

На правах рукописи

ГРИГОРЬЕВ ДЕНИС ВАЛЕРЬЕВИЧ

**РАДИАЦИОННОЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ
В ВАРИЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$,
ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ**

01.04.10 – физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск - 2005

Работа выполнена в Томском государственном университете и
в Сибирском физико-техническом институте при Томском государственном
университете

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Войцеховский Александр Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, с.н.с.
Зыков Владимир Михайлович

кандидат физико-математических наук, с.н.с.
Нефёдцев Евгений Валерьевич

Ведущая организация:

Кемеровский государственный университет

Защита состоится «14» декабря 2005 г. в 17 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.269.02 при Томском политехническом
университете (634050, г.Томск, пр.Ленина, 30).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского
политехнического университета.

Автореферат разослан «11» ноября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



М.В. Коровкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка различного рода эффективных фотоприемных устройств (ФПУ), работающих в инфракрасной (ИК) области спектра, является одной из актуальных задач современной микро- и оптоэлектроники. Полупроводниковые соединения $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) в настоящее время являются одним из основных материалов для создания собственных ИК фотоприемников на диапазон длин волн 3 - 5 и 8 - 14 мкм. Данный полупроводник характеризуется широким спектральным диапазоном fotocувствительности (1 - 25 мкм), высокой квантовой эффективностью в диапазоне перекрываемых длин волн.

Большие технологические трудности при выращивании объемного материала с параметрами необходимыми для создания высокочувствительных ИК приемников обусловили значительный интерес к изучению свойств материала, выращенного эпитаксиальными методами, в том числе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Преимуществами метода МЛЭ являются высокая однородность свойств материала по поверхности технологической шайбы и возможность выращивания эпитаксиальных структур со сложным профилем распределения состава (варизонные структуры) и легирования, необходимыми для приборного исполнения.

Наряду с исследованием исходных свойств эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом МЛЭ, важной является задача контролируемого изменения параметров материала с целью получения заданных полупроводниковых структур. Большое внимание при этом уделяется исследованию взаимодействий ионизирующих излучений с материалом с целью изучения его радиационной стойкости и оптимизации технологии ионной имплантации. При этом наиболее актуальным является изучение природы радиационных дефектов (РД) в материале, так как в случае КРТ, они полностью определяют электрофизические и фотоэлектрические свойства облученного материала. В литературе имеется большое количество данных по изучению процессов радиационного дефектообразования в объемном материале КРТ. Однако, несмотря на большой накопленный экспериментальный материал, нет однозначных моделей образования и эволюции РД в КРТ, что затрудняет дальнейшее развитие радиационной технологии прецизионного управления параметрами исходного материала. Кроме того, практически не проводились исследования процессов радиационного дефектообразования в эпитаксиальном материале КРТ, выращенном методом МЛЭ. Следует также отметить, что в настоящее время для улучшения параметров создаваемых фотоприемных устройств широкое применение находят эпитаксиальные пленки с различными варизонными слоями, как в приповерхностной области, так и в объеме материала в близи подложки.

В связи с выше изложенным актуальным является исследование закономерностей и механизмов образования и эволюции РД в КРТ, в частности в эпитаксиальном материале, выращенном методом МЛЭ. При этом большое значение приобретает вопрос о влиянии области переменного состава материала на процессы радиационного дефектообразования.

Целью диссертационной работы является исследование влияния радиационных воздействий на свойства эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом МЛЭ, и изучение процессов радиационного дефектообразования при ионной имплантации.

Объектом исследований, главным образом, являлись эпитаксиальные пленки КРТ, выращенные методом МЛЭ в ИФП СО РАН г. Новосибирска. Материал подложки - GaAs с ориентацией поверхности (013) или CdTe (112). В случае использования в качестве подложки GaAs между подложкой и пленкой выращивался буферный слой, который состоит из двух слоев - ZnTe и CdTe, толщиной 0.05 и 6 мкм, соответственно. Особенностью эпитаксиальных пленок являлось наличие варизонных широкозонных слоев на границе пленка - буферный слой и в приповерхностной области материала (Рис. 1). Толщина варизонных слоев составляла ~1 мкм. Состав материала на границе с буферным слоем составлял $x = 0.3 - 0.4$, а на поверхности эпитаксиальной пленки $x = 0.3 - 0.6$. В ряде случаев, для сравнительных экспериментов подготавливались объемные монокристаллы КРТ, выращенные методом твердотельной рекристаллизации состава $x = 0.20 - 0.23$ толщиной 50 – 100 мкм.

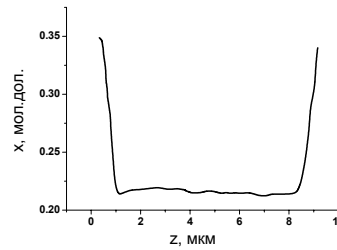


Рис.1. Профиль распределения состава x по глубине z эпитаксиальной пленки $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$. Толщина пленки отсчитывается от границы с буферным слоем.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- Расчет электрофизических параметров эпитаксиальной пленки КРТ с варизонными слоями и определение влияния этих слоев на результаты экспериментальных измерений параметров эпитаксиального слоя.
- Исследование влияния потоков ионизирующих излучений на электрофизические параметры эпитаксиальных пленок, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.
- Развитие модели радиационного дефектообразования в КРТ при ионной имплантации и уточнение ее параметров на основе экспериментальных результатов измерения пространственного распределения электрически активных радиационных дефектов.
- Изучение влияния ионной имплантации на свойства эпитаксиального материала КРТ и исследование процессов радиационного дефектообразования в области переменного состава эпитаксиальной пленки.

Научная новизна и ценность диссертационной работы заключается в следующем.

1. Впервые проведено исследование влияния потоков электронов, γ -квантов, ионов на электрофизические параметры эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, и сравнение полученных результатов с данными по облучению кристаллов КРТ, выращенных объемными методами. Показано, что механизмы образования электрически активных РД и процесс их

эволюции протекают сходным образом, как в эпитаксиальных пленках, так и в объемном материале КРТ.

2. Впервые получены профили распределения электрически активных радиационных дефектов в эпитаксиальных пленках МЛЭ КРТ, с различным распределением состава в области внедрения имплантируемых ионов. Проведено сравнение результатов ионной имплантации в объемный материал КРТ и в эпитаксиальные пленки, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Выявлены основные факторы, определяющие различие в результатах имплантации ионов бора в объемный материал КРТ и эпитаксиальные пленки с переменным составом материала в области внедрения имплантанта. Получено дополнительное экспериментальное подтверждение предположения того, что основными радиационными дефектами определяющими свойства облученного КРТ, являются дефекты в ртутной подрешетке материала.
3. Развита модель радиационного дефектообразования в КРТ при ионной имплантации. Показано, что анализ экспериментальных результатов измерения профилей пространственного распределения электрически активных радиационных дефектов, позволяет оценить параметры модели радиационного дефектообразования в КРТ, таким образом, что результаты расчета не только качественно, но и количественно согласуются с экспериментальными данными.

Практическая ценность работы определяется следующими результатами.

1. Показано, что исследуемые эпитаксиальные пленки КРТ, выращенных методом МЛЭ, обладают высокой радиационной стойкостью к внешним воздействиям (γ -кванты, высокоэнергетические электроны) при температуре 300 К в пределах применяемых потоков облучения.
2. Предложен способ оценки параметров теоретической модели радиационного дефектообразования в КРТ, позволяющий получить не только качественное, но количественное согласие результатов теоретического расчета и экспериментальных данных.
3. Полученные результаты исследований влияния облучения ионов бора на электрофизические параметры эпитаксиальных пленок КРТ, могут быть использованы для оптимизации режимов ионной имплантации в эпитаксиальный материал с широкозонными варизонными слоями в приповерхностной области при изготовлении диодных структур.

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие основные положения, выносимые на защиту.

1. Коэффициент комплексообразования α_i (характеризующий динамику накопления электрически активных радиационных дефектов донорного типа в ртутной подрешетке материала при ионной имплантации $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$) определяется из тангенса угла наклона $\text{tg}\beta$ зависимости натурального логарифма пространственного распределения объемной концентрации электронов, измеренной в области материала, заглубленной по сравнению с районом генерации первичных радиационных дефектов, и областью наибольшего разупорядочивания кристаллической решетки материала, как $\alpha_i = D_i \cdot (\text{tg}\beta)^2$, где D_i – коэффициент диффузии междоузельных атомов ртути.

2. При имплантации ионов бора в варизонные эпитаксиальные пленки $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ скорость введения электрически активных радиационных дефектов $dN_S/d\Phi$ в диапазоне доз облучения $\Phi < 10^{14} \text{ см}^{-2}$ экспоненциально убывает с увеличением состава материала x в области среднего проецированного пробега R_p ионов бора. Замедление динамики накопления электрически активных радиационных дефектов обуславливает наблюдаемые отличия результатов ионной имплантации в объемный материал КРТ постоянного состава и в варизонные эпитаксиальные пленки с переменным составом в области внедрения имплантанта.
3. При ионной имплантации эпитаксиальных пленок КРТ с приповерхностным варизонным слоем влиянием градиента коэффициента диффузии первичных радиационных дефектов и встроенного электрического поля, образующихся вследствие наличия градиента состава эпитаксиальной пленки в области радиационного дефектообразования, на процесс миграции первичных радиационных дефектов можно пренебречь при значениях градиента состава менее $0.4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$.
4. Облучение варизонных эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом МЛЭ, при температуре 300 К электронами в диапазоне энергий 400 кэВ – 2 МэВ и γ -квантами с энергией 1.25 МэВ интегральными потоками вплоть до $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и $1.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, соответственно, не приводит к образованию электрически активных дефектов и центров рекомбинации неосновных носителей заряда в различных концентрациях.

Применяемые методы исследований. В эксперименте - а) метод ЭДС Холла в конфигурации Ван-дер-Пау для измерения интегральных электрофизических параметров материала; б) метод дифференциальных холловских измерений при последовательном удалении исследуемого материала травлением для определения пространственного распределения электрофизических параметров по глубине облученных образцов; в) метод определения постоянной времени релаксации сигнала фотопроводимости при импульсном возбуждении для измерения времени жизни неосновных носителей заряда; г) оптическая микроскопия для изучения состояния поверхности имплантированных образцов. В расчете – моделирование процессов радиационного дефектообразования путем численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих кинетику образования, миграции и комплексообразования дефектов, и уравнения электронейтральности в облученном полупроводнике.

Достоверность научных положений и выводов, полученных в работе, определяется корректностью методики электрофизических измерений и согласованностью экспериментальных данных с расчетными. Полученные в работе данные не противоречат основным положениям радиационной физики полупроводников и известным результатам по исследованию процессов радиационного дефектообразования в КРТ. Данные, полученные в работе, согласуются с результатами работ отечественных и зарубежных авторов.

Личный вклад автора. Общая постановка, обоснование задач исследований, обсуждение полученных результатов выполнены совместно с научным руководителем и сотрудниками кафедры квантовой электроники и фотоники ТГУ

А.П. Коханенко и А.Г. Коротаевым. Измерение фотоэлектрических параметров образцов КРТ проведено совместно с аспирантом радиофизического факультета ТГУ М.Ф. Филатовым. Подготовка образцов к исследованиям, все электрофизические измерения исследуемых образцов и теоретические расчеты, а также анализ и интерпретация полученных результатов, формулирование выводов и научных положений проведены автором диссертации.

Связь с плановыми работами. Работа выполнялась в рамках госбюджетной темы "Исследование физических свойств и разработка методов контроля структур неоднородных полупроводниковых сред и материалов, магнитодиэлектриков и структур на их основе с целью создания функциональных материалов для радиоэлектроники" (№ гос. рег. 01.200.202367) и при финансовой поддержке грантов The Royal Society of London (UK) "Semiconductor modification and implantation using high power pulsed beams" (№ 14123) и программой Университеты России "Радиационно-индуцированная диффузия и сегрегация примесей и дефектов при модификации свойств полупроводниковых соединений мощными импульсными пучками ионов"(№ 015.06.01.11).

Апробация работы. Основные результаты и выводы, приведенные в диссертации, докладывались и обсуждались на 11 Международной конференции "Радиационная физика и химия твердого тела" (Томск, 2000 г.), Международной конференции "Физико-химические процессы в неорганических материалах" (Кемерово, 2001, 2004 гг.), Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2002, 2004 гг.), Международной конференции по твердотельным кристаллам (Закопане, Польша, 2003 г.), Международной конференции, посвященной 125-летию ТГУ, 75-летию СФТИ и 50-летию РФФ ТГУ (Томск, 2003 г.), 2 Международной конференции по физике кристаллов "Кристаллофизика 21-го века" (Москва, 2001 г.), Международном оптическом конгрессе "Оптика 21 век" (Санкт-Петербург, 2004 г.), Международном конгрессе "Оптика и оптоэлектроника" (Варшава, 2005 г.), XVII Международном симпозиуме "Тонкие пленки в электронике" (Москва, 2005 г.), школах-семинарах молодых ученых "Современные проблемы физики и технологии" (Томск, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи в журналах, входящих в список ВАК, 1 статья в журнале американского общества SPIE, 7 материалов и 6 тезисов докладов международных конференций, 5 статей в сборниках трудов школы молодых ученых. Общее число работ составляет 23 наименования.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, одного приложения и содержит 122 страницы машинописного текста, 63 рисунка, 16 таблиц, список цитируемой литературы из 164 наименований. Общий объем диссертации - 218 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируется цель и направление исследований, отмечена их новизна, научная и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту. Представлен краткий обзор структуры диссертации.

Первая глава носит обзорный характер. В первой части литературного обзора рассматриваются методы выращивания объемного и эпитаксиального материала КРТ, а также дефекты кристаллической структуры, определяющие исходные свойства кристаллов и эпитаксиальных пленок. Проведенный анализ литературных данных показывает, что наиболее перспективным материалом для создания матричных фотоприемных устройств являются эпитаксиальные пленки, выращенные методом МЛЭ. Важной особенностью данного метода выращивания является возможность получения варизонных структур, т.е. материала с заранее заданными профилями состава и легирования, что обеспечивает широкие возможности для создания новых приборных структур. При этом остается открытым вопрос влияния созданных варизонных слоев на результаты измерения электрофизических параметров рабочего эпитаксиального слоя постоянного состава.

Вторая часть литературного обзора посвящена влиянию высокоэнергетических электронов и γ -квантов, а также ионной имплантации на кристаллы КРТ. Анализ электрофизических свойств облученных образцов показывает, что в материал вводятся РД преимущественно донорного типа независимо от исходной дефектности материала, типа и энергии воздействующих частиц. Рассмотрение экспериментальных данных по имплантации различных ионов показывает, что наблюдаемое насыщение электрофизических свойств имплантированного материала, связывается с закреплением уровня Ферми вблизи энергетического уровня вводимых РД, находящегося выше дна зоны проводимости на 0.15 эВ. Рассмотрена модель процессов радиационного дефектообразования в КРТ, основывающаяся на определяющей роли диффузии первичных РД (междоузельных атомов Hg_i и вакансий ртути V_{Hg}) и образовании комплексов вторичных, электрически активных РД. Проведен анализ данной модели, который выявил ряд ее недостатков. Предложены возможные пути их устранения.

Проведенный анализ литературных данных позволил сделать вывод, что, несмотря на большой накопленный экспериментальный материал, нет однозначных моделей радиационного дефектообразования в КРТ. Результаты теоретического моделирования, проведенного на основе модели, учитывающей образование и эволюцию радиационных дефектов в ртутной подрешетке материала, только качественно описывают экспериментальные данные. В связи с этим проведение исследований радиационного дефектообразования в КРТ является актуальной задачей.

Необходимо также отметить, что в литературе отсутствуют данные результатов исследований явлений происходящих в процессе облучения эпитаксиального материала КРТ, выращенного методом МЛЭ, с варизонными слоями.

В выводах к главе дана постановка цели и задач исследования.

Во второй главе описывается подготовка образцов эпитаксиальных пленок и объемных кристаллов КРТ к экспериментам, а также методика измерений электрофизических параметров, исследуемых образцов. Так как в экспериментах использовались образцы эпитаксиальных пленок с варизонными слоями в приповерхностной области и в объеме материала, то был проведен расчет электрофизических параметров подобных структур. Целью данного расчета было выявление степени влияния параметров узкозонного и широкозонного варизонных слоев (УВС, ШВС) на результаты экспериментального определения концентрации и подвижности носителей заряда, характеризующих слой постоянного состава, так как его параметры полностью определяют все рабочие характеристики изготавливаемого фотоприемника. Для упрощения задачи, в рассмотрение были введены следующие величины: $E_{Tn} = \left| \frac{n_{\text{eff}} - n}{n} \right|$ и $E_{T\mu} = \left| \frac{\mu_{\text{eff}} - \mu}{\mu} \right|$, где n и μ –

концентрация и подвижность электронов (дырок) в слое постоянного состава, n_{eff} и μ_{eff} – эффективные значения концентрации и подвижности носителей заряда, характеризующие всю эпитаксиальную пленку. Величины E_{Tn} и $E_{T\mu}$ характеризуют относительное различие между эффективными значениями электрофизических параметров полученных в эксперименте для всей структуры и параметрами слоя постоянного состава эпитаксиальной пленки.

Расчет электрофизических параметров проводился в приближении варизонной концепции, в рамках которой предполагается, что существует локальная связь между химическим составом и свойствами твердого раствора (ширина запрещенной зоны, собственная концентрация носителей заряда и т.д.), которая определяет непрерывное изменение свойств материала с координатой в соответствии с изменением химического состава твердого раствора. Проведенный расчет показал, что наличие варизонных слоев может значительным образом затруднить определение электрофизических параметров эпитаксиальных пленок КРТ методом эффекта Холла, в то же время влияние ШВС и УВС неравнозначно. В случае ШВС главным параметром определяющим влияние варизонного слоя, является его толщина. При $d_B/d \sim 0.1$ (d , d_B – толщина эпитаксиальной пленки и варизонного слоя, соответственно) влиянием ШВС на результаты экспериментального определения электрофизических параметров эпитаксиальной пленки можно пренебречь, так как в этом случае величины E_{Tn} и $E_{T\mu}$ много меньше ошибки эксперимента, которая составляет 15 %. Наличие УВС значительно увеличивает относительное различие концентрации и подвижности носителей заряда, при чем величины E_{Tn} и $E_{T\mu}$ имеют сильную зависимость от параметров варизонной области и концентрации ионизированных донорных и акцепторных центров. В случае материала n-типа проводимости величину относительного различия можно уменьшить созданием условий, при которых проводимости варизонной области и слоя постоянного состава эпитаксиальной пленки равны. Для эпитаксиальной пленки p-типа проводимости уменьшить значения E_{Tn} и $E_{T\mu}$, можно проводя измерения в области магнитных полей >1 Тл.

Проведенный расчет электрофизических параметров эпитаксиальной пленки с варизонными слоями позволил определить условия, при которых влиянием широкозонных варизонных слоев на результаты измерения концентрации и подвижности носителей заряда в эпитаксиальных пленках КРТ, использованных для экспериментов в данной работе, можно пренебречь.

В третьей главе приведены результаты исследований влияния потоков электронов и γ -квантов на эпитаксиальные пленки КРТ, выращенные методом МЛЭ. Для исследований было подготовлено 9 серий эпитаксиальных пленок и объемных кристаллов КРТ обоих типов проводимости. Каждая серия содержала от 15 до 20 образцов. Для экспериментов отбирались образцы, удовлетворяющие следующим условиям:

1. Разброс значений измеренных исходных электрофизических и рекомбинационных параметров, в пределах одной серии образцов, укладывался в интервал допустимых значений, определяемый ошибкой измерения.
2. Полевая зависимость коэффициента Холла не проявляет аномального поведения, связанного с присутствием в материале каких либо структурных неоднородностей.

Подготовленные образцы облучались при температуре 300 К сильноточным пучком электронов ($E = 400$ кэВ, $j = 200$ А·см⁻², $\tau = 50$ нс, $F = 0.3$ Гц, $\Phi = 6 \cdot 10^{14} - 1.8 \cdot 10^{16}$ см⁻², ускоритель типа "ТЕМП", НИИ ЯФ при ТПУ г. Томск), высокоэнергетическими электронами ($E = 1 - 2$ МэВ, $j = 1$ мкА·см⁻², $\tau = 4$ мкс, $F = 0.25$ кГц, $\Phi = 10^{15} - 5 \cdot 10^{15}$ см⁻², ускоритель ЭЛУ-4, НИИ интроскопии при ТПУ г. Томск) и γ -квантами ($E \sim 1.25$ МэВ, $\Phi = 10^5 - 10^7$ Р = $1.7 \cdot (10^5 - 10^7)$ см⁻², источник Co^{60} – УКП-25000, НИИ ПП г. Томск).

Проведенные измерения концентрации и подвижности носителей заряда, температурных и полевых зависимостей коэффициента Холла, времени жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) в исследуемых образцах до и после облучения позволили сделать заключение, что облучение эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом МЛЭ, сильноточным пучком электронов, высокоэнергетическими электронами и γ -квантами в диапазоне использованных энергий частиц и потоков облучения не приводит к образованию электрически активных РД и центров рекомбинации ННЗ в различных концентрациях. Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами облучения высокоэнергетическими электронами и γ -квантами объемных кристаллов КРТ позволило сделать вывод, что скорости введения носителей заряда в эпитаксиальные пленки МЛЭ КРТ не превышает значений известных из литературных данных для объемного материала.

В четвертой главе рассмотрена модель радиационного дефектообразования в КРТ при ионной имплантации, основывающаяся на определяющей роли диффузии первичных РД в металлической подрешетки HgTe (междоузельных атомов Hg_i и вакансий ртути V_{Hg}) и образовании комплексов вторичных, электрически активных РД. В рамках этой модели можно выделить следующие основные факторы, которые главным образом определяют результирующее распределение электрически активных РД: 1) генерация в области максимального энергосвечения

имплантируемых ионов первичных РД – междоузельных атомов (Hg_i) и вакансий ртути (V_{Hg}); 2) диффузия первичных дефектов Hg_i и V_{Hg} ; 3) рекомбинация Hg_i и V_{Hg} между собой; 4) рекомбинация первичных РД на стоках, т.е. их захват нарушениями кристаллической структуры (нейтральными вакансионными кластерами (V_{Hg})^x дислокационными петлями, линейными дислокациями и др.); 5) образование электрически активных комплексов РД на основе вакансий и междоузельных атомов. Таким образом, для описания процесса формирования распределения РД по глубине необходимо решить систему четырех дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial C_i(z,t)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i(z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\tau_{эфф_i}} C_i(z,t) + G \quad (1) \quad \frac{\partial C_v(z,t)}{\partial t} = D_v \frac{\partial^2 C_v(z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\tau_{эфф_v}} C_v(z,t) + G \quad (3)$$

$$\frac{dCk_i(z,t)}{dt} = \alpha_i C_i(z,t) \quad (2) \quad \frac{dCk_v(z,t)}{dt} = \alpha_v C_v(z,t) \quad (4)$$

где $C_i(C_v)$, $D_i(D_v)$, $\tau_{эфф_i}(\tau_{эфф_v})$, G - концентрация, коэффициент диффузии, эффективное время жизни, функция генерация первичных РД – междоузельных атомов и вакансий ртути, соответственно. $Ck_i(Ck_v)$ - концентрация вторичных РД (комплексов на основе междоузельных атомов и вакансий ртути), $\alpha_i(\alpha_v)$ – коэффициент характеризующий процесс вторичного дефектообразования (комплексобразования). Эффективное время жизни первичных РД можно записать следующим образом:

$$\tau_{эфф}^{-1} = \tau_{ст}^{-1} + \tau_{рек}^{-1} + \tau_{комп}^{-1},$$

где $\tau_{ст}$, $\tau_{рек}$, $\tau_{комп}$ – времена жизни обуславливаемые рекомбинацией на стоках РД в области среднего проекционного пробега ионов, рекомбинацией междоузельных атомов и вакансий ртути между собой, образованием комплексов радиационных дефектов. Время жизни $\tau_{комп}$ определяет скорость процесса вторичного дефектообразования - ($\tau_{комп} = \alpha^{-1}$).

Для нахождения распределения объемной концентрации электронов $n(z)$ по глубине облученной эпитаксиальной пленки, которая измеряется в эксперименте, совместно с системой уравнений (1)-(4) решалось уравнение электронейтральности. Расчет проводился в двухзонном приближении с учетом дефектной структуры материала, учитывающей не только энергетические уровни вводимых радиационных дефектов, но и уровни дефектов исходного материала.

Анализ физических процессов приводящих к формированию правого фронта (удаленного от поверхности) распределения $n(z)$ после имплантации ионов Ag^+ [1] показал, что его положение полностью определяется миграцией междоузельных атомов Hg . Учитывая также, что локализация правого фронта профиля распределения происходит намного глубже среднего проецированного пробега (R_p) имплантируемых ионов были сделаны следующие предположения:

1. В рассматриваемой области материала рекомбинация первичных радиационных дефектов происходит только за счет процесса вторичного дефектообразования.
2. После завершения процессов радиационного дефектообразования в области локализации правого фронта профиля распределения электрически активных дефектов наблюдается стационарное распределение концентрации Hg_i .

Принимая во внимания сделанные предположение показано, что определение тангенса угла наклона зависимости натурального логарифма профиля пространственного распределения электрически активных РД в области, заглубленной по сравнению с районом генерации первичных РД и наибольшего разупорядочивания кристаллической решетки материала, позволяет провести расчет коэффициента α_i , характеризующего процесс вторичного комплексообразования электрически активных РД донорного типа.

Проведенный анализ описанной в литературе феноменологической модели [2], которая объясняет эффект насыщения электрофизических параметров закреплением уровня Ферми вблизи уровня РД, позволил предположить, что в этом случае процессы образования и распада комплексов РД идут с одинаковой скоростью и можно положить, что процесс комплексообразования прекращается. В этом случае для описания процесса насыщения в рамках модели (4.1)-(4.4) необходимо учесть зависимость коэффициента комплексообразования α ($\alpha=1/\tau_{\text{компл}}$) от текущей концентрации электрически активных РД и концентрации, которая наблюдается в условиях насыщения. Формально положим, что существует предельная концентрация центров комплексообразования $C_{k_{\text{max}}}$, величина которой численно соответствует концентрации электрически активных комплексов РД в области доз облучения, при которых наблюдается насыщение концентрации электронов. Тогда сделанное предположение позволяет описать процесс насыщения в рамках выше изложенной модели радиационного дефектообразования (4.1)-(4.4), путем учета зависимости коэффициента образования комплексов вторичных РД α ($\alpha=1/\tau_{\text{компл}}$) следующим образом: $\alpha(x, t) = \alpha_0 \left(1 - \frac{C_k(x, t)}{C_{k_{\text{max}}(x)}} \right)$, где C_k – текущая концентрация электрически

активных комплексов, $C_{k_{\text{max}}}$ – предельная концентрация центров комплексообразования, определяющая максимальную концентрацию электрически активных комплексов. Подобный формальный подход позволяет описать процесс насыщения концентрации электрически активных комплексов РД, не рассматривая при этом взаимобратные процессы их образования и распада.

В рамках развитой модели был проведен расчет процессов радиационного дефектообразования в КРТ при облучении ионами Ag^+ . Показано, что наблюдается не только качественное соответствие результатов теоретического расчета с экспериментальными данными, но и количественное (Рис. 2). Полученный результат показывает применимость рассматриваемой модели радиационного дефектообразования для описания процессов при ионной имплантации в КРТ.

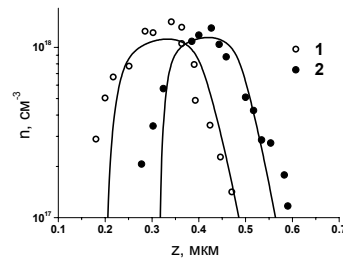


Рис. 2. Профили пространственного распределения концентрации электронов n по глубине z после облучения образцов КРТ ионами Ag^+ с энергией 150 кэВ [1]. Доза облучения (Φ , см^{-2}): 1– 10^{14} , 2– 10^{15} . Непрерывные кривые – расчетные профили пространственного распределения $n(z)$.

Анализ процессов радиационного дефектообразования при ионной имплантации эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом МЛЭ, приведен в пятой главе. В первом разделе данной главы представлены экспериментальные результаты исследований электрофизических свойств эпитаксиальных пленок МЛЭ КРТ, имплантированных ионами Ag^+ и N_2^+ при комнатной температуре. Параметры облучения: энергия ионов $E = 150 \text{ кэВ}$, плотность тока ионов $j = 0.01\text{-}0.1 \text{ мкА см}^{-2}$, доза облучения $\Phi = 10^{12}\text{-}10^{15} \text{ см}^{-2}$. В эксперименте использовались образцы эпитаксиальных пленок КРТ n- и p-типа проводимости ($n = (3 - 4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\mu_n = (1 - 2) \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; $p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\mu_p = 500 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$).

Обнаружено что, наблюдается хорошее качественное совпадение результатов ионной имплантации в МЛЭ КРТ и в объемный материал КРТ, причем динамика изменения электрофизических свойств облученных образцов, обусловленная накоплением и эволюцией электрически активных РД, имеет ряд общих черт:

- Возрастающий характер зависимости слоевой концентрации $N_s(\Phi)$, при малых дозах облучения (Φ). Увеличение дозы облучения приводит к насыщению зависимости $N_s(\Phi)$.
- В области доз облучения, при которых происходит возрастание зависимости $N_s(\Phi)$ наблюдается увеличение объемной концентрации электронов в максимуме их распределения по глубине облученного материала. Профиль распределения объемной концентрации электронов $n(z)$ локализован в области среднего проецированного пробега имплантированных ионов для малых доз облучения.
- В области доз облучения, при которых происходит насыщение зависимости $N_s(\Phi)$, имеет место сдвиг профиля распределения объемной концентрации электронов $n(z)$ вглубь полупроводника, при этом значение концентрации электронов в максимуме распределения $n(z)$ не изменяется.

В то же время, обнаружено отличие, которое заключается в различной по величине объемной концентрации электронов в максимуме профиля распределения $n(z)$, которая в наших экспериментах с эпитаксиальным материалом не превышала 10^{18} см^{-3} , а при измерениях профилей распределения электронов по глубине имплантированных образцов КРТ, выращенных объемными методами, она была выше 10^{18} см^{-3} .

Анализ полученных результатов позволил предположить, что наблюдаемые отличия результатов ионной имплантации в эпитаксиальные пленки МЛЭ КРТ и объемный материал КРТ обусловлены влиянием варизонного приповерхностного слоя, а основными механизмы этого влияния определяются следующими факторами:

1. Процессы генерации первичных РД и образования комплексов вторичных электрически активных дефектов происходят в приповерхностной области переменного состава.
2. Миграция первичных РД происходит в поле сил, возникновение которых обусловлено градиентами ширины запрещенной зоны и коэффициента диффузии междоузельных атомов и вакансий ртути, возникающих вследствие изменения состава у поверхности материала.

Для верификации выдвинутого предположения и выяснения степени влияния вышеуказанных факторов на процессы радиационного дефектообразования в эпитаксиальных пленках с переменным составом, необходимо было провести исследование влияния параметров варизонного слоя (состав материала в области образования радиационных дефектов, градиент состава) на результаты ионной имплантации.

Для проведения подобных исследований в ИФП СО РАН специально были выращены эпитаксиальные пленки с различным распределением состава в приповерхностной области материала. Для экспериментов были подготовлены четыре серии образцов р-типа проводимости по 8-10 штук в каждой ($p = (3-8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\mu_p = (5.0-5.5) \cdot 10^2 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$). Анализ распределения состава в приповерхностном слое эпитаксиальных пленок (Рис. 3) показывает, что для образцов серии 1 варизонный слой отсутствует, а для образцов серии 2, 3, 4 толщина варизонного слоя составляет 1.6 - 1.8 мкм. Состав материала изменяется от $x = 0.22$ до $x_{\text{max}} = 0.36, 0.54$ и 0.64 , а максимальный градиент состава составляет $0.4 \cdot 10^4, 0.2 \cdot 10^4, 0.15 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$, соответственно.

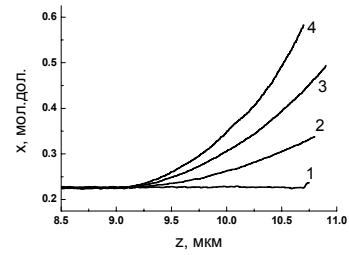


Рис. 3. Распределения состава x по глубине z эпитаксиальных пленок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в приповерхностной области материала. Номер кривой соответствует номеру серии образца.

Облучение ионами бора проводилось при комнатной температуре на ускорителе ионов в непрерывном режиме в диапазоне доз $10^{11} - 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и энергий 20 – 150 кэВ, плотность тока ионов $j = 0.001 - 0.2 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$. Выбор в качестве имплантанта ионов бора обуславливался тем фактом, что в настоящее время он является основным технологическим имплантантом при создании матриц фотодиодов на основе р-п переходов из материала р-типа проводимости.

Измерение электрофизических параметров образцов после имплантации показало, что для образцов серии 1, 2 и 3, 4 наблюдается конверсия типа проводимости, которая происходит после дозы облучения $\Phi = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и 10^{12} см^{-2} соответственно. Скорость “введения” носителей заряда для слоевой концентрации $dN_s/d\Phi$ составляет 16.8, 5.8, 0.27, 0.14 для образцов серии 1, 2, 3, 4 соответственно. Однако при одной и той же дозе облучения значение N_s отличается для каждого из образцов и зависит от типа эпитаксиальной структуры. Для образцов серии 1 при достижении дозы облучения $\Phi_{\text{нас}} = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ слоевая концентрация достигает максимума $N_{s\text{max}} = (0.9 - 1) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, т.е. происходит насыщение зависимости $N_s(\Phi)$. Причем величина дозы насыщения $\Phi_{\text{нас}}$ и значение $N_{s\text{max}}$ в области насыщения соответствуют значениям, полученным при имплантации ионов бора в объемный материал КРТ. В тоже время для образцов серии 2 - 4 эффекта насыщения дозовой зависимости $N_s(\Phi)$ не наблюдается. В области доз облучения от 10^{14} до $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ скорость “введения” носителей заряда $dN_s/d\Phi$ для образцов серии 2 - 4 составляет 0.006, 0.004, 0.002, соответственно. Подобного поведения зависимости $N_s(\Phi)$ ранее

не отмечалось.

Анализ полученных результатов, позволил сделать вывод, что одной из причин наблюдаемого поведения дозовых зависимостей интегральных электрофизических параметров облученных образцов, является различие в динамике накопления электрически активных РД. Показано, что скорость введения электрически активных РД $dN_s/d\Phi$ в области доз облучения $\Phi < 10^{14} \text{ см}^{-2}$ экспоненциально убывает с увеличением состава x материала в области R_p ионов B^+ .

Полученное экспериментальное подтверждение зависимости динамики накопления электрически активных РД от состава КРТ в области внедрения имплантируемых ионов, позволяет сделать вывод о корректности предположения, что основными дефектами, определяющими свойства материала после облучения, являются комплексы на основе дефектов металлической подрешетки $HgTe$, а не дефекты в халькогенной подрешетке. Действительно, если бы основным дефектом, проявляющим донорные свойства, были комплексы на основе дефектов теллура, то изменение состава материала, не оказывало бы существенного влияния на динамику накопления электрически активных РД. В то же время, как показывают экспериментальные данные, увеличение состава материала (x) в области внедрения имплантанта, а значит и уменьшение концентрации атомов ртути, приводит к значительному изменению динамики накопления РД, вследствие уменьшения скорости генерации первичных РД на основе Hg .

Исследование кинетики пространственного изменения зависимости $n(z)$ от дозы облучения показало, что для образцов серии 1 наблюдается картина, которая широко описана в литературе по имплантации B^+ и других ионов в объемный материал КРТ постоянного состава. При дозе облучения 10^{12} см^{-2} максимально высокая концентрация электронов наблюдается в области среднего проецированного пробега R_p ионов бора. Увеличение дозы облучения до $\Phi_{\text{нас}} = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ приводит к возрастанию значения в максимуме профиля $n(x)$ вплоть до величины $n_{\text{нас}} = (2 - 3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Дальнейшее увеличение дозы облучения приводит к сдвигу профиля распределения электрически активных РД вглубь образца, при этом значение в максимуме зависимости $n(z)$ практически не изменяется, т.е. происходит насыщение концентрации электронов. В случае же образцов эпитаксиальных пленок с поверхностным варизонным слоем серий 2 - 4, кинетика пространственного изменения распределения объемной концентрации электронов имеет существенное отличие (Рис. 4). Значение в максимуме зависимости $n(z)$ непрерывно изменяется с увеличением дозы облучения, эффекта насыщения концентрации электронов не наблюдается. При этом для доз облучения $\geq 10^{14} \text{ см}^{-2}$ происходит сдвиг профиля распределения электрически активных РД

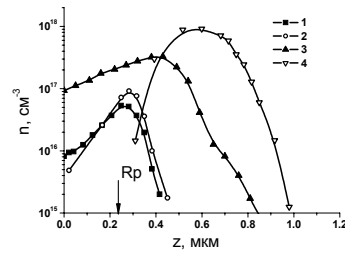


Рис. 4. Профили пространственного распределения концентрации электронов n по глубине z после облучения образцов эпитаксиальных структур КРТ серии 4 ионами бора ($E=100 \text{ кэВ}$), доза облучения ($\Phi, \text{ см}^{-2}$): 1) 10^{12} , 2) 10^{13} , 3) 10^{14} , 4) 10^{15} .

вглубь образца, хотя концентрация электронов в максимуме профиля еще не достигла величины $n_{\text{нас}}$.

Исследование поведения зависимости $n(z)$ для образцов эпитаксиальных пленок, облученных ионами B^+ дозой 10^{14} см^{-2} в диапазоне энергий 20 – 150 кэВ, показало:

1. Для образцов серии 1, с увеличением энергии имплантанта наблюдается сдвиг максимума профиля распределения вглубь образца и его уширение. Причем концентрация электронов в максимуме распределения составляет $n_{\text{нас}} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и не зависит от энергии ионов бора.

2. Для образцов серий 2 – 4 наряду со сдвигом и уширением профиля электрически активных РД происходит увеличение значения объемной концентрации электронов в максимуме распределения при возрастании энергии ионов, причем значения $n_{\text{нас}}$ она так и не достигает.

Измерение распределения подвижности электронов μ_n по глубине облученного материала для различных доз облучения и энергий имплантанта показало, что наибольшее различие в значениях подвижности для разных эпитаксиальных структур наблюдается в приповерхностной области материала при дозах облучения 10^{12} и 10^{13} см^{-2} . При увеличении дозы облучения и энергии имплантируемых ионов подвижность носителей заряда отличается только в области внедрения ионов, а в районе локализации профиля $n(z)$ величина μ_n практически одинакова для образцов всех серий.

Анализ профилей распределения $n(z)$, $\mu_n(z)$ в области доз облучения $\Phi > 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и сопоставление их с поведением зависимостей $N_S(\Phi)$, $\mu_{\text{пэфф}}(\Phi)$ позволило сделать заключение, что прослеживается явная зависимость электрофизических свойств облученного материала от состава эпитаксиальной пленки в области локализации профиля $n(z)$.

Сравнение профилей распределения объемной концентрации электронов образцов эпитаксиальных пленок различных серий облученных одной дозой показывает (Рис. 5), что величины концентраций электронов в максимуме профиля распределения $n(z)$ для всех пленок различаются, причем значение концентрации тем меньше, чем больше состав эпитаксиальной пленки в области локализации профиля $n(z)$. Однако следует отметить, что максимум распределения $n(z)$ лежит на одной глубине, а правый фронт профиля распределения $n(z)$ для образцов эпитаксиальных пленок различных серий имеет один и тот же наклон. Полученный результат позволил сделать предположение о том, что градиент состава материала, не оказывает определяющего влияния на процесс миграции первичных РД и окончательное пространственное распределение электрически активных РД.

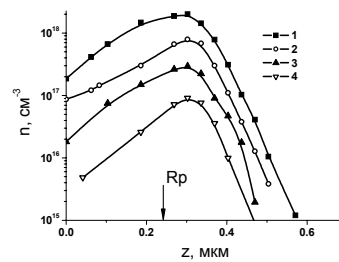


Рис. 5. Профили пространственного распределения концентрации электронов n по глубине z после облучения образцов эпитаксиальных структур КРТ ионами бора ($E=100$ кэВ, доза облучения $\Phi=10^{13} \text{ см}^{-2}$). Номер кривой соответствует номеру серии образца (Рис. 3).

Проведенный анализ литературных данных показывает, что наблюдаемое при имплантации различными ионами явление насыщения электрофизических параметров, обусловлено закреплением уровня Ферми в предельном состоянии F_{lim} , энергетическое положение которого с точностью до kT совпадает с уровнем вводимых радиационных дефектов E_R , энергетическое положение которого оценивается ~ 0.15 эВ выше дна зоны проводимости [1, 2]. Авторы [3] показали, что стационарное положение уровня Ферми F_{lim} в облученном полупроводнике совпадает с уровнем локальной электронейтральности кристалла $E_{|n|}$, энергетическое положение которого может быть рассчитано теоретически. Сопоставление этих двух результатов позволяет сделать предположение, что энергетическое положение уровня радиационных дефектов E_R совпадает с положением уровня локальной электронейтральности кристаллической решетки материала $E_{|n|}$ относительно дна зоны проводимости E_C . В рамках данного предположения был проведен расчет энергетического положения стационарного уровня Ферми F_{lim} и соответствующей ему предельной концентрации электронов n_{lim} в зависимости от состава КРТ. При расчете принималось во внимание результаты работы [3]:

1. Энергетическое положение уровня локальной электронейтральности материала $E_{|n|}$ имеет линейную зависимость от состава КРТ.
2. Для состава $x = 0.5$ энергетическое положение уровня $E_{|n|}$ совпадает с краем дна зоны проводимости ($E_{|n|} = E_C$).
3. Для состава $x = 0.2$ уровень $E_{|n|}$ находится на 0.15 эВ выше дна зоны проводимости E_C , т.е. совпадает с энергетическим положением уровня E_R вводимых РД, определенным из экспериментальных данных.

Результаты расчета предельной концентрации электронов n_{lim} представлены на рисунке 6. На этом же рисунке приведены экспериментальные значения максимальной концентрации электронов в области локализации профиля $n(z)$ в зависимости от состава эпитаксиальной пленки. Как видно, расчетная кривая удовлетворительно описывает экспериментальные результаты.

При теоретическом моделировании процессов радиационного дефектообразования в эпитаксиальных пленках КРТ с переменным составом в области внедрения имплантанта использовались результаты, полученные в главе 4 и данные работы [3]. При расчете учитывалось влияние на окончательное пространственное распределение электрически активных РД следующих факторов: а) величины функции генерации первичных РД; б) энергетического положения уровня вводимых РД относительно дна зоны проводимости; в) встроенного электрического поля, образующегося вследствие наличия градиента ширины запрещенной зоны в области, где мигрируют первичные РД. Проведенный расчет позволил сделать следующие выводы:

1. Скорость генерации первичных РД определяет локализацию правого фронта профиля распределения $n(z)$.
2. Величина объемной концентрации электронов на заданной глубине z не превышает значения $n_{lim}(z)$.

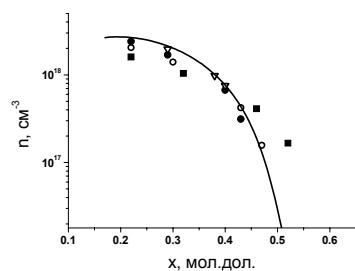


Рис. 6. Расчетная зависимость предельной концентрации электронов n_{lim} от состава материала x (Сплошная линия). Экспериментальные точки – объемная концентрация электронов в максимуме $n(z)$ для различных составов материала в области локализации профиля распределения.

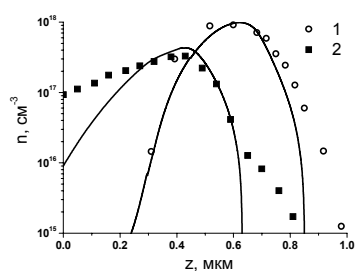


Рис. 7. Профили пространственного распределения концентрации электронов n по глубине z после облучения образцов эпитаксиальных пленок КРТ серии 4 ионами B^+ с энергией 100 кэВ. Доза облучения (Φ , cm^{-2}): 1– 10^{14} , 2– 10^{15} . Непрерывные кривые расчетные профили пространственного распределения $n(z)$.

3. Влиянием встроенного электрического поля на миграцию первичных РД можно пренебречь при значениях градиента состава материала $\leq 0.4 \cdot 10^4 cm^{-1}$.

Проведенное моделирование процесса радиационного дефектообразования в варизонных эпитаксиальных пленках КРТ и сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами позволяет сделать вывод, что окончательный вид формы профиля пространственного распределения объемной концентрации электронов, его локализация, а также значение концентрации электронов в его максимуме, главным образом определяются скоростью генерации первичных РД и составом КРТ в области локализации профиля РД. Кроме того, экспериментальные данные и результаты теоретического моделирования показывают, что дополнительные факторы, связанные с наличием градиента состава в области внедрения имплантанта не оказывают определяющего влияния на результирующее распределение электрически активных РД. Корректность сделанных выводов подтверждается тем фактом, что результаты теоретического моделирования удовлетворительно описывают наблюдаемые экспериментальные результаты (Рис. 7).

В заключении диссертации сформулированы основные результаты, полученные в ходе проведенных исследований:

1. Проведено экспериментальное измерение электрофизических параметров эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом МЛЭ, после облучения высокоэнергетическими электронами ($E = 1 - 2$ МэВ, $\Phi = 10^{15} - 5 \cdot 10^{15} cm^{-2}$), γ -квантами ($E \sim 1.25$ МэВ, $\Phi = 1.7 \cdot (10^{12} - 10^{16}) cm^{-2}$), сильнооточным пучком электронов ($E = 400$ кэВ, $j = 200 A \cdot cm^{-2}$, $\tau = 50$ нс, $\Phi = 6 \cdot 10^{14} - 1.8 \cdot 10^{16} cm^{-2}$). Установлено, что облучение эпитаксиальных пленок МЛЭ КРТ при температуре 300 К высокоэнергетическими электронами и γ -квантами, сильнооточным пучком электронов в пределах применяемых потоков облучения не приводит к образованию электрически активных дефектов и центров рекомбинации неосновных носителей заряда в различных концентрациях.

2. Проведено экспериментальное измерение профилей пространственного распределения электрически активных РД после облучения эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом МЛЭ, ионами Ar^+ , N_2^+ и B^+ ($E = 100$ кэВ и 150 кэВ, соответственно) в диапазоне доз облучения $\Phi = 10^{12} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$, ионами B^+ в диапазоне энергий имплантанта $E = 20 - 150$ кэВ. Показано, что механизмы образования электрически активных РД и процесс их эволюции протекают сходным образом, как в эпитаксиальных пленках, так и в объемном материале КРТ. Установлено, что дополнительные факторы, связанные с наличием градиента ширины запрещенной зоны и коэффициента диффузии первичных радиационных дефектов в области внедрения имплантанта не оказывают определяющего влияния на результирующее распределение электрически активных РД.
3. Проведено экспериментальное изучение дозовых и энергетических зависимостей интегральных электрофизических параметров эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом МЛЭ, после облучения ионами бора в диапазоне энергий $E = 20 - 150$ кэВ, и доз облучения $\Phi = 10^{11} - 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Установлено, что скорость введения электрически активных РД $dN_s/d\Phi$ в области доз облучения $\Phi < \Phi_{\text{нас}} = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ экспоненциально убывает с увеличением состава x эпитаксиальной пленки КРТ в области среднего проецированного пробега R_p ионов бора. В диапазоне доз облучения $\Phi \geq \Phi_{\text{нас}}$ величина концентрации и подвижности электронов в этом слое определяются составом эпитаксиальной пленки в области локализации профиля $n(z)$. Наблюдаемые отличия результатов ионной имплантации в эпитаксиальные пленки МЛЭ КРТ с переменным составом в области внедрения имплантанта и объемный материал КРТ, главным образом, обусловлены различной динамикой накопления электрически активных РД и зависимостью электрофизических свойств материала от состава КРТ.
4. Предложен метод определения параметра модели радиационного дефектообразования, характеризующего скорость накопления электрически активных РД донорного типа, на основе анализа экспериментальных данных пространственного распределения электрически активных РД в области материала, заглубленной по сравнению с районом генерации первичных РД и наибольшего разупорядочивания кристаллической решетки материала. Показано, что результаты теоретического моделирования процессов радиационного дефектообразования при ионной имплантации КРТ постоянного состава и эпитаксиальных пленок с переменным составом в области внедрения имплантанта удовлетворительно описывают наблюдаемые экспериментальные данные.
5. Получено дополнительное экспериментальное подтверждение предположения того, что основными РД определяющими свойствами облученного КРТ, являются дефекты в металлической подрешетке HgTe .

В приложении к диссертации приведено описание автоматизированного комплекса, использованного для измерения электрофизических параметров исследуемых эпитаксиальных структур, их температурных и полевых зависимостей.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам ИФП СО РАН В.В. Варавину, С.А. Дворецкому, Н.Н. Михайлову, Ю.Г. Сидорову за предоставленные полупроводниковые образцы МЛЭ КРТ, Н.Х. Талипову за помощь в проведении исследований по имплантации ионов бора, Е.П. Лиленко и М.Ф. Филатову за помощь в проведении измерений, научному руководителю и сотрудникам кафедры квантовой электроники и фотоники А.Г. Коротаеву, А.П. Коханенко за ценные замечания при обсуждении результатов, изложенных в диссертации, а также сотрудникам кафедры космической физики и экологии ТГУ А.В. Соловьеву и С.В. Побаченко за полезные дискуссии и внимание, способствовавшие выполнению диссертационной работы.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Коротаев А.Г., Григорьев Д.В., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Сидоров Ю.Г., Талипов Н.Х. Распределение профилей радиационных дефектов при ионной имплантации варизонных структур КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Прикладная физика. - 2003. - № 5. - С. 93 - 95.
2. Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Коротаев А.Г., Григорьев Д.В., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Сидоров Ю.Г., Михайлов Н.Н. Облучение высокоэнергетическими электронами и гамма-квантами эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Прикладная физика. - 2003. - № 5. - С. 99 - 101.
3. Voitsekhovskii A.V., Kokhanenko A.P., Korotaev A.G., Grigor'ev D.V., Varavin V.S., Dvoretzky S.A., Sidorov Y.G., Mikhailov N.N. Radiation effects in photoconductive MCT MBE heterostructures // Proc. SPIE. - 2003. - V.5136 - P. 411 - 415.
4. Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Коротаев А.Г., Коханенко А.П. Особенности определения электрофизических параметров варизонных структур КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Изв. вузов. Физика. - 2004. - № 7. - С. 70 - 71.
5. Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Коротаев А.Г., Коханенко А.П., Леонтьев Д.В., Кульчицкий Н.А. Профили распределения дефектов в эпитаксиальных пленках $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, при ионной имплантации аргона и азота // Изв. вузов. Материалы электронной техники. - 2004. - № 2. - С. 60 - 65.
6. Korotaev A.G., Grigor'ev D.V., Kohanenko A.P., Voitsekhovskii A.V., Datsko D.I., Volkov D.I., Remnev G.E., Opekunov M.S. Modification of CMT epitaxial films by nanosecond electron beams irradiation // Proceedings of 1st International congress on radiation physics, high current electronics, and modification of materials. - Tomsk, 2000. - V.I. - P. 139 - 141.
7. Voitsekhovskii A.V., Kohanenko A.P., Grigor'ev D.V., Shulga S.A. Influence of powerful charged particle beams on CMT semiconductors // Proceedings of 1st

- International congress on radiation physics, high current electronics, and modification of materials. - Tomsk, 2000. – V.I. – P. 324 – 326.
8. Войцеховский А.В., Коротаев А.Г., Коханенко А.П., Григорьев Д.В., Леонтьев Д.В. Распределение профилей электрически активных радиационных дефектов в КРТ при ионной имплантации // Материалы 8-ой Международной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах». - Кемерово: Кузбассвуиздат, 2001. - С. 34.
 9. Войцеховский А.В., Коротаев А.Г., Коханенко А.П., Григорьев Д.В., Филатов М.Ф. Особенности радиационного дефектообразования в эпитаксиальных пленках КРТ, выращенных методом МЛЭ // Материалы 8-ой Международной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах». - Кемерово: Кузбассвуиздат, 2001. - С. 109.
 10. Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Коротаев А.Г., Григорьев Д.В., Леонтьев Д.В. Имплантация ионов аргона и молекулярного азота в эпитаксиальные пленки КРТ, выращенные методом МЛЭ // Материалы международной конференции, посвященной 125-летию ТГУ, 75-летию СФТИ и 50-летию РФФ ТГУ. - Томск, 2003. - С. 201 - 203.
 11. Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Коротаев А.Г., Григорьев Д.В. Особенности формирования профиля распределения электрически активных радиационных дефектов при ионной имплантации эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Материалы 9-ой Международной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах». - Кемерово: «Кузбассвуиздат», 2004. - С. 380 - 383.
 12. Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Коротаев А.Г., Коханенко А.П., Талипов Н.Х. Имплантация ионов бора в варизонные эпитаксиальные пленки МЛЭ КРТ // Материалы XVII Международного симпозиума «Тонкие пленки в электронике». - Москва: Изд-во ОАО ЦНИТИ «Техномаш», 2005. – С. 171 - 179.
 13. Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Коротаев А.Г., Григорьев Д.В., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Сидоров Ю.Г., Михайлов Н.Н. Облучение высокоэнергетическими электронами и гамма-квантами эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом МЛЭ // Тезисы докладов 17-ой международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. - Москва, 2002. - С. 156.
 14. Voitsekhovskii A.V., Kokhanenko A.P., Korotaev A.G., Grigor'ev D.V., Varavin V.S., Dvoretzky S.A., Sidorov Ju.G. , Mikhailov N.N. Radiation effects in photoconductive MCT MBE heterostructures // Abstracts of International conference on solid state crystals – Materials Science and Applications. Zakopane, Poland, 2003. - P. 124.
 15. Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Коротаев А.Г., Григорьев Д.В., Леонтьев Д.В., Кульчицкий Н.А. Профили распределения дефектов в МЛЭ КРТ при ионной имплантации аргона и азота // Тезисы докладов Второй международной конференции по физике кристаллов «Кристаллофизика 21-го века». – Москва, 2003. - С. 270 - 272.

16. Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Коротаев А.Г., Коханенко А.П., Талипов Н.Х. Процессы радиационного дефектообразования в варизонных структурах КРТ МЛЭ при ионной имплантации // Тезисы докладов 18 Международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. - Москва, 2004. - С. 174 - 175.
17. Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Коханенко А.П., Усманов С.П. Автоматизированные лабораторные установки по измерению свойств фоточувствительных материалов // Тезисы докладов международного оптического конгресса «Оптика 21 век». - Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2004. - С. 112 - 113.
18. Voitsekhovskii A.V., Kokhanenko A.P., Korotaev A.G., Grigor'ev D.V., Sidorov Y.G., Varavin V.S., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Talipov N.Kh. The boron implantation in the graded-band MBE HgCdTe epilayer // Technical Abstract of the International Congress on «Optics and Optoelectronics». - Warsaw, Poland: Proc. SPIE, 2005. - P. 154.
19. Григорьев Д.В. Радиационная модификация параметров эпитаксиального материала КРТ // Сборник статей молодых ученых «Современные проблемы физики и технологии». - Томск, 2001. - С. 77 - 79.
20. Григорьев Д.В., Леонтьев Д.В. Профили распределения дефектов в КРТ при ионной имплантации // Сборник статей молодых ученых «Современные проблемы физики и технологии». – Томск, 2002. - С. 56 - 58.
21. Григорьев Д.В., Леонтьев Д.В. Профили распределения дефектов в КРТ при имплантации ионов аргона и молекулярного азота // Сборник статей молодых ученых «Современные проблемы физики и технологии». – Томск, 2003. - С. 71 - 74.
22. Григорьев Д.В., Леонтьев Д.В. Электрофизические и фотоэлектрические параметры эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных методом МЛЭ, после высокоэнергетического воздействия электронов и гамма-квантов // Сборник статей молодых ученых «Современные проблемы физики и технологии». – Томск, 2003. - С. 58 - 60.
23. Григорьев Д.В. Особенности имплантации ионов аргона и молекулярного азота в эпитаксиальные пленки КРТ, выращенные методом МЛЭ // Сборник статей молодых ученых «Современные проблемы физики и технологии». – Томск, 2004. - С. 81 - 83.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Войцеховский А.В., Коханенко А.П. Профили распределения дефектов в КРТ при внедрении ионов // Изв. вузов. Физика. - 1998.– №1. - С. 101-116.
2. Vodopyanov L.K., Kozyrev S.P. Infrared reflection spectroscopy of ion-implanted n-HgCdTe // Phys. Stat. Sol. - 1982 - V. 72, № 2. - P. 734 - 744.
3. Брудный В.Н., Гриняев С.Н. Закрепление химического потенциала и электрические свойства облученных сплавов $Cd_xHg_{1-x}Te$ // ФТП. – 2001. – Т. 35, В. 7. – С. 819 – 822.

Подписано к печати 03.11.2005.
Формат 60х84/16. Бумага офсетная.
Печать RISO. Усл. Печ. л. 1.16. Уч.-изд.л. 1.05.
Тираж 100 экз. Заказ № 5. Цена свободная.
ИП Тюлькова В.А.
ИНН 701800207608
634045. г. Томск, ул. Ф. Лыткина, 28г.