

На правах рукописи

Жолудев Максим Сергеевич

**ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
КВАНТОВЫХ ЯМ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$**

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 — 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики микроструктур Российской академии наук

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
профессор Алёшкин Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
Германенко Александр Викторович;
УрФУ им. первого Президента России
Б. Н. Ельцина,
Институт естественных наук, профессор,
зав. отд. оптоэлектроники и полупроводниковой
техники
кандидат физико-математических наук,
Бурдов Владимир Анатольевич;
ННГУ им. Н. И. Лобачевского, физический
факультет, доцент

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики
полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского
отделения Российской академии наук

Защита состоится «19» декабря 2013 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики микроструктур Российской академии наук по адресу: 607680, Нижегородская обл., Кстовский р-н, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики микроструктур Российской академии наук

Автореферат разослан «18» ноября 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



К. П. Гайкович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В последние годы наблюдается повышенный интерес к квантовым ямам на основе твёрдого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, которые обладают рядом замечательных свойств. В то время как CdTe имеет нормальную зонную структуру, HgTe обладает так называемой инвертированной зонной структурой из-за сильного спин-орбитального взаимодействия. Тип зонной структуры квантовой ямы из «инвертированного» материала и барьерами из «нормального» материала зависит от её ширины [1; 2]. Существует критическое значение толщины ямы, где ширина запрещённой зоны равна нулю. Яма с толщиной меньше критической имеет нормальную зонную структуру, а больше критической — инвертированную [3; 4]. Возможность получения произвольной ширины запрещённой зоны вплоть до нуля делает эти структуры перспективными для применения в области инфракрасной и терагерцовой оптоэлектроники [5; 6]. Квантовые ямы с инвертированной зонной структурой являются двумерными топологическими изоляторами [1; 2] (то есть в них имеются локализованные на краях образца состояния с нулевой шириной запрещённой зоны, для которых спин электрона определяется направлением движения). Особенности структуры волновых функций зоны проводимости в инвертированных квантовых ямах приводят к сильным спин-зависимым эффектам, которые делают такие ямы перспективными для спинтроники [7; 8]. Всё это вместе взятое стимулирует экспериментальные и теоретические исследования структур такого типа.

Диссертация посвящена изучению узкозонных гетероструктур с одиночными квантовыми ямами $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$, выращенных на атомной плоскости (013). Теоретическое описание таких структур осложняется тем, что даже малые поправки к энергетическому спектру (порядка нескольких мэВ) могут оказаться существенными по сравнению с шириной запрещённой зоны. Для количественного описания узкозонных квантовых ям в диссертации использовался $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ гамильтониан 8×8 , учитывающий влияние удаленных зон, встроенную деформацию и отличие атомной плоскости, на которой выращена структура, от (001). Малая ширина запрещённой зоны приводит к тому, что характерные энергии оптических переходов в таких образцах лежат в терагерцовом диапазоне. Поэтому наиболее адекватным методом экспериментального исследования зонного спектра этих структур представляется терагерцовая спектроскопия.

Степень разработанности темы исследования

В последнее время наблюдается прогресс в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (особенно для структур, выращенных на низкосимметричных плоскостях, например (013)), что привело к увеличению разнообразия доступных высококачественных образцов (см., например, [2; 9–11]). Большая часть экспериментальных исследований выполнена транспортными методами, что в частности позволило наблюдать квантовый спиновый эффект Холла [2] в образцах с инвертированной зонной структурой и гигантское (до 30 мэВ) спиновое расщепление Рашбы в асимметричных структурах [7; 8], продемонстрировать линейный закон дисперсии в квантовых ямах критической толщины [12]. В широких квантовых ямах было обнаружено перекрытие зоны проводимости и валентной зоны, приводящее к сосуществованию электронного и дырочного двумерного газов в термодинамическом равновесии [13; 14]. Эффективным методом изучения энергетического спектра узкозонных материалов является исследование циклотронного резонанса и межзонного магнитопоглощения в квантовых ямах магнитных полях. В гетероструктурах $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ такие исследования были начаты в работах [3; 4] и выполнены лишь на нескольких образцах с инвертированным зонным спектром. Первые модельные расчеты энергетических спектров гетероструктур $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ с квантовыми ямами методом огибающих функций были выполнены в работе [15], когда еще отсутствовали устоявшиеся представления о граничных условиях и величине разрыва зон на гетероинтерфейсе HgTe/CdTe . Дальнейшее развитие эта модель применительно в квантовых ямах $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ (001) получила в работах группы Университета Вюрцбурга (см., например, [9]), которые использовали граничные условия, предложенные в работе [16]. Общий подход к расчетам зонных спектров гетероструктур, выращенных на низкосимметричных атомных плоскостях, был предложен в работе [17]. Однако, до настоящего времени такие расчеты для гетероструктур $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ проводились лишь для образцов, выращенных на плоскости (112). Таким образом, до начала настоящего исследования отсутствовали четкие представления об энергетических спектрах узкозонных и бесщелевых гетероструктур $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ с квантовыми ямами, выращенных на плоскости (013).

Цели и задачи

Основной целью диссертационной работы является расширение знаний об узкозонных и бесщелевых гетероструктурах на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с квантовыми ямами, выращенных на плоскости (013). Это включает в себя решение следующих задач:

1. Разработка метода расчёта зонной структуры и уровней Ландау в гетероструктурах на основе узкозонных и бесщелевых полупроводников, выращенных на произвольной атомной плоскости.
2. Исследование терагерцовой фотопроводимости (ФП) узкозонных гетероструктур с квантовыми ямами $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ (013).
3. Исследование циклотронного резонанса (ЦР) в квантовых ямах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ (013) в слабых магнитных полях и сопоставление измеренной циклотронной массы с результатами расчётов.
4. Исследование циклотронного резонанса и межзонных переходов в квантовых ямах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ (013) в квантующих магнитных полях и сопоставление положения линий поглощения с рассчитанными энергиями переходов между уровнями Ландау.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Межзонная терагерцовая фотопроводимость узкозонных гетероструктур с квантовыми ямами на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ наблюдалась впервые.
2. Впервые проведены расчёты зонной структуры и уровней Ландау в квантовых ямах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$, выращенных на плоскости (013), с учётом встроенной деформации и эффектов, связанных с отсутствием центра инверсии в объёмном кристалле.
3. Впервые наблюдалось расщепление двух линий в спектрах магнитопоглощения гетероструктур $\text{HgTe}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ (013) с квантовыми ямами с инвертированной зонной структурой, обусловленное антипересечением нижнего уровня Ландау зоны проводимости и верхнего уровня Ландау валентной зоны.

4. В гетероструктуре с широкой квантовой ямой $\text{HgTe}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ впервые одновременно наблюдался циклотронный резонанс электронов и дырок в квантующих магнитных полях.

Теоретическая и практическая значимость работы

Научная значимость работы заключается в получении нового знания о структуре энергетического спектра носителей в гетероструктурах с квантовыми ямами $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$, выращенных на атомной плоскости (013). Впервые проведены расчёты энергий и волновых функций состояний носителей заряда в гетероструктурах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ (013) с квантовыми ямами в магнитном поле и без него с учётом встроенной деформации. Проведена корректировка общепринятого набора материальных параметров гетероструктуры HgTe/CdTe , что позволило достичь лучшего согласования результатов расчётов с экспериментальными данными. Обнаружена межзонная терагерцовая проводимость в квантовых ямах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ (013) как при температуре жидкого гелия, так и при температуре жидкого азота, что может быть использовано для создания приёмников терагерцового излучения. Показана возможность генерации излучения на межзонных переходах в узкозонных квантовых ямах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ (013) при оптической накачке.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при создании новых оптоэлектронных приборов терагерцового диапазона на основе гетероструктур с квантовыми ямами $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ (013).

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач были применены следующие теоретические и экспериментальные методы и подходы:

- численное решение стационарного уравнения Шредингера с эффективным гамильтонианом 8×8 (явный учёт зон Γ_6 , Γ_8 , и Γ_7) в рамках метода огибающих функций;
- учёт влияния магнитного поля с помощью подстановки Пайерлса и поправки Зеемана;
- метод теории возмущений для учета поправок в гамильтониан, связанных с отсутствием центра инверсии в объемном кристалле;

- метод фотоэлектрической спектроскопии;
- метод абсорбционной спектроскопии в терагерцовом диапазоне.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Расчёт зонной структуры квантовых ям HgCdTe/CdHgTe (013) в рамках приближения огибающих функций в четырёхзонной модели для достижения количественного согласования с экспериментом требует корректировки значений параметров материалов, используемых в литературе: разрыва валентной зоны на гетеропереходе между CdTe и HgTe и параметра, отвечающего за взаимодействие зон Γ_6 и Γ_8 (E_p).
2. Обнаружена фотопроводимость гетероструктур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe (013) в терагерцовом диапазоне, обусловленная межзонным поглощением и переходами с участием примесей и дефектов.
3. В квантовых ямах HgTe/CdHgTe с инвертированной зонной структурой имеет место антипересечение нижнего уровня Ландау зоны проводимости и верхнего уровня Ландау валентной зоны, обусловленное отсутствием центра инверсии в кристаллической решётке HgTe.
4. В квантовых ямах HgTe/Cd_{0,7}Hg_{0,3}Te (013) шириной больше 12,5 нм, выращенных на буферном слое CdTe, имеет место перекрытие зоны проводимости с боковым максимумом валентной зоны, что может приводить к образованию полуметаллического состояния (сосуществование электронов и дырок в равновесии).
5. В квантовых ямах HgTe/Cd_{0,7}Hg_{0,3}Te (013) с нормальной зонной структурой при межзонной оптической генерации неравновесных носителей до концентраций $\sim 10^{11}$ см⁻² усиление электромагнитного излучения на межзонных переходах многократно превышает внутризонное (друдевское) поглощение при $\hbar\omega \geq 20$ мэВ.

Степень достоверности и апробация результатов исследования

Достоверность результатов обеспечена оптимальным выбором физических моделей, учитывающих основные свойства исследуемых систем и адекватным выбором методов численных расчетов. Экспериментальные исследования выполнены апробированными в ИФМ РАН и других научных организациях методами.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на XV, XVI и XVII Международных симпозиумах «Нанофизика и нанoeлектроника» (Нижний Новгород 2011, 2012, 2013); 12 Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и нанoeлектронике (Санкт-Петербург 2010); Международном форуме по нанотехнологиям «Rusnanotech'10» (Москва 2010); 4 Всероссийской конференции молодых ученых «Микро- и нанотехнологии и их применение» (Черноголовка 2010); VIII и IX Всероссийских семинарах по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород 2011, 2013); Российской конференции и школе по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотозлектроники «Фотоника-2011» (Новосибирск 2011); X и XI Российских конференциях по физике полупроводников (Нижний Новгород 2011, Санкт-Петербург 2013); Международной научно-технической конференции, школе молодых специалистов и выставке по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва 2012); Международной конференции «Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications» (Москва 2012); Международной конференции «GDR-I Workshop» (Tignes, France 2012; Cargese, France 2013); Международной конференции «38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves» (Mainz, Germany 2013); Международной конференции «Int. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics/Lasers, Applications, and technologies» (Москва 2013); 21 Международном симпозиуме «Nanostructures: Physics and Technology» (Санкт-Петербург 2013); а также на семинарах ИФМ РАН.

По теме диссертации опубликованы 41 печатная работа, в том числе 9 статей в реферируемых журналах и 32 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.

Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** проводится обзор работ, посвящённых исследованию гетероструктур с квантовыми ямами $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$. Первые четыре

раздела посвящены методам расчёта энергий и волновых функций состояний носителей в гетероструктурах в рамках приближения огибающих функций. Пятый раздел посвящён гетероструктурам, выращенным на низкосимметричных атомных плоскостях. Заключительный раздел представляет собой обзор теоретических и экспериментальных исследований энергетического спектра электронов в узкозонных структурах на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$.

Глава 2 описывает методы, которые используются в данной работе для вычисления зонной структуры и уровней Ландау в квантовых ямах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ с учётом встроенной деформации.

Первый раздел посвящен общей процедуре получения эффективного гамильтониана и тензора деформации для гетероструктур, выращенных на произвольной атомной плоскости. В этом разделе даётся максимально общее описание процедуры без привязки к конкретному набору базисных функций для модели, учитывающей члены до второго порядка по \mathbf{k} включительно. Гамильтониан представляется в виде суммы инвариантов, умноженных на параметры материала. Такое представление позволяет проводить преобразование поворота [17] численно.

Во втором разделе данный метод применяется к четырёхзонной модели [9; 15; 16] (на основе гамильтониана Кейна) для гетероструктур, выращенных на плоскости (013). Здесь приводится явное выражение для эффективно-го гамильтониана, используемого при расчётах, в аксиальном и анизотропном приближениях. Кроме того, во втором разделе приводится выражение для тензора деформации и поправок, связанных с отсутствием центра инверсии в объёмном кристалле. Таким образом, данный раздел описывает математическую модель, используемую в диссертации при расчётах энергетического спектра и волновых функций носителей в гетероструктурах, выращенных на плоскости (013).

В третьем разделе подробно излагается метод расчёта зонной структуры и уровней Ландау в слоистых гетероструктурах, которые описываются эффективным гамильтонианом, учитывающим члены до второго порядка по \mathbf{k} включительно. При расчёте зонной структуры без магнитного поля огибающие функции в плоскости слоёв являются плоскими волнами, а функции, зависящие от координаты z (ось перпендикулярная слоям структуры), раскладываются по ортонормированному базису, состоящему из плоских волн, распространяющихся вдоль z . В случае квантующих магнитных полей используется подстановка Пайерлса и функции, зависящие от координат x и y , раскладываются по волновым функциям электрона в однородном магнитном

поле в вакууме.

В четвёртой части приводятся результаты расчётов зонной структуры и уровней Ландау, выполненных для одиночной квантовой ямы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$, выращенной на плоскости (013). Примеры расчётов приведены на рис. 1, 2, где представлена зависимость энергии подзон размерного квантования от k_x (ось x выбрана вдоль кристаллографического направления (100)) и энергии уровней Ландау, рассчитанные в аксиальном приближении. Представленные результаты демонстрируют характерные особенности квантовых ям $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ (013) в широком диапазоне параметров: параболический закон дисперсии электронов в зоне проводимости, нулевая запрещённая зона при критической толщине ямы, пересечение уровней Ландау из разных зон в ямах с инвертированной зонной структурой, перекрытие зоны проводимости и валентной зоны в широких ($d > 12,5$ нм) квантовых ямах.

Глава 3 посвящена экспериментальному изучению одиночных квантовых ям $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ (013) методами терагерцовой спектроскопии и интерпретации полученных данных с помощью результатов наших расчётов.

Первый раздел описывает структуру исследуемых образцов, которые представляют собой квантовые ямы с низким содержанием кадмия (менее 20%) с барьерами с высоким содержанием кадмия (около 70%), выращенные на релаксированном буфере CdTe на подложке GaAs (013).

Второй раздел посвящён изучению зонной структуры образцов в отсутствие магнитного поля. При исследовании терагерцовой фотопроводимости в узкозонных квантовых ямах обнаружен межзонный фотоотклик как при температуре жидкого гелия так и при температуре жидкого азота. Кроме того, при температуре жидкого гелия был обнаружен низкочастотный сигнал (2–9 ТГц), обусловленный фотовозбуждением неких центров, связанных с примесями и дефектами.

Измерения циклотронного резонанса в слабых магнитных полях (где применимо квазиклассическое приближение) были проведены с помощью ламп обратной волны. Сопоставление результатов расчётов и измерений, включая измерения выполненные А. А. Ластовкиным и А. В. Иконниковым с помощью квантовых каскадных лазеров при различных концентрациях электронов в зоне проводимости, продемонстрировало систематическое количественное рассогласование теоретических и экспериментальных значений циклотронной массы при хорошем качественном согласовании.

Третий раздел посвящён изучению структуры уровней Ландау квантовых ям $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ (013) в квантующих магнитных путём изме-

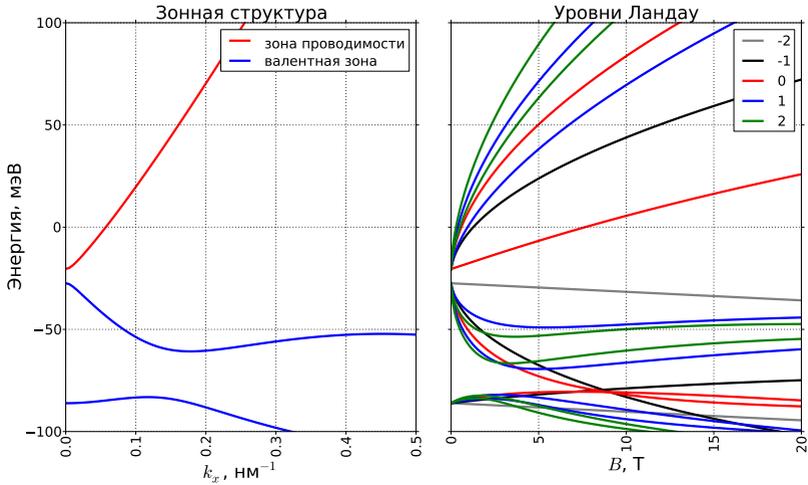


Рис. 1: Рассчитанная зонная структура и уровни Ландау квантовой ямы $\text{HgTe}/\text{Cd}_{0,7}\text{Hg}_{0,3}\text{Te}$ (013) толщиной 6 нм при $T = 0\text{K}$ (нормальная зонная структура).

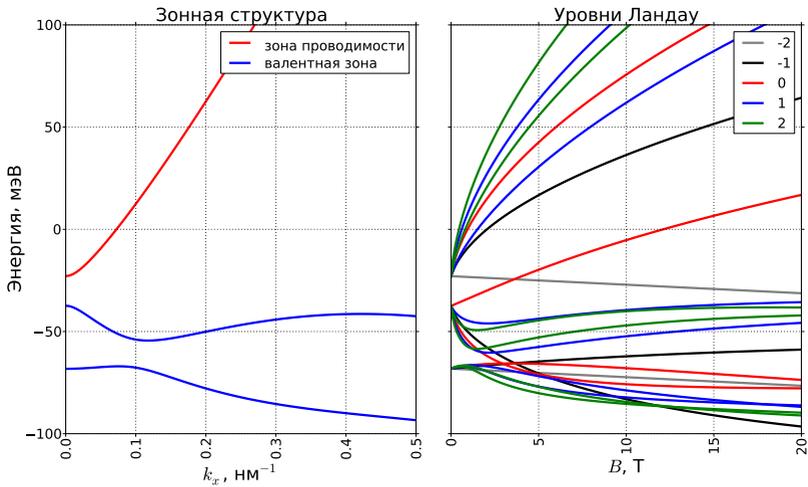


Рис. 2: Рассчитанная зонная структура и уровни Ландау квантовой ямы $\text{HgTe}/\text{Cd}_{0,7}\text{Hg}_{0,3}\text{Te}$ (013) толщиной 7 нм при $T = 0\text{K}$ (инвертированная зонная структура).

рения магнитопоглощения методом фурье-спектроскопии. В спектрах поглощения образцов с нормальной (неинвертированной) зонной структурой наблюдались межзонные и внутризонные переходы, а также интенсивная линия, соответствующая запрещённому в электродипольном приближении переходу. В спектрах поглощения образцов с инвертированной зонной структурой в магнитных полях близких к предсказанному в рамках аксиальной модели пересечению уровней Ландау, принадлежащих разным зонам, обнаружено расщепление двух линий магнитопоглощения (рис. 3), свидетельствующее о взаимодействии и антипересечении этих уровней. Теоретический анализ этого взаимодействия, обусловленного поправками к эффективному гамильтониану, связанными с отсутствием центра инверсии в объёмном кристалле [18], проводится конце третьего раздела. В образце с шириной квантовой ямы 20,2 нм, находящемся в состоянии двумерного полуметалла, одновременно наблюдались внутризонные переходы электронов и дырок.

В четвёртом разделе исследуется возможность генерации терагерцового излучения в квантовых ямах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ на межзонных пе-

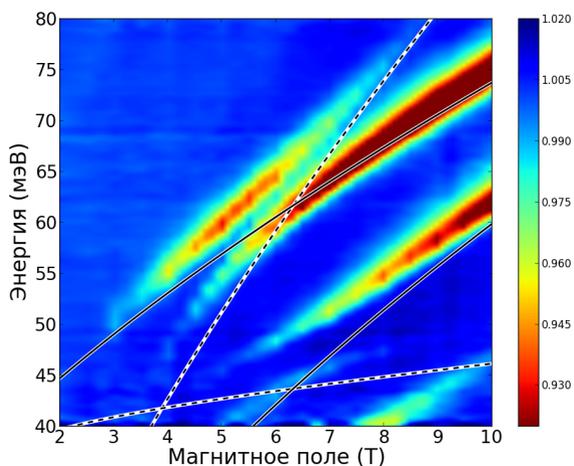


Рис. 3: Гистограмма магнитопоглощения в образце с инвертированной зонной структурой. Более «тёплый» (красный) цвет обозначает более сильное поглощение. Сплошные линии — рассчитанные энергии разрешённых переходов. Пунктирные линии — рассчитанные энергии запрещённых (в аксиальном приближении) переходов.

реходах. На основе экспериментально полученных данных о времени жизни неравновесных носителей и результатов расчётов двумерной динамической проводимости (с учетом поглощения Друде) сделан вывод о возможности усиления излучения в диапазоне 14–24 ТГц на межзонных переходах в квантовых ямах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ (013) с нормальной зонной структурой в условиях оптической накачки.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Заключение

Основные результаты работы:

1. Разработана модель для вычисления электронных и дырочных состояний в квантовых ямах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$, выращенных на плоскости (013). Проведены расчёты энергетических спектров и волновых функций электронов и дырок в квантовых ямах таких гетероструктур в отсутствие магнитного поля и в квантующих магнитных полях. Показано, что в квантовых ямах $\text{HgTe}/\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ (013) шириной больше 12.5 нм, выращенных на буферном слое CdTe, имеет место перекрытие зоны проводимости с боковым максимумом валентной зоны.
2. Экспериментально исследована фотопроводимость нелегированных узкозонных гетероструктур $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ с квантовыми ямами в терагерцовом диапазоне при температурах жидкого гелия или азота. Впервые продемонстрирован фотоотклик, связанный с межзонными переходами. Обнаружено, что при температуре жидкого гелия в спектре фотопроводимости наблюдается интенсивная низкочастотная полоса, связанная с фотоионизацией локализованных центров (примесей, дефектов).
3. В магнитных полях до 16 Т экспериментально исследованы спектры магнитопоглощения в узкозонных квантовых ямах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ как с инвертированной так и (впервые) с нормальной зонной структурой. В образцах с нормальной зонной структурой помимо ЦР электронов и межзонных переходов обнаружены линии поглощения, связанные с примесными переходами. В полуметаллической квантовой яме впервые одновременно наблюдался ЦР электронов и дырок в

квантующих магнитных полях. Антипересечение нижнего уровня Ландау зоны проводимости и верхнего уровня Ландау валентной зоны в образце с инвертированной зонной структурой (наблюдавшееся ранее в образцах, выращенных на плоскости (001)) обнаружено для структур, выращенных на плоскости (013) по расщеплению двух спектральных линий: циклотронного резонанса и межзонного перехода.

4. Продемонстрировано систематическое рассогласование наблюдаемого положения линий ЦР как в квазиклассических так и в квантующих магнитных полях с результатами расчётов, выполненного с использованием общепринятого набора материальных параметров для гетероструктур $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$. Показано, что наилучшее согласование экспериментальных данных с результатами расчётов достигается при значениях параметров $VBO = 0,62$ эВ и $E_p = 20,8$ эВ, отличных от используемых в литературе.
5. Показано, что антипересечение нижнего уровня Ландау зоны проводимости и верхнего уровня Ландау валентной зоны в образцах $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ (013) с инвертированной зонной структурой может быть описано в рамках разработанного метода расчёта энергетического спектра с учётом поправок, обусловленных отсутствием центра инверсии в объёмном кристалле.
6. Показано, что в квантовой яме $\text{HgTe}/\text{Cd}_{0,7}\text{Hg}_{0,3}\text{Te}$ толщиной 5,6 нм с нормальной зонной структурой при концентрации неравновесных носителей $(1-3) \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ возможно усиление излучения с частотой 5–24 ТГц за счёт межзонных переходов.

Список цитированной литературы

1. Bernevig, B. A. *Quantum Spin Hall Effect and Topological Phase Transition in HgTe Quantum Wells* / B. A. Bernevig, T. L. Hughes, S.-C. Zhang // Science. — 2006. — Vol. 314, no. 5806. — Pp. 1757–1761.
2. König, M. *Quantum Spin Hall Insulator State in HgTe Quantum Wells* / M. König, S. Wiedmann, C. Brüne, A. Roth, H. Buhmann, L. W. Molenkamp, X.-L. Qi, S.-C. Zhang // Science. — 2007. — Vol. 318, no. 5851. — Pp. 766–770.

3. Meyer, J. R. *Magneto-optical properties of HgTe-CdTe superlattices* / J. R. Meyer, R. J. Wagner, F. J. Bartoli, C. A. Hoffman, M. Dobrowolska, T. Wojtowicz, J. K. Furdyna, L. R. Ram-Mohan // *Phys. Rev. B.* — 1990. — Nov. — Vol. 42, issue 14. — Pp. 9050–9062.
4. Schultz, M. *Crossing of conduction- and valence-subband Landau levels in an inverted HgTe/CdTe quantum well* / M. Schultz, U. Merkt, A. Sonntag, U. Rössler, R. Winkler, T. Colin, P. Helgesen, T. Skauli, S. Løvold // *Phys. Rev. B.* — 1998. — June. — Vol. 57, issue 23. — Pp. 14772–14775.
5. Schulman, J. N. *The CdTe/HgTe superlattice: Proposal for a new infrared material* / J. N. Schulman, T. C. McGill // *Applied Physics Letters.* — 1979. — Vol. 34, no. 10. — Pp. 663–665.
6. Rogalski, A. *HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook* / A. Rogalski // *Reports on Progress in Physics.* — 2005. — Vol. 68, no. 10. — P. 2267.
7. Zhang, X. C. *Rashba splitting in n-type modulation-doped HgTe quantum wells with an inverted band structure* / X. C. Zhang, A. Pfeuffer-Jeschke, K. Ortner, V. Hock, H. Buhmann, C. R. Becker, G. Landwehr // *Phys. Rev. B.* — 2001. — May. — Vol. 63, issue 24. — P. 245305.
8. Gui, Y. S. *Giant spin-orbit splitting in a HgTe quantum well* / Y. S. Gui, C. R. Becker, N. Dai, J. Liu, Z. J. Qiu, E. G. Novik, M. Schäfer, X. Z. Shu, J. H. Chu, H. Buhmann, L. W. Molenkamp // *Phys. Rev. B.* — 2004. — Sept. — Vol. 70, issue 11. — P. 115328.
9. Novik, E. G. *Band structure of semimagnetic $Hg_{1-y}Mn_yTe$ quantum wells* / E. G. Novik, A. Pfeuffer-Jeschke, T. Jungwirth, V. Latussek, C. R. Becker, G. Landwehr, H. Buhmann, L. W. Molenkamp // *Phys. Rev. B.* — 2005. — July. — Vol. 72, issue 3. — P. 035321.
10. Mikhailov, N. N. *Growth of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ nanostructures by molecular beam epitaxy with ellipsometric control* / N. N. Mikhailov, R. N. Smirnov, S. A. Dvoretzky, Y. G. Sidorov, V. A. Shvets, E. V. Spesivtsev, R. S. V. // *Int. J. Nanotechnology.* — 2006. — Vol. 3, issue 1. — Pp. 120–130.
11. 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. — Vol. 39, no. 7. — Pp. 918–923.

12. Büttner, B. *Single valley Dirac fermions in zero-gap HgTe quantum wells* / B. Büttner, C. X. Liu, G. Tkachov, E. G. Novik, C. Brune, H. Buhmann, E. M. Hankiewicz, P. Recher, B. Trauzettel, S. C. Zhang, L. W. Molenkamp // *Nature Physics*. — Vol. 7, no. 5. — Pp. 418–422.
13. Gusev, G. M. *Quantum Hall Effect near the Charge Neutrality Point in a Two-Dimensional Electron-Hole System* / G. M. Gusev, E. B. Olshanetsky, Z. D. Kvon, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, J. C. Portal // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — Apr. — Vol. 104, issue 16. — P. 166401.
14. Квон, З. Д., *Двумерная электронно-дырочная система в квантовой яме на основе HgTe* / З. Д. Квон, Е. Б. Ольшанецкий, Д. А. Козлов, Н. Н. Михайлов, С. А. Дворецкий // *Письма в ЖЭТФ*. — 2008. — Т. 87, № 9. — С. 588—591.
15. Bastard, G. *Theoretical investigations of superlattice band structure in the envelope-function approximation* / G. Bastard // *Phys. Rev. B*. — 1982. — June. — Vol. 25, issue 12. — Pp. 7584–7597.
16. Burt, M. G. *The justification for applying the effective-mass approximation to microstructures* / M. G. Burt // *J. Phys.: Condens. Matter*. — 1992. — Vol. 4. — P. 6651.
17. Los, J. *Generalization of the $k \cdot p$ approach for strained layered semiconductor structures grown on high-index-planes* / J. Los, A. Fasolino, A. Catellani // *Phys. Rev. B*. — 1996. — Vol. 53. — P. 4630.
18. Winkler, R. *Spin-Orbit Coupling Effects in Two-Dimensional Electron and Hole Systems* / R. Winkler. — Springer Berlin / Heidelberg, 2003.

Список основных публикаций автора

- A1. 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. Спирин, В. И. Гавриленко, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов // *Физика и техника полупроводников*. — 2013. — Т. 47, № 11. — С. 1446—1450.

- A2. Иконников, А. В. *Магнитопоглощение в узкозонных эпитаксиальных слоях HgCdTe в терагерцовом диапазоне* / А. В. Иконников, М. С. Жолудев, В. И. Гавриленко, Н. Н. Михайлов, С. А. Дворецкий // *Физика и техника полупроводников*. — 2013. — Т. 47, № 12. — С. 1—6.
- A3. Zholudev, M. S. *Cyclotron resonance in HgCdTe-based heterostructures in strong magnetic fields* / M. S. Zholudev, F. Teppe, M. Orlita, V. Ya. Aleshkin, A. V. Ikonnikov, V. I. Gavrilenko, W. Knap, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretiskii // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2013. — Vol. 461, no. 1. — P. 012038.
- A4. Zholudev, M. S. *Cyclotron resonance in HgTe/CdTe-based heterostructures in high magnetic fields* / M. Zholudev, A. Ikonnikov, F. Teppe, M. Orlita, K. Maremyanin, K. Spirin, V. Gavrilenko, W. Knap, S. Dvoretiskiy, N. Mihailov // *Nanoscale Research Letters*. — 2012. — Vol. 7, no. 1. — P. 534.
- A5. Zholudev, M. *Magnetspectroscopy of two-dimensional HgTe-based topological insulators around the critical thickness* / M. Zholudev, F. Teppe, M. Orlita, C. Consejo, J. Torres, N. Dyakonova, M. Czapkiewicz, J. Wróbel, G. Grabecki, N. Mikhailov, S. Dvoretiskii, A. Ikonnikov, K. Spirin, V. Aleshkin, V. Gavrilenko, W. Knap // *Phys. Rev. B*. — 2012. — Nov. — Vol. 86, issue 20. — P. 205420.
- A6. Морозов, С. В. *Исследования времен жизни и релаксации фотопроводимости в гетероструктурах с квантовыми ямами Hg_{1-x}Cd_xTe/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, Н. Н. Михайлов, С. А. Дворецкий, О. Drachenko, S. Winnerl, H. Schneider, M. Helm // *Физика и техника полупроводников*. — 2012. — Т. 46, № 11. — С. 1388—1392.
- A7. Иконников, А. В. *Циклотронный резонанс в узкозонных гетероструктурах на основе HgTe/CdTe(013) в квантующих магнитных полях* / А. В. Иконников, М. С. Жолудев, К. В. Маремьянин, К. Е. Спириин, А. А. Ластовкин, В. И. Гавриленко, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов // *Письма в ЖЭТФ*. — 2012. — Т. 95, № 8. — С. 452—456.
- A8. Ikonnikov, A. V. *Cyclotron resonance and interband optical transitions in HgTe/CdTe(013) quantum well heterostructures* / A. V. Ikonnikov, M. S. Zholudev, K. E. Spirin, A. A. Lastovkin, K. V. Maremyanin, V. Ya. Aleshkin, V. I. Gavrilenko, O. Drachenko, M. Helm, J. Wosnitza,

- M. Goiran, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretiskii, F. Teppe, N. Diakonova, C. Consejo, B. Chenaud, W. Knap // *Semiconductor Science and Technology*. — 2011. — Vol. 26, no. 12. — P. 125011.
- A9. Иконников, А. В. *Терагерцовая спектроскопия узкозонных гетероструктур с квантовыми ямами на основе HgTe/CdTe* / А. В. Иконников, А. А. Ластовкин, К. Е. Спирин, 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, № 11. — С. 837—841.
- A10. *Terahertz magnetospectroscopy of narrow-gap HgCdTe-based structures* / M. Zholudev, F. Teppe, W. Knap, M. Orlita, V. Aleshkin, V. Gavrilenko, N. Mikhailov, S. Dvoretiskii // 38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. — Mainz, Germany, Sept. 2013.
- A11. *Терагерцовая фотопроводимость гетероструктур с квантовыми ямами Hg_{1-x}Cd_xTe/Cd_yHg_{1-y}Te* / К. Е. Спирин, М. Жолудев, А. Антонов, В. Румянцев, В. Гавриленко, Н. Михайлов, С. А. Дворецкий // Тез. X Росс. конф. по физике полупроводников. — Нижний Новгород, сент. 2011. — С. 188.
- A12. *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 // Тез. докл. XV Международного Симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». Т. 1. — Нижний Новгород, 2011. — С. 151—152.

Жолудев Максим Сергеевич

**ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
КВАНТОВЫХ ЯМ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$**

Подписано к печати 14.11.2013 г. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе в Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институт физики микроструктур
Российской академии наук

607680, Нижегородская обл., Кстовский р-н, д. Афонино,
ул. Академическая, д. 7.