

На правах рукописи

Флоренцев Антон Андреевич

ДИНАМИКА РЕШЕТКИ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ЧЕТВЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТВЕРДЫХ
РАСТВОРОВ $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$

01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007

Работа выполнена в Государственном Технологическом университете "Московский институт стали и сплавов" (МИСиС) и в Государственном научно-исследовательском и проектно-институте редкометаллической промышленности "ГИРЕДМЕТ"

Научный руководитель

доктор физико-математических наук

Белогорохов Александр Иванович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Хохлов Дмитрий Ремович

кандидат физико-математических наук

Юрчук Сергей Юрьевич

Ведущая организация:

Государственное научное учреждение

«Институт химических проблем

микроэлектроники» (ИХПМ)

Защита состоится «01» ноября 2007 г. в 17.30 часов на заседании диссертационного совета Д.212.132.06 при Государственном Технологическом университете "Московский институт стали и сплавов" (МИСиС): 119049, г. Москва, Крымский вал, д. 3, ауд. 421.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИСиС

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью, просим направлять в адрес диссертационного совета: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, МИСиС.

Автореферат разослан «_____» _____ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук,

профессор



В.В. Гераськин

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Полупроводниковые твердые растворы $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ привлекают к себе внимание как перспективные материалы для производства на их основе фотоприемных устройств, работающих в инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн, включая 3-5 мкм и 8-12 мкм – так называемых «окна прозрачности» атмосферы. Для этого необходимо решить проблему выращивания гетероструктур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}/\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ с заданной шириной запрещенной зоны и с улучшенными структурными свойствами. В настоящее время для этих нужд в основном используются твердые растворы $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, на основе которых созданы приборы высокого качества. Тем не менее, существует ряд проблем, связанных с нестабильностью свойств этого материала, обусловленной неконтролируемым частичным перераспределением дефектов решетки и ионов ртути в объеме, особенно в приповерхностной области, этого полупроводника. Постоянное совершенствование технологии получения $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, направленное на улучшение структурных свойств материала, а также разработка новых конструкций ИК-фотоприемников позволило в большинстве случаев избавиться от этого недостатка. Вместе с тем, идет постоянный поиск новых подходов к решению данной проблемы. Введение четвертого компонента в тройной твердый раствор $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ иногда позволяет продвигаться в этом направлении. Введение Mn, Zn или Se в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ понижает нестабильность его кристаллической решетки. Так, например, добавление цинка приводит к упрочнению связей в твердом растворе, что влечет за собой улучшение его механических свойств и положительно сказывается на стабильности рабочих характеристик ИК-детекторов. В то же время, введение еще одного компонента приводит к необходимости решать проблему точного определения состава (x,y) $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. Исследование физико-химических свойств таких твердых растворов вызывает огромный научный интерес.

Следует иметь в виду, что многокомпонентные изовалентные полупроводниковые твердые растворы в целом ряде случаев не являются случайными сплавами. В них может наблюдаться коррелированное заполнение узлов подрешеток. Для того чтобы иметь возможность адекватно оценивать степень влияния эффектов упорядочения на процесс формирования твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, необходимо детально теоретически и экспериментально исследовать динамику их решетки, оптические и электрофизические свойства. К настоящему времени достаточно большое количество публикаций посвящено исследованиям колебаний кристаллической решетки двухкомпонентных полупроводников и лишь ограниченное их количество – четырехкомпонентным, в частности, твердым растворам группы A^2B^6 . В случае $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ подобные сведения отсутствуют. В настоящее время не исследованы оптические свойства четверных твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$

в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра, фононные колебания в дальнем инфракрасном диапазоне длин волн, недостаточно изучены структурные и электрофизические свойства указанных полупроводников, а также механизмы поглощения квантов света в области края основного поглощения. Результаты данных исследований имеют высокую значимость для получения фундаментальных знаний в области физики полупроводниковых многокомпонентных твердых растворов.

Настоящая работа являлась частью исследований, проводимых в соответствии с координационным планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ФГУП «Гиредмет» по темам: «Разработка базовых технологий изготовления эпитаксиальных полупроводниковых структур теллурида кадмия – ртути для производства крупноформатных матричных фотоприемников», шифр «Гепард»(2004), «Разработка опытно-промышленной технологии изготовления эпитаксиальных структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ для производства многоэлементных фотоприемников», шифр "Ягуар"(2005год).

Цель работы

Цель заключалась в разработке физико-химических основ получения и управления свойствами четверных полупроводниковых твердых растворов $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$ – перспективных материалов для нужд ИК- оптоэлектроники путем выполнения фундаментальных теоретических расчетов и математического моделирования динамики решетки, оптических свойств в УФ и ИК диапазонах длин волн, электрофизических свойств, а также в комплексной экспериментальной проверке результатов теоретических расчетов.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие конкретные задачи:

- исследовать спектральные зависимости комбинированной плотности состояний в области сингулярностей Ван Хова для твердых растворов $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$;
- изучить особенности и закономерности динамики кристаллической решетки полупроводниковых твердых растворов $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$ при изменении их состава;
- исследовать влияние эффектов структурного упорядочения на изменение фононных колебаний в многокомпонентных полупроводниковых твердых растворах;
- синтезировать и провести комплексные исследования оптических и электрофизических свойств четверных твердых растворов $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$;
- провести расчет значений частот основных оптических фононов $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$ во всем диапазоне составов и сравнить их с экспериментальными результатами, полученными с помощью метода инфракрасной Фурье-спектроскопии;
- получить зависимость значений ширины запрещенной зоны (E_g) от состава четверного твердого раствора $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$.

Научная новизна

1. Впервые найдены соотношения, позволяющие по положению особых точек E_0 и E_1 в оптических спектрах в видимом и УФ диапазонах длин волн оценивать состав x и y твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. Получено хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов в области составов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ($0.09 < x < 0.22$, $0.02 < y < 0.17$).

2. Установлены закономерности изменения экспериментальных оптических спектров в области фононных колебаний твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. Проведен детальный анализ экспериментальных спектральных зависимостей коэффициента отражения $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ в дальней инфракрасной области длин волн с применением комплексного подхода, включающего в себя соотношения Крамерса-Кронига, дисперсионный анализ и генетический алгоритм.

3. Впервые рассчитаны значения частот основных фононных мод четверного полупроводникового твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ в рамках модели однородных ячеечных смещений.

4. Выявлена природа появления дополнительных мод колебаний в оптических спектрах твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. Показано, что их присутствие не связано с проявлением корреляционных эффектов типа дальнедействующего упорядочения. Дополнительные решеточные колебания, частоты которых в плотности фононных состояний располагаются ниже по энергии, чем мода HgTe , обязаны своим появлением дефектам кристаллической решетки твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$.

5. Показано, что введение цинка в тройной раствор $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ позволяет с большей точностью контролировать положение края основного поглощения в области межзонных переходов.

6. Впервые проведены исследования спектральных зависимостей коэффициентов преломления и экстинкции в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Проведено сравнение с аналогичными параметрами тройных твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$.

Практическая значимость диссертации определяется тем, что полученные в настоящей работе результаты способствуют развитию фундаментальных знаний о физико-химических свойствах полупроводниковых твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. Совокупность данных о структурном совершенстве кристаллической решетки, оптических константах в области ультрафиолета и в дальней инфракрасной области длин волн необходима для оптимизации параметров и разработки дизайна ИК-фотоприемных устройств и приборов, изготовленных на основе гетероструктур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. Введение цинка в тройной твердый раствор $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ позволяет улучшить его прочностные харак-

теристики, что очень важно для приборов, работающих при пониженных температурах, т.к. необходимо обеспечить их стабильную работу при многократном термоциклировании. Результаты исследований могут быть положены в основу разработки перспективной технологии получения материалов ИК- техники с заданными свойствами на базе четверных полупроводниковых твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$.

На защиту выносятся:

1. Выбранные технологические режимы выращивания методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) и последующего отжига эпитаксиальных слоев (ЭС) четверных полупроводниковых твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ на подложках $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ($0.02 < y < 0.06$) из растворов-расплавов на основе Te в запаянной кварцевой ампуле с удалением остатков раствора-расплава путем центрифугирования, позволяющие получать ЭС с заданными электрофизическими свойствами.

2. Установлена зависимость положения особых точек E_0 и E_1 в оптических спектрах в видимом и УФ диапазонах длин волн от состава x и y материала $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. Получено хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов в области составов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ($0.09 < x < 0.22$, $0.02 < y < 0.17$).

3. Установлено, что значения частот основных оптических фононов четверных полупроводниковых твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, рассчитанные в рамках модели однородных ячеечных смещений, удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами, полученными из спектров отражения в области фононного резонанса с применением комбинированного подхода, включающего в себя соотношения Крамерса-Кронига и дисперсионный анализ, а также генетический алгоритм. Это свидетельствует о том, что в объеме выращенных эпитаксиальных слоев твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ атомы Cd, Hg и Zn располагаются по катионной подрешетке произвольно, т.е. не проявляются корреляционные эффекты. Это подтверждается тем, что значения параметров затухания фононных колебаний равны $4.1 \div 6.7 \text{ см}^{-1}$ для продольных и $2.4 \div 5.2 \text{ см}^{-1}$ для поперечных оптических фононов.

4. Показано, что мода решеточных колебаний, располагающаяся в ИК спектрах отражения $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ в области $\sim 137 \text{ см}^{-1}$, относится к категории локальных, а не кластерных мод, как это имело место в полупроводниковом материале $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. В последнем случае спектральное положение кластерной моды оставалось неизменным в диапазоне составов $0.19 < x < 0.48$, в то время как в случае твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ незначительное увеличение содержания кадмия повлекло за собой смещение указанной локальной моды на $\geq 1 \text{ см}^{-1}$ в сторону больших энергий.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в выборе направления исследований, формулировке и постановке цели и задач работы, разработке режимов выращивания твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, непосредственном участии в проведении экспериментов, проведении теоретических исследований, обработке и интерпретации полученных результатов, написании статей и подготовке докладов.

Работы проводились в тесном взаимодействии с соавторами, которые не возражают против использования в диссертации совместно полученных результатов.

Апробация работы проведена в ходе выступлений на российских и международных научных конференциях и симпозиумах, в том числе: VI Российской конференции по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2003 г.), 13th Intern. Workshop on room-temperature semiconductors X- and gamma- ray detectors (2003 IEEE Nuclear Science Symposium, Portland, Oregon, USA, 2003), XVIII Международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (г. Москва, Россия, 2004 г.), 2nd Intern. conf. on materials science and condensed matter physics (MSCMP-2004, Chisinau, Moldova, 2004), VI Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (С.-Петербург, Россия, 2004 г.), - XI Национальной конференции по росту кристаллов (Москва, ИК РАН, Россия, 2004 г.), VII Российской конференции по физике полупроводников (Москва, Звенигород, 2005 г.).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 3 в журналах, входящих в перечень, утвержденный ВАК РФ. Список основных работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 177 страницах, иллюстрируется 62 рисунками, сопровождается 16 таблицами и включает в себя введение, 5 глав, выводы и список используемой литературы, включающий 174 наименования.

Краткое содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приведены литературные данные о физико-химических свойствах бинарных соединений HgTe , CdTe , ZnTe и твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, $\text{Hg}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. Проведен критический анализ возможностей различных методов эпитаксиального выращивания материала $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, присущих им достоинств и недостатков. Представлена зонная структура тройных полупроводниковых твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ и $\text{Hg}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.

В данной главе подробно рассмотрены особенности метода ЖФЭ как наиболее перспективного для выращивания ЭС $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. Особое внимание уделено вопросам поддержания стабильности состава жидкой фазы и удаления остатков раствора-расплава с поверхности выращенных ЭС при использовании различных вариантов метода ЖФЭ.

Проведен подробный анализ литературных данных, касающихся исследований вибрационных свойств многокомпонентных полупроводниковых твердых растворов экспериментальными методами комбинационного рассеяния света и инфракрасной спектроскопии. Обсуждаются теоретические модели, разработанные к настоящему времени, для интерпретации имеющихся данных.

Рассмотрены современные теоретические и экспериментальные подходы к проведению исследований динамики решетки полупроводниковых твердых растворов. Показано, какие изменения претерпевают основные решеточные колебания полупроводника, если в его объеме реализуются различные варианты атомного упорядочения.

В выводах к главе приводится постановка задач, которые необходимо было решить для достижения целей работы.

Во второй главе дано описание установки, режимов выращивания эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ и методов исследования их свойств. Особое внимание уделено математическим подходам к обработке экспериментальных результатов. Описывается применение комплексного подхода, включающего в себя соотношения Крамерса-Кронига и дисперсионный анализ для получения спектральных зависимостей мнимой и действительной частей диэлектрической проницаемости при проведении исследований решеточных колебаний $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. В дополнение к этому использовался генетический алгоритм в задачах математического моделирования оптических спектров многокомпонентных твердых растворов в области фононных колебаний.

Представлены разработанные технологические режимы выращивания методом ЖФЭ четверных полупроводниковых твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ на подложках $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ из растворов-расплавов на основе Te в запаянной кварцевой ампуле с удалением остатков раствора-расплава путем центрифугирования. Выращенные слои $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ имели p -тип проводимости, концентрацию и подвижность носителей заряда при T

$= 300\text{K}$ $p \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\mu \sim 200\text{--}240 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, соответственно. Проведенный послеростовой отжиг образцов в насыщенных парах ртути при температуре 360°C в течение 4–5 часов позволил уменьшить концентрацию дырок до уровня $(0.9\text{--}2.0) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а в некоторых случаях перевести материал $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ из p - типа в n - тип проводимости; при этом концентрация носителей заряда достигала значений $n = (1\text{--}3) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Подвижность носителей заряда в первом случае составляла $\mu > 500 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, во втором – $\mu > 1.5 \times 10^5 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$. Плотность дислокаций в эпитаксиальных слоях не превышала значений $(4\text{--}6) \times 10^4 \text{ см}^{-2}$. Состав, толщину и однородность их распределения по площади ЭС контролировали по спектрам оптического пропускания, с помощью микрорентгеноспектрального анализа и ОЖЭ- спектроскопии по сколу и по поверхности гетероструктур. В качестве подложек использовались монокристаллические пластины CdTe и $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ состава $y=(0,02\text{--}0,06)$ мольных долей ZnTe с кристаллографической ориентацией (111)В, вырезанные из кристаллов, выращенных методом Бриджмена из расплавов, по составу близких к стехиометрическому. Плотность дислокаций в подложках не превышала $5 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$, малоугловые границы, двойники и включения второй фазы отсутствовали.

В третьей главе обсуждаются особенности динамики решетки твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. В начале главы излагаются результаты выполненных расчетов значений частот основных оптических фононов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ в рамках модифицированной модели однородных ячеечных смещений, что позволило идентифицировать все основные колебания кристаллической решетки, оказывающие существенное влияние на оптические свойства данного материала в спектральной области, соответствующей однофононному резонансу. В рамках этой модели предполагается, что атомы одного сорта колеблются в твердом растворе в фазе и с одинаковой амплитудой, при этом анионная подрешетка упорядочена, а по узлам катионной подрешетки хаотически распределены атомы кадмия, цинка и ртути. К преимуществам этой модели можно отнести тот факт, что она не содержит подгоночных параметров, и значения межячеечных силовых постоянных удастся оценить из дисперсионных зависимостей оптических ветвей бинарных компонентов твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$.

Для нахождения частот внутриячеечных колебаний были использованы следующие уравнения:

$$\Phi_{ii}^{\perp} - \omega^2 + \sum_{j=1; j \neq i}^3 \Phi_{ij}^{\perp} = 0 \quad (1)$$

$$\Phi_{ii}^{\parallel} - \omega^2 + \sum_{j=1; j \neq i}^3 \Phi_{ij}^{\parallel} = 0 \quad (2),$$

где силовые постоянные Φ_{ij} характеризуют взаимодействие при относительном движении атомов в ячейках, ω – частота оптических фононов, i, j – номер элементарной ячейки. Совместное решение уравнений (1) и (2) позволило найти значения частот основных оптических фононов для всех комбинаций x и y . Были рассчитаны значения постоянных междоузельного взаимодействия, которые для твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ оказались равными ($\text{кг}\times\text{с}^{-2}$):

$$\begin{aligned}\varphi_{12} &= 4.36 \times 10^{-2} & \varphi_{13} &= 3.76 \times 10^{-1} \\ \varphi_{23} &= 3.31 \times 10^{-1} & \varphi_{21} &= 1.81 \times 10^{-1} \\ \varphi_{31} &= 4.66 \times 10^{-1} & \varphi_{32} &= 3.39 \times 10^{-1}\end{aligned}$$

Сравнение теоретических данных с экспериментальными и с результатами проведенных расчетов для тройных соединений $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ и $\text{Cd}_y\text{Zn}_{1-y}\text{Te}$ показали хорошее их соответствие. Для $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ с одновременным катионным замещением имеют место три типа внутриячеечных колебаний, характеризующихся различной концентрационной зависимостью продольно-поперечного расщепления. На рисунке 1 представлены результаты расчетов для предельных сечений $x+y=1$, y и $y=0$, x .

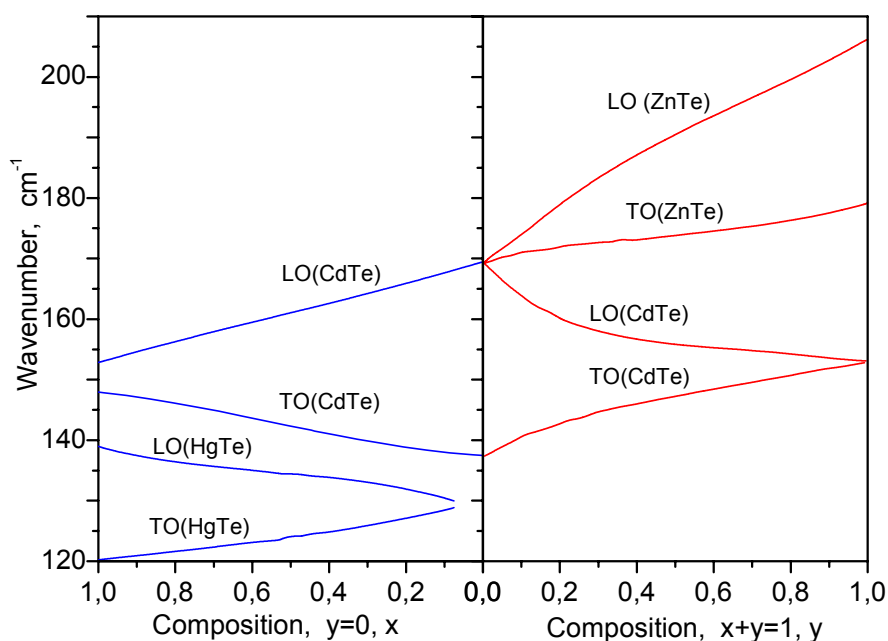


Рисунок 1 — Концентрационные зависимости продольно-поперечного расщепления внутриячеечных колебаний в предельных сечениях $y=0, x$ ($\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$) и $x+y=1, y$ ($\text{Cd}_y\text{Zn}_{1-y}\text{Te}$).

При введении в тройной твердый раствор четвертого компонента в количестве менее 2 ат.% в фононных спектрах появляются локальные примесные моды. Результаты проведенного расчета позволили установить значения частот искоемых колебательных мод:

$$\begin{aligned}\omega_{imp}^{\text{Zn}}(\text{HgTe}) &= 171.8 \text{ см}^{-1}; & \omega_{imp}^{\text{Zn}}(\text{CdTe}) &= 177.3 \text{ см}^{-1}; & \omega_{imp}^{\text{Cd}}(\text{HgTe}) &= 145.9 \text{ см}^{-1}; \\ \omega_{imp}^{\text{Hg}}(\text{CdTe}) &= 131.9 \text{ см}^{-1}; & \omega_{imp}^{\text{Hg}}(\text{ZnTe}) &= 140.5 \text{ см}^{-1}; & \omega_{imp}^{\text{Cd}}(\text{ZnTe}) &= 160.5 \text{ см}^{-1}.\end{aligned}$$

Хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных позволило сделать вывод о том, что выращенные эпитаксиальные слои твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ имеют удовлетворительное структурное совершенство, атомы Cd, Hg и Zn располагаются по катионной подрешетке произвольно. Этот вывод подтверждается еще и тем, что значения параметров затухания фононных колебаний находятся в пределах $4.1 - 6.7 \text{ см}^{-1}$ для продольных и $2.4 - 5.2 \text{ см}^{-1}$ для поперечных оптических фононов.

Имея в своем распоряжении информацию о значениях частот основных оптических фононов в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, можно понять, как должен выглядеть спектр отражения этого полупроводника в области решеточных колебаний, если корреляционные эффекты не проявляются. И, наоборот, как изменятся спектральные зависимости мнимой и действительной частей диэлектрической проницаемости $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, если указанные эффекты имеют место. В третьей главе уделено внимание детальному рассмотрению этого вопроса. Показано, что моды оптических фононов должны смещаться в разные стороны при проявлении эффектов кластерирования и частичного упорядочения по сравнению с их спектральным положением в случае равномерного распределения компонентов в катионной подрешетке $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. Это позволило отнести моду решеточных колебаний, которая располагается в области волновых чисел $\sim 137 \text{ см}^{-1}$ к категории локальных, а не кластерных мод, как это имело место в полупроводниковом материале $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [1]. В последнем случае спектральное положение кластерной моды оставалось неизменным в диапазоне составов $0.09 < x < 0.81$, в то время как в случае твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ незначительное увеличение содержания кадмия повлекло за собой смещение указанной локальной моды на $\geq 1 \text{ см}^{-1}$ в сторону больших энергий. Дополнительные решеточные колебания, частоты которых в плотности фононных состояний располагаются ниже по энергии, чем мода HgTe, обязаны своим появлением дефектам кристаллической решетки твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$.

В четвертой главе приведены результаты исследований оптических свойств эпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ в видимой и ультрафиолетовой частях спектра с целью нахождения зависимости спектрального положения особых точек от состава твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. Имея одно уравнение и два неизвестных (x, y), невозможно однозначно определить состав материала. Требуется привлечение дополнительных экспериментальных методов для решения данной задачи. В частности, в дополнение к регистрации спектров поглощения в области межзонных переходов можно использовать регистрацию спектральных зависимостей коэффициента отражения $R(E)$ в видимом и УФ-диапазонах длин волн. В области больших энергий фотонов в спектральных зависимостях $R(E)$ наблюдаются экстремумы, которые обусловлены переходами E_1 из валентной зоны в зону проводимости в

направлении $[111]$ (Λ) зоны Бриллюэна, $E_1 + \Delta_1$ в том же направлении из зоны, отщепленной за счет спин-орбитального взаимодействия, E_2 – межзонные переходы и т. д. На рисунке 2 в качестве примера приведены экспериментальные спектральные зависимости значений показателей преломления (n) и поглощения (k) материала $\text{Cd}_{0.18}\text{Hg}_{0.8}\text{Zn}_{0.02}\text{Te}$.

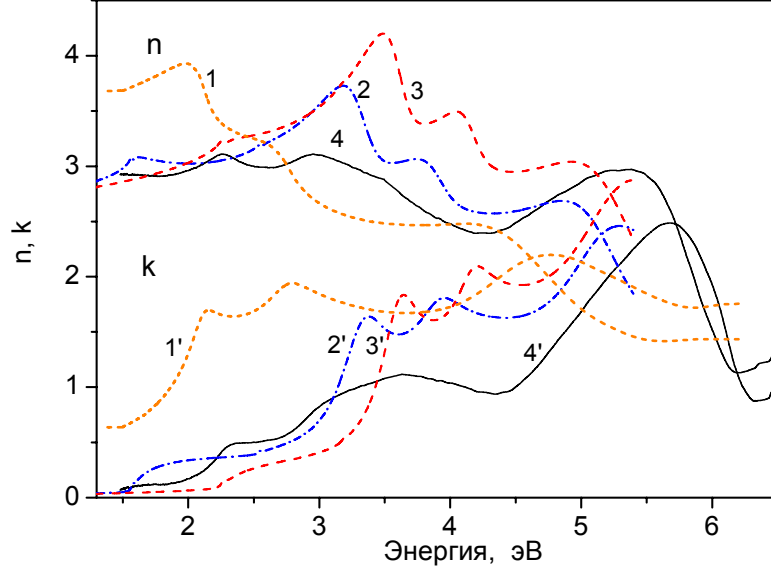


Рисунок 2 — Зависимости n и k для: (1, 1') – HgTe , (2, 2') – CdTe , (3, 3') – ZnTe , (4, 4') – $\text{Cd}_{0.18}\text{Hg}_{0.8}\text{Zn}_{0.02}\text{Te}$.

Для сравнения приведены аналогичные данные для CdTe , HgTe , ZnTe . Из рисунка 2 видно, что особые точки типа E_0 располагаются в области энергий фотонов 2.28 эВ для ZnTe и 1.51 эВ для CdTe . Для твердого раствора $\text{Cd}_{0.18}\text{Hg}_{0.8}\text{Zn}_{0.02}\text{Te}$ подобное значение энергии должно быть равным 0.138 эВ. Как правило, изменение формы спектральных зависимостей $R(E)$ в области критических точек $E_0 + \Delta_0$ не значительно, поэтому регистрировать их положение с высокой точностью достаточно сложно. Иная картина наблюдается в случае E_1 . В силу того, что она является седловой точкой, в ее окрестности имеет место существенное изменение вида функции плотности состояний, и это обуславливает хорошо выраженный рельеф $R(E)$ в этой спектральной области. По этой причине представлялось вполне естественным остановить свой выбор на E_1 при решении проблемы определения состава твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$.

Использование полученных экспериментальных результатов позволило составить уравнение, связывающее состав (x, y) $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ и энергию $E_1^{300}(x, y)$ (эВ) перехода в окрестности особой точки E_1 :

$$E_1^{300}(x, y) = \frac{(1-x-y)(2.138x + 0.546x^2 - 0.485xy + 2.138y + 1.519y^2 + 0.74x^3 + 0.74x^2y + 0.185xy^2)}{(1-x)(1-y) - (x+y-1)^2} + \frac{xy(3.643 - 0.115x - 0.23y)}{(1-x)(1-y) - (x+y-1)^2} \quad (3)$$

Выражение (3) было использовано для проведения расчетов спектрального положения перехода типа E_1 в бинарных кристаллах и тройных твердых растворах, составляющих $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$. В итоге были получены результаты, которые хорошо согласуются как с экспериментальными данными, так и с результатами, почерпнутыми из литературных источников.

В этой же главе приведены результаты проведенных исследований оптических свойств ЭС $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$ ($0.2 < x < 0.3$, $y=0$), выращенных методом ЖФЭ на подложках $Cd_{1-y}Zn_yTe$. Из оптических спектров в области края основного поглощения получены значения ширины запрещенной зоны для различных значений состава материала ЭС при поэтапном уменьшении толщины слоя в результате химического травления. Параллельно с этим проведены исследования изменений в дисперсионных зависимостях коэффициента отражения в области решеточных колебаний. Было установлено, что имеет место характерная картина перераспределения сил осцилляторов однофононных резонансов по мере продвижения от поверхности ЭС к гетерогранице. Из сравнения экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов сделан вывод о том, что в непосредственной окрестности гетерограницы ЭС-подложка в процессе роста ЭС при определенных условиях образуется тонкий слой твердого раствора $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$, то есть цинк в данной области образца необходимо рассматривать не как примесь, а как один из компонентов катионной подрешетки. Следовательно, при рассмотрении вопроса о согласовании параметров подложки и слоя необходимо всегда принимать во внимание диффузионные процессы цинка в ЭС. Подобный факт можно рассматривать как альтернативу переходному слою, формирование которого иногда необходимо для согласования параметров кристаллических решеток слоя и подложки, а также для уменьшения количества различного рода дефектов в области интерфейса и их влияния на время жизни носителей заряда в ЭС $Cd_xHg_{1-x}Te$.

Пятая глава содержит результаты исследований электрофизических свойств эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$, выращенных на подложках $Cd_{1-x}Zn_xTe$. Было обнаружено, что в отсутствие магнитного поля зависимости значений удельного сопротивления от обратной температуры $\rho = f(1/T)$ имели для материала $Cd_xHg_{1-x-y}Zn_yTe$ n - типа проводимости следующий вид: экспоненциальный участок при температурах выше 100К, что определяется собственной проводимостью; в области примесной проводимости при $T \leq 100K$ понижение температуры до $\sim 50K$ вызывало падение сопротивления вследствие «вымораживания» оптических фононов, а при $T \leq 10K$ сопротивление не менялось по причине вырождения примесных носителей заряда. В сильных магнитных полях сопротивление образцов монотонно увеличивалось при понижении температуры в интервале

1.4-5К. При этом температурная зависимость сопротивления при $10 \leq T \leq 60\text{К}$ проявляла активационный характер:

$$\rho(T) \propto \exp(\varepsilon_A/k_B T) \quad (4),$$

где $\varepsilon_A = \varepsilon_A(H)$ – зависящая от магнитного поля энергия активации. Для исследованных образцов значения указанного параметра находились в пределах 0.81-1.78 мэВ. При температурах ниже 10К зависимости $\rho(T)$ не описывались с помощью выражения (4), а принадлежали к типу зависимостей с переменной энергией активации, уменьшающейся при понижении температуры.

До настоящего времени в литературе обсуждаются вопросы о необычном поведении кинетических коэффициентов в кристаллах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при низких температурах. К таким аномалиям относят двойную инверсию знака коэффициента Холла при изменении температуры, его сильную зависимость от магнитного поля, а также значительные величины как поперечного, так и продольного магнитосопротивления [2]. Эти особенности гальваномагнитных свойств связаны, прежде всего, с нарушениями строения кристаллической решетки, и для правильного их понимания необходимо учитывать, что электроны находятся в поле, создаваемом хаотически расположенными донорами и акцепторами. Донорные состояния в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ связаны с неконтролируемыми примесями, в том числе, с межузельными атомами ртути, которые могут появляться в процессе термической обработки и дальнейшего отжига материала. Вследствие малости эффективной массы на дне зоны проводимости и значительной диэлектрической проницаемости ε_0 они являются мелкими. По водородоподобной модели, которая в этом случае является хорошим приближением, для энергии ионизации примеси ε_A и эффективного Боровского радиуса a_B получаются следующие оценки: $\varepsilon_A = 13600 \times m_e/m_0 \times \varepsilon_0^2 \approx 0.2\text{мэВ}$, $a_B(\text{\AA}) = 0.53 \times m_0/m_e \times \varepsilon_0$. При $m_e/m_0 = 5 \times 10^{-3}$ и $\varepsilon_0 = 17.4$ $a_B = 1800\text{\AA}$. Следовательно, условие сильного легирования $N_D \times a_B^3 \gg 1$ выполняется уже при $N_D \geq 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. В реальных материалах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ концентрация примесей и дефектов выше, вследствие чего волновые функции примесных состояний перекрываются, в материале *n*- типа проводимости электроны делокализованы и проводимость может проявлять при низких температурах металлический характер. Из температурных зависимостей коэффициента Холла исследованных образцов была определена концентрация вакансий ртути. Результаты исследований легли в основу разработанных режимов отжига гетероструктур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, использование которых позволило получить ЭС с концентрацией свободных носителей заряда при 77.3К $n = (1 - 3) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Для изменения электрофизических параметров ЭС $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ проводился их низкотемпературный отжиг в парах летучего компонента (в данном случае в парах Hg). В

ходе процесса установка сначала в течение 2 часов выводилась на рабочий режим (370°C), затем образцы выдерживались при этой температуре 4–5 часов. По окончании процесса производилась закалка образцов для того, чтобы предотвратить образование вакансий ртути во время медленного охлаждения ампулы с образцами.

В ОАО "МЗ "Сапфир" на основе ЭС $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ n - типа проводимости были изготовлены фотоприемные устройства, основные характеристики которых сравнимы с характеристиками модульных фотоприемников на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Обнаружительная способность достигала значений $D^* \sim 10^{10} \text{ Вт}^{-1}\text{Гц}^{1/2}\text{см}$ при вольтваттной чувствительности $S_{U \text{ lmax}} > 7 \times 10^4 \text{ В} \times \text{Вт}^{-1}$, что подтверждает перспективность использования материала $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ при производстве многоэлементных фотоприемных устройств.

Выводы

1. Исследованы оптические свойства четверного полупроводникового твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ в УФ- и видимой областях спектра. Найдены соотношения, позволяющие по положению особых точек E_0 и E_1 в оптических спектрах оценивать состав x и y данного материала во всем диапазоне составов. Получено хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов для $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ $0.09 < x < 0.22$, $0.02 < y < 0.17$. Измерены спектры показателя преломления образцов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ в ультрафиолетовой области спектра.

2. Выполнены расчеты значений частот основных оптических фононов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ в рамках модели однородных ячеечных смещений, что позволило идентифицировать все основные колебания кристаллической решетки, оказывающие существенное влияние на оптические свойства данного материала в спектральной области, соответствующей однофононному резонансу.

3. Исследованы оптические свойства полупроводникового твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ в инфракрасном диапазоне длин волн. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных спектральных зависимостей диэлектрической функции твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ разного состава при температурах 295 и 78K, получено их хорошее совпадение. Дополнительные решеточные колебания, частоты которых в плотности фононных состояний располагаются ниже по энергии, чем мода HgTe , обязаны своим появлением дефектам кристаллической решетки твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$.

4. Теоретически исследовано влияние эффектов структурного упорядочения на изменение фононных колебаний в многокомпонентных полупроводниковых твердых растворах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. Результаты проведенных расчетов позволили выявить основную причину появления дополнительной моды колебаний в спектральной плотности фононных состояний полупроводникового твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. Установлено, что мода решеточных колебаний, которая располагается в области волновых чисел $\sim 137 \text{ см}^{-1}$ относится к категории локальных, а не кластерных мод.

5. Установлено, что в эпитаксиальных слоях $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ($0.09 < x < 0.22$, $0.02 < y < 0.17$), выращенных на подложках $\text{Cd}_y\text{Zn}_{1-y}\text{Te}$ ($0.02 < y < 0.06$) методом жидкофазной эпитаксии в запаянной кварцевой ампуле с удалением раствора-расплава путем центрифугирования, распределение основных компонентов твердого раствора по глубине эпитаксиального слоя на расстоянии 3–4 мкм от гетерограницы постоянно, что подтверждается результатами масс-спектрометрических методов анализа.

6. Исследованы оптические свойства эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ($0.2 < x < 0.3$, $y=0$), выращенных методом жидкофазной эпитаксии на подложках $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$. Проведены исследования изменений в дисперсионных зависимостях коэффициента отражения в области решеточных колебаний. Установлено, что имеет место характерная картина перераспределения сил осцилляторов однофононных резонансов по мере продвижения от поверхности ЭС к гетерогранице. Из сравнения экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов сделан вывод о том, что в непосредственной окрестности гетерограницы ЭС-подложка в процессе роста ЭС при определенных условиях образуется тонкий слой твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, то есть цинк в данной области образца необходимо рассматривать не как примесь, а как один из компонентов катионной подрешетки. Следовательно, при рассмотрении вопроса о согласовании параметров подложки и слоя необходимо принимать во внимание диффузию цинка в ЭС.

7 Проведены исследования электрофизических свойств ЭС твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ($0.09 < x < 0.22$, $0.02 < y < 0.17$) в температурном интервале (4.2–300)К методом эффекта Холла. Результаты исследований легли в основу разработанных режимов отжига гетероструктур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, использование которых позволило получить ЭС с концентрацией свободных носителей заряда при 77.3К $n = (1 - 3) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, что необходимо для изготовления инфракрасных фотоприемников, имеющих обнаружительную способность $D^* \sim 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ Гц}^{1/2} \text{ см}$ при вольтватной чувствительности $S_{U \text{ lmax}} > 7 \times 10^4 \text{ В} \times \text{Вт}^{-1}$.

Основные публикации по теме диссертации

1. А.И. Белогорохов, Л.И. Белогорохова, И.А. Денисов, Н.А. Смирнова, С.П. Кобелева, А.А. Флоренцев, Исследование методами инфракрасной и фотоэлектронной спектроскопии эпитаксиальных структур p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdZnTe}$, Материалы электронной техники, 2, 43-49 (2003).
2. A.I. Belogorokhov, N.A. Smirnova, I.A. Denisov, A.A. Florensev, Study and numerical simulation of surface morphology and composition homogeneity of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdZnTe}$ epitaxial structures, Mat. 13th Intern. Workshop on room-temperature semiconductors X- and gamma- ray detectors (2003 IEEE Nuclear Science Symposium), Portland, Oregon, USA, October 19-25, 2003, p. R8-21.

3. A.I. Belogorokhov, A.A. Florensev, I.A. Denisov, N.A. Smirnova, L.I. Belogorokhova, Optical properties of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ single crystals ($0 < x < 0.1$) in the infrared spectral region, Mat. 13th Intern. Workshop on room-temperature semiconductors X- and gamma- ray detectors (2003 IEEE Nuclear Science Symposium), Portland, Oregon, USA, October 19-25, 2003, p. R8-23.
4. Н.А. Смирнова, А.И. Белогорохов, И.А. Денисов, А.А. Флоренцев, Т.Г. Югова, Исследование структурного совершенства эпитаксиальных слоев гетероструктур $\text{CdHgTe}/\text{CdZnTe}$, Тезисы докладов VI Российской конф. по физике полупроводников, Санкт-Петербург, 27-31 октября 2003 г., Вт-2.11с.
5. Белогорохов А.И., Денисов И.А., Смирнова Н.А., Флоренцев А.А., Н.В. Пашкова, Исследование характера изменения решеточных колебаний в зависимости от пространственного распределения цинка по глубине эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных на подложках $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, Тезисы докладов XVIII Международной конф. По фотоэлектронике и приборам ночного видения, 25-28 мая 2004 г., Москва, Россия, с. 177-178.
6. Денисов И.А., Смирнова Н.А., Белогорохов А.И., Флоренцев А.А., Шматов Н.И., Прошкин Ю.Н., Ларина Г.В., Базарова Л.Н., Исследование свойств эпитаксиальных слоев CdHgTe , выращенных методом ЖФЭ, и характеристик регистрирующих ИК-модулей на их основе, Тезисы докладов XVIII Международной конф. По фотоэлектронике и приборам ночного видения, 25-28 мая 2004 г., Москва, Россия, с. 80.
7. A.I. Belogorokhov, A.A. Florentsev, Far-Infrared reflectivity study of lattice vibrations of CdHgZnTe epitaxial layers grown on CdZnTe substrates, Book of abstracts of the 2nd Intern. Conf. on Materials Science and Condensed Matter Physics (MSCMP-2004), Chisinau, Moldova, September 21-25, 2004, p. 191.
8. А.И. Белогорохов, А.А. Флоренцев, И.А. Белогорохов, А.В. Елютин, Оптические и вибрационные свойства твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, Тезисы докладов VI все-российской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 6-10 декабря 2004 г., с. 12.
9. А.И. Белогорохов, А.А. Флоренцев, Динамика решетки твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, Тезисы доклада на XI национальной конференции по росту кристаллов, Москва, ИК РАН, декабрь 2004 г., с. 150.
10. А.И. Белогорохов, И.А. Денисов, Н.А. Смирнова, А.А. Флоренцев, Н.В. Пашкова, Исследование характера изменения решеточных колебаний в зависимости от пространственного распределения цинка по глубине эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных на подложках $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, Прикладная физика 3, 78-83 (2005)..
11. A.I. Belogorokhov, I.A. Denisov, N.A. Smirnova, A.A. Florentsev, and N.V. Pashkova, Study of nature of lattice vibration variations depending on a spatial distribution of zinc over the depth of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ epitaxial layers grown on $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ substrates, SPIE 5834, 274-281 (2005).

12. А.И. Белогорохов, А.А. Флоренцев, Л.И. Белогорохова, А.В. Елютин, Динамика решетки твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, Тезисы докладов VII Российской конференции по физике полупроводников, Москва, Звенигород, 18-23 сентября 2005 г., с. 128.
13. А.И. Белогорохов, А.А. Флоренцев, И.А. Белогорохов, Н.В. Пашкова, А.В. Елютин. Ширина запрещенной зоны и оптические свойства твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ в ультрафиолетовой и видимой области спектра, ФТП 40 (3), 281-286 (2006)..
14. А.И. Белогорохов, А.А. Флоренцев, И.А. Белогорохов, А.В. Елютин. Оптические и вибрационные свойства твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x-y}\text{Zn}_y\text{Te}$, ФТТ 48(4), 597-606 (2006).

Цитируемая литература

1. S.P. Kozyrev, L.K. Vodopyanov, R. Triboulet. Sol. St. Commun. 45, 383 (1983).
2. Елизаров А.И., Иванов-Омский В.И., Корняш А.А., Петряков В.А. К вопросу об аномалиях кинетических коэффициентов в $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, ФТП, 18(2), 201-205 (1984).

