОСНОВЕ HgCdTe
В СРЕДНЕМ И ДАЛЬНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ**

Автореферат

Подписано к печати 23.10.2014 г. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105