

ИНСТИТУТ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
АН АРМЯНСКОЙ ССР

На правах рукописи

НИКОГОСЯН СЕРГЕЙ КОЛЯЕВИЧ

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ТЕПЛО-
И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ А^{III} В^V

01.04.10 - Физика полупроводников и диэлектриков

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

АШТАРАК-1990

Работа выполнена в лаборатории радиационной физики
твёрдого тела Ереванского физического института

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
В. А. СААКЯН

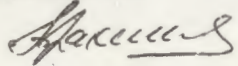
Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор В. Н. МОРДКОВИЧ
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Ю. А. АБРАМЯН

Ведущая организация: Институт ядерных исследований
АН УССР (г. Киев)

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 1990 г.
в ____ часов на заседании Специализированного совета
К.005.13.01 в ИРФЭ АН АрмССР (378410, Аштарак-2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ИРФЭ АН АрмССР.

Автореферат разослан " ____ " _____ 1990 г.

Ученый секретарь Специализированного
совета, кандидат физико-математических
наук  В. С. АРАКЕЛЯН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Полупроводниковые кристаллы InAs , GaP и InP являются известными материалами для изготовления разных приборов и устройств в электронике. На кристаллах InAs , InP и на их твердых растворах $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ создаются инжекционные лазеры, которые работают в достаточно широкой области длин волн, а также обладающие высокими рабочими характеристиками полевые транзисторы и другие СВЧ приборы. Проявляется большой интерес к InP , как к материалу для создания больших и сверхбыстродействующих интегральных схем, и в этом направлении сейчас ведутся интенсивные исследования. В последние годы на основе кристаллов InP начали изготовление солнечных элементов, которые оказались более радиационно-стойкими по сравнению с такими элементами на основе Si и GaAs . Кристаллы GaP , легированные примесными атомами серы, цинка, азота и кислорода, используются при изготовлении светодиодов. Все вышеупомянутые приборы и устройства очень чувствительны к присутствию в них малейшего количества структурных дефектов. Развитие космической техники и ядерной энергетики привели к тому, что многие полупроводниковые приборы эксплуатируются в условиях разного рода радиации. Облучение материалов высокоэнергетичными частицами (электронами, нейтронами, протонами) создает в них радиационные дефекты (РД), которые меняют многие физические свойства этих материалов. Путем исследования (после облучения) таких параметров, как, например, коэффициенты теплопроводности (α), термоэдс (α), электропроводности (σ), эффекта Холла (R), можно сделать заключение о характере, количестве, зарядовом состоянии образующихся РД в этих материалах.

Первые эксперименты по облучению кристаллов InAs проводились в пятидесятых годах. Именно тогда выяснилось, что при облучении $n\text{-InAs}$ высокоэнергетичными электронами (а также и другими частицами) наблюдается увеличение концентрации свободных электронов. Аналогичное явление имеет место и после высокотемпературной обработки кристаллов $n\text{-InAs}$. Однако однозначное объяснение этому явлению до сих пор не дано.

Что касается кристаллов GaP , то первые работы по влия-

нию радиации на их свойства вышли в начале семидесятых годов (Е.Ю.Брайловский и др.). Работы по этому вопросу интенсивно ведутся как отечественными, так и зарубежными исследователями. Однако эти исследования недостаточны для создания полной картины о природе РД, образуемых в GaP при облучении, а также для выяснения механизмов исчезновения этих дефектов при термическом отжиге. Необходимо отметить еще следующее. В литературе имеется очень мало данных по теплопроводности n-GaP при температурах ниже комнатных. А исследования по влиянию радиации на тепловые свойства кристаллов GaP вообще отсутствуют.

Изучение РД в InP получило большой размах особенно после 1980 года, когда при исследовании дефектов начали привлекать такие мощные современные методы как электронно-парамагнитный резонанс (ЭПР), нестационарная спектроскопия глубоких уровней (НСГУ), магнитно-круговой дихроизм (МКД), аннигиляция позитронов в кристаллах. Тем не менее многие вопросы по исследованию РД недостаточно полно изучены.

Таким образом, с каждым днем возрастающий интерес к исследуемым материалам InAs, GaP, InP обусловлен как необходимостью решения научных проблем, так и расширением области их практических применений.

Целью диссертационной работы является изучение природы дефектов, вводимых в кристаллы n-InAs, n,p-GaP и n-InP после облучения электронами с энергиями 4, 7.5 и 50 МэВ в широкой области доз 10^{14} - 10^{18} эд/см².

Для этого были поставлены следующие основные задачи:

1. Путем измерения тепловых и электрических характеристик n-InAs, n-InP, GaP выяснить характер вводимых РД.
2. Выяснить механизмы рассеяния фононов для образцов n-GaP с разными концентрациями примесей при температурах жидкого азота (как до облучения, так и после облучения).
3. Изучить процессы, происходящие при изохронном отжиге облученных кристаллов GaP, InP.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. На основе собственных и имеющихся в литературе данных расчетным путем показано, что наблюдаемое явление увеличения

концентрации свободных электронов в n-InAs как при облучении высокоэнергетичными электронами, так и после высокотемпературной обработки обусловлено присутствием в материале неконтролируемых примесей Cu, S, O и т.д.

2. Впервые измерена температурная зависимость коэффициента теплопроводности (κ) необлученных кристаллов n-GaP вблизи температуры жидкого азота. При этом обнаружено, что температура максимума κ у n-GaP по сравнению с p-GaP смещена в сторону высоких температур ($T_{\text{max}} = 85+88$ К).

3. Установлено, что в некотором температурном интервале более "грязные" (легированные) образцы n-GaP имеют большую теплопроводность, чем более чистые образцы.

4. Коэффициент теплопроводности кристаллов GaP при $T_{\text{изм}} = 85$ К осциллирует с ростом дозы облучения.

5. Обнаружено, что κ для образцов p-GaP (при $T_{\text{изм}} = 85$ К) с ростом температуры изохронного отжига ($T_{\text{отж}}$) сначала увеличивается и при некоторой температуре (разной в зависимости от вида исходных примесей) даже становится больше исходного, а потом уменьшается.

6. Показано, что с ростом $T_{\text{отж}}$ в образцах n-GaP наблюдается немонотонное восстановление коэффициента теплопроводности (κ).

7. После изохронного отжига при температурах выше 600°C в облученных образцах n-GaP появляется проводимость по уровню протекания. Такая проводимость имеет место в облученных и отожженных до $T_{\text{отж}} \approx 300^\circ\text{C}$ образцах n-InP.

8. При облучении кристаллов n-InP ($n_0 \approx 10^{18}$ см⁻³) электронами с энергией 50 МэВ на кривой температурной зависимости коэффициента электропроводности вблизи $T_{\text{изм}} \approx 160$ К появляется минимум. А после некоторой дозы облучения при $T_{\text{изм}} < 100$ К появляется прыжковая проводимость.

9. При рассеянии фононов в облученных кристаллах n-InP решающую роль играют возникающие в них заряженные точечные дефекты (ТД) и разупорядоченные области (РО), обладающие объемным пространственным зарядом.

10. Относительное изменение κ облученных образцов n-InP (при фиксированной дозе облучения) уменьшается с увеличением

концентрации исходных примесей и имеет тенденцию к насыщению.

Научная и практическая значимость работы:

1. Полученные результаты расширяют наши представления о физике фононов в бинарных соединениях $A^{III}B^{V}$.
2. Данные, полученные на кристаллах $InAs$ и InP , могут быть использованы при конструировании термоэлементов на основе твердых растворов $InAs_{1-x}P_x$, а также для выяснения причин деградации характеристик солнечных элементов на основе InP , эксплуатируемых в условиях радиации (в космической технике).
3. Результаты по GaP могут стать весьма полезными при разработке термоэлементов на основе твердого раствора $GaAs_{1-x}P_x$. Эти результаты могут применяться при учете процессов теплоотвода в лазерах на основе $GaAs_{1-x}P_x$.

Основными защищаемыми положениями являются:

1. Вывод о том, что возникающие после облучения дефекты в $n-InAs$, GaP имеют, в основном, точечный характер, а образуются при облучении электронами с энергией 50 МэВ РО имеют малые размеры и не обладают объемным пространственным зарядом.
2. Предложение о том, что в кристаллах $n-InAs$ содержится достаточное количество комплексов из неконтролируемых примесей (Cu, S, O), которые являются ответственными за увеличение концентрации свободных электронов как после высокотемпературной термообработки, так и после облучения высокоэнергетичными частицами.
3. Существование максимума на кривой температурной зависимости \mathcal{R} для некоторых кристаллов $n-GaP$ в температурном интервале (85+88) К.
4. В узком температурном интервале более "грязные" образцы $n-GaP$ имеют большую теплопроводность, чем чистые образцы.
5. Появление на кривых дозовой зависимости \mathcal{R} (при $T_{изм} = 85$ К) кристаллов GaP локальных экстремумов.
6. При рассеянии фононов в облученных кристаллах $n-InP$ ответственными являются заряженные ТД и РО, обладающие пространственным зарядом.

Апробация работы и публикации. Результаты работы доложены на Всесоюзном семинаре по радиационной физике твердого тела "Новые экспериментальные методы в радиационной физике твердого

тела", г.Ереван (1985 г.); на Международной конференции по радиационному материаловедению, г.Алушта (1990 г.) и опубликованы в международных и всесоюзных журналах.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы. Работа изложена на 166 страницах машинописного текста, включая 2 таблицы и 35 рисунков. Список литературы содержит 182 ссылки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность изучения РД в кристаллах $InAs$, GaP и InP , дается краткое содержание диссертационной работы, а также отмечается новизна полученных результатов и приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор литературы, относящийся к теме диссертации. В частности, приводятся теоретические сведения о рассеянии фононов в кристаллах при низких и высоких температурах. Демонстрируется возможность теплофизического метода обнаружения возникающих дефектов в полупроводниках (как в атомарных, так и в бинарных) при облучении их разными видами проникающих радиаций. Показывается, что путем сравнения расчетного добавочного теплосопrotivления с экспериментальными значениями можно судить о характере возникающих РД. Приводятся также результаты по изохронному отжигу этих дефектов.

Здесь же приводятся сведения о влиянии РД на электрофизические свойства $InAs$, GaP и InP . В частности указывается, что облучение кристаллов $n-InAs$ вызывает рост концентрации свободных электронов. При облучении проводимость кристаллов из p -типа превращается в n -тип.

Во второй главе описана методика и техника эксперимента, использованная в данной работе. Измерения по теплопроводности, термоэдс и электропроводности проведены в стационарном режиме в интервале температур (80+330) К. Ошибки измерения составляют $\pm(3+5)\%$. Измерения по эффекту Холла проводятся на постоянном токе в постоянном магнитном поле напряженностью 6000 Э в интервале температур (100-300) К с точностью до $\pm 10\%$.

Облучение исследуемых образцов проводилось на линейных ускорителях и на микротроне с энергиями соответственно 50, 4 и

7.5 МэВ. В процессе облучения образцы охлаждались продувом паров жидкого азота, поддерживающим постоянную температуру образца $\sim 20^\circ\text{C}$.

В третьей главе приведены результаты исследования влияния облучения электронами с энергиями 7.5 и 50 МэВ на теплопроводность и термоэдс кристаллов $n\text{-InAs}$, $n\text{-GaP}$ и $n\text{-InP}$. Из сравнения добавочного расчетного и экспериментального теплосопrotivления делается вывод, что при облучении образцов $n\text{-InAs}$ в них образуются дефекты, в основном, точечного характера. А при облучении электронами с энергией 50 МэВ образуются также и РО, которые не обладают пространственным зарядом. Однако малое изменение \mathcal{K} кристаллов $n\text{-InAs}$ обусловлено, по-видимому, и тем, что концентрация возникающих РД мала по сравнению с концентрацией присутствующих в них технологических дефектов.

Из-за отсутствия в литературе экспериментальных данных по теплопроводности $n\text{-GaP}$ вблизи температуры жидкого азота в работе проведены такие измерения. Сравнение этих результатов с аналогичными результатами для $p\text{-GaP}$ показало, что температура максимума \mathcal{K} для $n\text{-GaP}$ находится в области от 85 до 88 К в зависимости от концентрации свободных электронов. Исследования показали, что для образцов $n\text{-GaP}$ с примесью серы в указанном интервале температур максимум отсутствует, а для образцов с примесью теллура максимум наблюдается при концентрации свободных носителей $n \approx (1.5 \div 9) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. При $n > 10^{18} \text{ см}^{-3}$ максимума на $\mathcal{K}(T)$ не наблюдалось. Для объяснения указанных особенностей образцов n - и p -типа предлагаются два возможных механизма рассеяния фононов. Первый из них — это механизм Кейса, который имеет резонансный характер относительно концентрации примесных атомов. Этот механизм касается рассеяния фононов за счет внутриатомных электронных переходов в примесях. Интенсивность рассеяния фононов максимальна, когда размер орбиты связанного электрона (боровский радиус) равен длине рассеиваемого фонона. Оценка показывает, что для образцов $n\text{-GaP}$ промежуточного легирования в области азотной температуры становится заметным рассеяние фононов на связанных электронах донорных атомов. Средняя длина фононов

при 80 К ($\lambda = 12 \text{ \AA}$) и боровский радиус ($a^* \approx 16 \text{ \AA}$) одинакового порядка. Однако с увеличением концентрации примесей энергия ионизации донорных электронов уменьшается, a^* увеличивается, и резонансное условие нарушается, что в конечном итоге приводит к исчезновению отмеченного механизма рассеяния.

Второй механизм — это рассеяние фононов на локальных модах, обусловленных примесными донорными атомами. Високотемпературный максимум наблюдается в образцах с примесью теллура, а в образцах с серой — отсутствует. Оценки показали, что энергия локальных мод, обусловленных примесями теллура, и энергия средних фононов при 80 К близки по значению. Это рассеяние тоже носит резонансный характер.

Результаты измерений показали, что теплопроводность у некоторых сильнолегированных образцов $n\text{-GaP}$ за максимумом в сторону высоких температур больше, чем для образцов, содержащих меньшее количество электрически активных примесей. Вблизи комнатной температуры соотношение обратное, т.е. чистый образец имеет более высокую теплопроводность. По-видимому, в узком температурном интервале вблизи азотных температур это явление обусловлено рассеянием фононов на примесях. Фононы рассеиваются не только на примесях, но и друг на друге (N - и U -процессы), причем интенсивность последнего механизма рассеяния с повышением температуры растет экспоненциально ($1/T_4 \sim e^{-\frac{E_p}{T}}$). U -процессы, дающие основной вклад в тепловое сопротивление кристалла, имеют место тогда, когда модули волновых векторов фононов \vec{k}_1, \vec{k}_2 и их взаимная ориентация таковы, что $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3 + 2\vec{\bar{b}}$, где $\vec{\bar{b}}$ — вектор обратной решетки. При наличии примесей фононы, рассеиваясь на них упруго, изменяют свое направление так, что сумма их волновых векторов уже не удовлетворяет вышеприведенному соотношению, т.е. для таких фононов U -процессы становятся невозможными. Следовательно, из-за того, что интенсивность рассеяния U -процессов намного выше, чем интенсивность примесного рассеяния в некотором ограниченном интервале температур и концентраций примесей, теплопроводность более сильно легированного образца может быть больше, чем для чистого образца. При комнатных температурах число фононов с большими волновыми векторами становится пре-

обладающим, и на фоне их взаимного рассеяния примесное рассеяние играет второстепенную роль. Поэтому теплопроводность более сильно легированных образцов $n\text{-GaP}$ меньше теплопроводности чистых, так как немногочисленные длинноволновые фононы (не участвующие в U -процессах), которые существуют при этих температурах, рассеиваются на примесях по закону Релея.

Установлено также, что почти одинаковые концентрации примесных атомов Fe и Zn по разному влияют на теплопроводность кристаллов GaP . Это объясняется тем, что имеет место механизм рассеяния фононов на свободных носителях, число которых больше в кристаллах с примесью цинка.

Исследовались также процессы накопления РД в кристаллах GaP при облучении электронами с энергией 50 МэВ в интервале доз от 10^{14} до $6 \cdot 10^{17}$ эл/см². Оказалось, что на кривых зависимости κ (при $T_{изм} = 85$ К) от дозы облучения наблюдаются локальные экстремумы. Независимость этого явления от исходного типа проводимости образцов свидетельствует о том, что возникающие РД имеют собственный характер. По анализу полученных данных делается предположение, что такими дефектами могут быть антиструктурные дефекты фосфора в подрешетке галлия (P_{Ga}). Наблюдаемая зависимость κ от дозы облучения интерпретируется как результат возможной перезарядки этих дефектов (как вновь образуемых, так и существующих в образце до облучения). Путем сравнения расчетных и экспериментальных добавочных теплосопровитлений различных образцов GaP при азотной и комнатной температуре установлено, что значения пороговых энергий смещения для атомов III и V группы (Ga и P) равны аналогичным значениям для $GaAs$ (соответственно 7 и 11 эВ). Полученные в этой работе значения не согласуются с литературными данными.

Облученные образцы GaP подверглись изохронному отжигу в интервале температур от 100 до 900°C. Кривые восстановления κ для обоих типов образцов в общих чертах оказались похожими. Но наряду со сходствами, они имеют и заметные различия. Измерения показали, что низкотемпературное значение κ ($T_{изм} = 85$ К) облученных образцов $n\text{-GaP}$ с увеличением $T_{отж}$ до 400°C сильно осциллирует, а с дальнейшим ростом $T_{отж}$ более

или менее монотонно стремится к своему значению до облучения κ_0 . Однако аналогичные исследования на кристаллах $p\text{-GaP}$ с примесью железа и цинка показывают, что с самого начала роста $T_{отж}$ наблюдается монотонное увеличение κ . А при некоторой температуре (400 и 670°C соответственно для образцов с примесью цинка и железа) κ восстанавливается, проходя через максимум (при 450 и 700°C), и далее до конца отжига монотонно уменьшается, становясь ниже κ_0 . Такое поведение кривых отжига для образцов $p\text{-GaP}$ объясняется процессами вторичного дефектообразования. В частности, процессы комплексообразования между имеющимися в кристаллах радиационными и примесными дефектами и их дальнейшее разрушение приводят соответственно к увеличению и уменьшению теплопроводности кристалла. Наблюдаемое различие между результатами отжига p - и n -типа образцов обусловлено тем, что процессы вторичного дефектообразования в материалах p -типа могут происходить эффективнее благодаря высокой подвижности междоузельных атомов галлия и фосфора даже при 100 К. Установлено также, что РД в образцах GaP с примесью железа термически более стабильны, чем в образцах с примесью цинка.

Результаты измерений показали, что теплопроводность кристаллов $n\text{-InP}$ сильно уменьшается после облучения электронами с энергией 50 МэВ. Такое уменьшение обусловлено образованием PO (обладающих пространственным зарядом) и кулоновским взаимодействием между ними. Такое взаимодействие приводит к сильной деформации решетки, что и означает уменьшение теплопроводности. Установлено, что чем больше концентрация электрически активных примесей в InP , тем меньше размеры пространственного заряда PO , следовательно, и меньше снижение теплопроводности. Однако относительно сильное уменьшение теплопроводности кристаллов наблюдается и после облучения их электронами с энергией 7.5 МэВ. Это означает, что значительное уменьшение κ кристаллов InP после их электронного облучения обусловлено, главным образом, образованием заряженных РД.

Повторное измерение электроннооблученных кристаллов после временной выдержки показало, что теплопроводность со временем увеличивается, что указывает на существование нестабиль-

ных РД в InP . Показано также, что при фиксированной дозе облучения относительное уменьшение низкотемпературной теплопроводности с увеличением концентрации примесей имеет тенденцию насыщения. Это объясняется тем, что происходит образование комплексов между примесными атомами и РД.

Измерения показывают, что коэффициент термоэдс (α) образцов $n\text{-InAs}$ уменьшается после облучения электронами. Это уменьшение приписывается увеличению концентрации свободных электронов. Измерение α кристаллов $n\text{-GaP}$ показало, что с понижением температуры измерения, начиная с 200 К, наблюдается его аномально сильный рост, что приписывается эффекту фононного увлечения. Облучение этих образцов электронами с энергией 50 МэВ даже дозой $6 \cdot 10^{15}$ эл/см² приводит к смещению температуры аномального роста α в сторону низких значений и, кроме того, к уменьшению его абсолютного значения. Такое поведение термоэдс обусловлено рассеянием участвующих в процессах фононного увлечения длинноволновых фононов на радиационных дефектах.

Электронное облучение кристаллов $n\text{-InP}$ вызывает увеличение абсолютного значения α , что обусловлено уменьшением концентрации свободных электронов из-за компенсации образца вследствие образования в нем акцепторных РД.

Четвертая глава посвящена исследованию воздействия электронного облучения на электропроводность и эффект Холла кристаллов InAs , GaP и InP . Предлагается модель, в рамках которой становится возможным объяснение давно известного эффекта увеличения концентрации свободных электронов в образцах InAs как после облучения высокоэнергетичными частицами, так и после высокотемпературной термообработки. Эта модель предполагает, что в кристаллах InAs имеются комплексы с неконтролируемыми примесями атомов меди, серы, кислорода и т.д. На основе этой модели рассчитано добавочное увеличение концентрации свободных электронов (Δn) после высокотемпературной длительной обработки образцов $n\text{-InAs}$ и сравнено с аналогичными экспериментальными результатами, полученными Диксоном и Энрайтом (Dixon J.R., Enright D.P., J. Appl. Phys., 1959, v. 30, p. 1462). Из этого сравнения делается вывод, что

предлагаемая модель дает хорошее согласие с экспериментом. Для вычисления Δn выбрана модель комплекса в виде близкорасположенных пар типа Cu^+S^- и Cu^+O^- и т.д. При низких температурах обработки эти пары связаны в комплексы, с повышением температуры все заметнее становится вероятность их диссоциации на атомы Cu и S (или Cu и O). Для Δn окончательно получится следующая формула

$$\Delta n = Z \nu e^{-\frac{\Delta W}{k_0 T}} \cdot \tau = 1,2 \cdot 10^{14} \cdot e^{-\frac{0,53}{k_0 T}} \cdot \tau, \quad (I)$$

где Z — число ближайших междоузлий решетки, которое для графцентрированной кубической системы равно 12; ν — частота колебания атома (иона), составляющего комплекс, которая по порядку равна Дебаевской $\sim 10^{13}$ с⁻¹; ΔW — энергия связи комплекса; τ — длительность термообработки. Далее в рамках этой модели интерпретируются экспериментальные результаты по изохронному отжигу электроннооблученных и отожженных кристаллов InAs . При интерпретации эффекта увеличения концентрации свободных электронов после облучения образцов быстрыми частицами возникает трудность, согласно которой вероятность взаимодействия проникающей частицы с комплексами неконтролируемых примесей намного меньше, чем с собственными атомами. Однако эта трудность преодолевается, если учитывать, что при взаимодействии проникающих частиц с образцом образуются вторичные электроны (или атомы), которые могут, в свою очередь, взаимодействовать с комплексами, тем самым отрывая связывающий их электрон. Оценки показывают, что концентрация таких вторичных электронов достаточно велика, чтобы сказанное имело место.

Исследование электроннооблученных образцов $n\text{-GaP}$ с исходными концентрациями электронов $(3+5) \cdot 10^{16}$ см⁻³ показало следующее. Изменение наклона логарифма удельного электросопротивления $\log \rho$ от $10^3/T$ для образца сразу после облучения ($E = 7.5$ МэВ) и низкотемпературного отжига обусловлено неравномерностью облучения. Неравномерность облучения приводит к возникновению областей с различной компенсацией свободных носителей тока, т.е. к крупномасштабным флуктуациям электрического потенциала. Однако эти флуктуации обусловлены точечными

радиационными дефектами (ТРД), поэтому они и исчезают при сравнительно низких температурах отжига. В случае облучения образцов n -GaP электронами с $E = 50$ МэВ, в противоположность первому случаю, наклон $\log \rho$ от $10^3/T$ изменяется при высоких температурах изохронного отжига (выше 600°C). Отжиг при сравнительно низких температурах приводит, в основном, к исчезновению ТРД и к сильному уменьшению степени компенсации образца. С понижением температуры измерения на кривых, соответствующих $T_{\text{отж}} > 600^\circ\text{C}$, заметно изменяется наклон зависимости $\log \rho$ от $10^3/T$. Замедление темпа увеличения ρ при понижении температуры измерения объясняется тем, что часть электронов, находящихся в свободной зоне, не покидает ее и не переходит на пустые донорные уровни. Такое поведение ρ можно приписывать наличию РО со слоем пространственного заряда, электростатический потенциал $V(r)$ которых приводит к модулированию краев энергетических зон GaP, придавая им извилистую форму с различными максимумами и минимумами (повторяя форму электростатического потенциала). Уровни мелких донорных центров тоже повторяют ход $V(r)$. Таким образом, если электроны находятся в минимумах зоны проводимости, а свободные донорные уровни — около максимумов $V(r)$, то с понижением температуры электроны не могут перейти на эти уровни (связанное состояние). Процесс принимает активационный характер, и темп роста ρ с понижением T замедляется, т.е. электроны, находящиеся в минимумах $V(r)$, все-таки участвуют в проводимости путем заброса их на так называемый "уровень протекания", характерный для неоднородных структур. Энергия забрасывания электрона на этот уровень заметно меньше энергии активации донорных уровней.

Одним из интересных результатов является то, что удельное электросопротивление образцов n -GaP, облученных электронами с $E = 50$ МэВ, после отжига при 700°C сильно возрастает (отрицательный отжиг более чем на два порядка) вместо ожидаемого уменьшения. Оказалось, что при этом образуется новый электронный уровень с энергией ионизации $E \approx 0.24$ эВ. Хотя нельзя точно выяснить характер этого уровня, но можно четко сказать, что его появление является результатом квазихимической реакции, стимулированной отжигом между РД и донор-

ными примесными атомами. Кроме того, отрицательный отжиг происходит, наверно, при участии также и РО. Последнее предположение следует из того, что такой эффект отсутствует после отжига кристаллов, облученных электронами с $E = 7.5$ МэВ.

Электронное облучение приводит к компенсации свободных носителей в кристаллах InP и, следовательно, к уменьшению их удельной электропроводности (6). Показывается, что после облучения образцов n -InP (с исходной концентрацией $n_0 \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$) электронами с $E = 50$ МэВ (дозой $1.3 \cdot 10^{18}$ эл/см²) при температурах ниже 100 К имеет место явление прыжковой проводимости. После облучения дозой $\approx 5.7 \cdot 10^{17}$ эл/см² на кривой температурной зависимости $\sigma(T)$ при $T_{\text{изм}} = 160$ К появляется минимум.

Этот результат объясняется в рамках модели М-центра, который образуется после облучения в образцах только n -типа и может существовать в двух зарядовых состояниях в зависимости от температуры измерения. Такая перезарядка, которая является обратимой в температурном отношении, и приводит к минимуму на $\sigma(T)$.

Показано, что как и в кристаллах n -GaP, в n -InP с исходными концентрациями электронов ниже 10^{17} см^{-3} при $T_{\text{изм}} < 140$ К возможен механизм проводимости по уровню протекания. Также показывается, что облучение электронами с $E = 50$ МэВ в кристаллах InP вводит РО, обладающие пространственным зарядом, радиус протяжения которого по оценкам достигает до 2000-3000 Å. Установлено, что именно эти области и обуславливают аномальную температурную зависимость холловской подвижности μ (сильное уменьшение в сторону понижения температуры измерения). Такие зависимости, которые свойственны неоднородным полупроводникам, особенно четко проявляются после отжига образцов до 300°C , когда в основном исчезают ТРД и остаются РО. Оставшиеся РО модулируют края энергетических зон полупроводника. Для таких неоднородных систем теория дает для $\mu \sim \mu_0 \cdot \exp(-\Delta^2 / 2k_0 T^2)$. После изохронного отжига при 325°C оценка средней флуктуации краев зон по этой формуле дает для $\Delta \approx 0.028$ эВ. Наблюдаемое уменьшение μ при изохронном отжиге до 300°C связывается с исчезновением ТРД, а увеличение его при $T_{\text{отж}} > 300^\circ\text{C}$ — с отжигом РО.

Из результатов дозовой зависимости μ для образцов n -InP

следует, что накопление РД в этом материале является сложным процессом, в ходе которого происходит перезарядка уже имеющихся дефектов и образование новых. Одним из интересных результатов является то, что в образцах $n\text{-InP}$ с $n < 10^{17} \text{ см}^{-3}$ после облучения электронами с $E = 50 \text{ МэВ}$ на $\mu(T)$ зависимости появляется минимум, который приписывается РО.

Проведенные в работе расчеты показали, что температурная зависимость холловской подвижности у образцов $n\text{-InP}$, облученных электронами с $E = 50 \text{ МэВ}$, в интервале температур от 100 до 250 К определяется, в основном, механизмом рассеяния электронов на РО.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе:

1. При энергиях облучающих электронов до 7.5 МэВ образующиеся дефекты в InAs и GaP имеют точечный характер. При высоких энергиях облучающих электронов (50 МэВ), помимо точечных дефектов, образуются также разупорядоченные области, роль которых незначительна из-за малости их размеров и отсутствия вокруг них области пространственного заряда.

2. В кристаллах InAs существует несложные комплексы неконтролируемых примесей Cu , S , O и т.д., которые как после высокотемпературной термообработки, так и после облучения высокоэнергетичными электронами разрушаются и приводят к увеличению концентрации свободных электронов. Это явление более эффективно наблюдается в образцах с высокой степенью компенсации.

3. Обнаружено, что некоторые кристаллы $n\text{-GaP}$ до облучения проявляют максимум (вблизи температуры жидкого азота) на кривой температурной зависимости коэффициента теплопроводности. Температура максимума теплопроводности для этих кристаллов смещена в более высокую область по сравнению с $p\text{-GaP}$. Найдено, что образцы, легированные примесью железа, имеют большую теплопроводность, чем кристаллы с примесью цинка.

4. Показано, что после облучения кристаллов GaP быстрыми электронами в них образуются локальные моды радиационного характера. Обнаружено, что на кривых дозовых зависимостей коэффициента теплопроводности образцов GaP появляются локаль-

ные экстремумы независимо от их исходного типа проводимости. Такое поведение низкотемпературной теплопроводности, по-видимому, связано с образованием антиструктурных дефектов.

Эксперименты по изохронному отжигу облученных образцов GaP показывают, что в ходе отжига существенную роль играют процессы вторичного дефектообразования. Интересно отметить, что при этом, в отличие от кристаллов $n\text{-GaP}$, в образцах $p\text{-GaP}$ с ростом температуры отжига коэффициент теплопроводности монотонно увеличивается и при некоторой температуре (она более высокая для GaP:Fe) превосходит свое исходное значение. С дальнейшим увеличением температуры отжига теплопроводность уменьшается до значения ниже исходного. Показано, что в кристаллах $n\text{-GaP}$, облученных электронами с $E = 50 \text{ МэВ}$ и отожженных при $T_{\text{отж}} \geq 600^\circ\text{C}$, появляется проводимость по уровню протекания. При $T_{\text{отж}} = 700^\circ\text{C}$ появляется отрицательный отжиг электросопротивления, что тоже связывается с присутствием РО, а также с процессами вторичного дефектообразования в ходе отжига. Установлено, что возникающие РД в GaP с примесью железа термически более стабильны, чем в образцах с примесью цинка.

5. Из результатов измерения α облученных кристаллов $n\text{-InP}$ следует, что этот материал более чувствителен к облучению, чем InAs и GaP . Исходя из собственных данных и результатов, имеющихся в литературе, делается вывод, что относительное изменение коэффициента теплопроводности $n\text{-InP}$ при фиксированной дозе облучения с увеличением исходной концентрации примесей уменьшается и имеет тенденцию к насыщению. Из этого результата вытекает, что при облучении в $n\text{-InP}$ образуются комплексы, содержащие РД и примесные атомы.

6. После облучения кристалла $n\text{-InP}$ ($n_0 = 10^{18} \text{ см}^{-3}$) электронами с энергией 50 МэВ на кривой температурной зависимости электропроводности вблизи 160 К наблюдается минимум. После облучения дозой $\sim 1.3 \cdot 10^{18} \text{ эл/см}^2$ при $T_{\text{изм}} < 100 \text{ К}$ появляется прыжковая проводимость. А после изохронного отжига при $T_{\text{отж}} \leq 325^\circ\text{C}$ наблюдается проводимость по уровню протекания. А наблюдаемый при этом минимум на кривой зависимости холловской подвижности от $T_{\text{отж}}$ объясняется отжигом точечных РД,

а также изменением размеров РО, образованием различных комплексов и перезарядкой уже присутствующих дефектов.

После облучения кристаллов $n\text{-InP}$ электронами с энергиями 4 и 50 МэВ на кривой дозовой зависимости холловской подвижности наблюдается минимум, что обусловлено образованием некоторых рассеивающих центров и их перезарядкой.

Вклад автора заключается в личном участии в получении и обработке экспериментальных данных, в предложении нового механизма, объясняющего добавочный рост концентрации свободных электронов в кристаллах InAs после высокотемпературной термообработки и облучения высокоэнергетичными частицами, в выявлении механизма рассеяния низкотемпературных фононов в некоторых необлученных образцах $n\text{-GaP}$, в выявлении роли разупорядоченных областей в изменении тепло- и электрофизических параметров исследованных материалов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Амагуни К.М., Айрапетян С.А., Никогосян С.К., Саакян В.А. Влияние электронного облучения на тепло- и электрофизические свойства $n\text{-InAs}$. - Изв. АН АрмССР, Физика, 1979, т. 14, с. 134-137.
2. Айрапетян С.А., Никогосян С.К., Саакян В.А., Сароян А.С. Влияние отжига на удельное электросопротивление облученных образцов $n\text{-GaP}$. - Изв. АН АрмССР, Физика, 1982, т. 17, с. 36-39.
3. Никогосян С.К., Саакян В.А., Сароян А.С. Теплопроводность GaP при низких температурах. - Изв. АН АрмССР, Физика, 1983, т. 18, с. 109-112.
4. Никогосян С.К., Саакян В.А. Влияние неконтролируемых примесей на концентрацию свободных носителей тока в InAs при облучении. - Ереван, 1985. - 13 с. Препринт БИИ-845(72).
5. Никогосян С.К., Саакян В.А. Тепло- и электрофизические методы изучения радиационных дефектов в $n\text{-InP}$. - Тезисы докладов Всесоюзного семинара по радиационной физике твердого тела, Ереван, 1985, с. 74-75.

6. Никогосян С.К., Саакян В.А. Влияние отжига на теплопроводность и удельное электросопротивление облученных образцов $n\text{-GaP}$. - Изв. АН АрмССР, Физика, 1986, т. 21, с. 275-279.
7. Nikogosyan S.K. and Saakyan V.A. The Effect of Electron Radiation on Thermal and Electrophysical Properties of $n\text{-InP}$. Phys. Stat. Sol. (a), 1989, v. 113, p. 43-50.
8. Никогосян С.К., Саакян В.А. Теплопроводность облученных кристаллов GaP и особенности их термического отжига. - Тезисы докладов международной конференции по радиационному материаловедению, Харьков, 1990, ч. 2, с. 58.