

На правах рукописи
УДК 621.315.592

КАМАЛОВ АМАНГЕЛДИ БАЗАРБАЕВИЧ

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТАКТОВ МЕТАЛЛ- GaAs(GaP, InP),
СФОРМИРОВАННЫХ ЧИСТЫМИ МЕТАЛЛАМИ
И АМОРФНЫМИ ПЛЕНКАМИ TiB_x**

01.04.10-Физика полупроводников

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

ТАШКЕНТ-2011

Работа выполнена в Институте физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева
НАН Украины и на кафедре Физики полупроводников Каракалпакского
Государственного университета имени Бердаха.

Научный консультант: доктор физико-математических наук, проф.
Исмаилов Канатбай Абдиреймович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, академик
Муминов Рамизулла Абдуллаевич

доктор физико-математических наук, проф.
Бахадирханов Мухаммадкабир Саидхонович

доктор физико-математических наук, проф.
Дмитрук Николай Леонидович

Ведущая организация: Национальный университет Узбекистана

Защита состоится «_____» _____ 2011 г. в _____ часов на заседании
Специализированного совета Д.015.08.01 при Физико-техническом институте
НПО «Физика-Солнце» АН РУз по адресу: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор
йули 26. Тел: (8-10-99871)- 233-12-71. Факс: (8-10-99871)-233-42-91.
E-mail: karimov@uzsci.net

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического
института НПО «Физика-Солнце» АН РУз

Автореферат разослан «_____» _____ 2011 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью,
просим направлять ученому секретарю Специализированного совета Д.015.08.01

Ученый секретарь
Специализированного совета Д.015.08.01
д.ф.-м.н., профессор

Каримов А.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы. Полупроводниковые структуры на основе A^3B^5 являются основными модельными объектами для фундаментальных исследований в области физики полупроводников и широко используются для создания оптоэлектронных и микроволновых приборов. До настоящего времени остается проблемным получение структурно совершенных эпитаксиальных пленок соединений A^3B^5 для приборов микроволновой электроники. Основной причиной этого является высокий уровень остаточных механических напряжений в эпитаксиальных структурах, релаксация которых приводит к ранней деградации приборов при облучении гамма-квантами ^{60}Co , ультразвуком и воздействием термообработок. Поскольку большинство элементов современной твердотельной электроники представляет собой барьерные структуры, то одной из наиболее важных фундаментальных проблем физики полупроводниковых приборов является выяснение механизма повышения воспроизводимости и стабилизации параметров приборов с барьером Шоттки при внешних воздействиях (гамма-кванты ^{60}Co , СВЧ, термообработки).

Наличие такой информации позволило бы получить приборы на основе A^3B^5 с заданными параметрами и глубже понять особенности поведения полупроводниковых приборов в процессе внешних воздействий.

Степень изученности проблемы. Известны работы [1,2], по улучшению параметров структур с барьером Шоттки за счет быстрой термической обработки, а также возможные пути повышения их температурного диапазона до 400 °С. Вместе с тем во многих работах, например в [3] при исследовании контактов Шоттки ограничились лишь получением низких значений контактного сопротивления. Однако физическая природа изменения контактного сопротивления при воздействии температуры нераскрыта. Также остаются малоизученными вопросы деградации параметров диодных структур на основе GaP и InP при термической обработке. Кроме того, несмотря на ожидаемые преимущества диодных структур на основе InP, благодаря его низким пороговым полям по сравнению с арсенидом галлия, существенного различия коэффициентов ионизации электронов и дырок, не решены вопросы создания к ним барьеров Шоттки с малыми механическими напряжениями на границе раздела металл-полупроводник. К настоящему времени также обнаружены факты повышения качества контактов барьеров Шоттки к полупроводникам A^3B^5 [4], но механизмы, обеспечивающие эти улучшения, остаются неизученными. Поэтому проведение комплексных исследований по выяснению механизмов повышения воспроизводимости и стабилизации параметров приборных структур с барьером Шоттки при внешних воздействиях, направленных на создание физических основ контактов металл- GaAs (GaP, InP) является актуальной задачей.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Настоящая диссертационная работа выполнена в рамках: НИР «Дифференциальная диагностика качества и прогнозирование надежности силовых полупроводниковых приборов, функционирующих в предельных тепловых режимах» (Задание ГНТП 3.6.3.4). 2Ф.21-58 "Исследование влияние параметров

переходной области и внешних воздействия на надежность полупроводниковых приборов с контактом металл-полупроводник" 2003-2007 гг.; ФА-Ф2-017 "Исследование особенностей формирования границы раздела металл-полупроводник и металл-диэлектрик-полупроводник в условиях радиационной и релаксационной диффузии" на 2007-2011 гг.; ITD-14-020 "Прогнозирование надежности полупроводниковых структур и приборов на их основе методом модуляционной дифференцирования" 2009-2011 гг.

Цель исследования: выяснение механизмов повышения воспроизводимости и стабилизации параметров приборных структур на основе GaAs, GaP и InP с барьером Шоттки, сформированным аморфными пленками TiB_x .

Задачи исследования:

- исследовать физические процессы, возникающие в GaAs, GaP и InP приборных структур с барьером Шоттки, сформированных чистыми металлами (Al, Ti, Cr, W) и аморфными пленками TiB_x , под влиянием внешних воздействий и установить механизмы влияния внешних воздействий на свойства приконтактных слоев;
- исследовать влияние СВЧ излучения сантиметрового диапазона длин волн, в том числе на ранних стадиях обработки, на электрические характеристики барьерных контактов на основе GaAs, GaP и определить причины изменения электрофизических параметров;
- исследовать влияние быстрой термической обработки на параметры барьеров Шоттки $TiB_x - n$ - GaAs (GaP, InP) и межфазные взаимодействия на границе раздела $TiB_x - n$ - GaAs (GaP, InP);
- разработать технологию изготовления термостойких и низкоомных омических контактов с удельным сопротивлением не более $10^{-4} \text{ Ом} \times \text{см}^2$ к GaP электронной проводимости и концентрацией донорной примеси не более 10^{17} см^{-3} ;
- исследовать сформированные на пористых подложках сильнолегированного InP, эпитаксиальные $n-n^+$ структуры InP, омические и барьерные контакты к ним и возможности их применения для изготовления диодов с барьером Шоттки и диодов Ганна.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования выбраны приборные структуры с барьером Шоттки на основе GaAs (GaP, InP), сформированные чистыми металлами и аморфными пленками TiB_x . Предметом исследования является установление стабилизации параметров контактов металл-GaAs (GaP, InP), сформированных чистыми металлами и аморфными пленками TiB_x под воздействием гамма-радиации ^{60}Co , СВЧ излучения и быстрой термической обработки.

Методы исследования. Для изучения межфазных взаимодействий использовалась Оже электронная спектроскопия в сочетании с ионным травлением (Ar^+ , $E_n = 1 \text{ кэВ}$), рентгеноструктурный анализ, атомно-силовая микроскопия (АСМ). Облучение гамма квантами ^{60}Co проводилось на установке МРХ- γ -25М. СВЧ обработка осуществлялась магнетронным излучением на частоте $f = 2,45 \text{ ГГц}$ с плотностью выходной мощности $1,5 \text{ Вт/см}^2$. Исследования электрофизических характеристик и параметров диодов с барьером Шоттки, диодов Ганна и омических

контактов к ним проводились на стандартизированных автоматизированных характеристикографах.

Гипотеза исследования заключается в том, что GaAs, InP и GaP с использованием барьерных контактов на основе аморфных фаз внедрения TiB_x являются высококачественными полупроводниковыми приборами с барьером Шоттки, стойкими к внешним воздействиям.

Основные положения, вносимые на защиту:

1. Эффект улучшения параметров (коэффициента идеальности, высоты барьера) полупроводниковых приборных структур с барьером Шоттки, связанный с радиационно-стимулированным геттерированием дефектов в приконтактной области металл–полупроводник A^3B^5 .
2. Механизм, объясняющий термостойкость параметров барьеров Шоттки (отсутствие диффузии на межфазной границе) до 600°C , связанный с замедлением процессов межфазного взаимодействия и массопереноса в слоях металлизации.
3. Механизм, объясняющий изменения удельного контактного сопротивления с ростом температуры в интервале от 77 до 386 К на различных образцах.
4. Механизмы, объясняющие деградацию диодных структур $TiB_x\text{-GaP(InP)}$, подвергнутых быстрой термической обработке при $T=800^\circ\text{C}$, обусловленные интенсивными межфазными взаимодействиями и формированием протяженного переходного слоя сложного состава.
5. Способы получения более совершенных и однородных эпитаксиальных слоев InP за счет минимального содержания в них концентраторов напряжений.
6. Способы улучшения параметров диодных структур с барьером Шоттки $TiB_x\text{-}n\text{-InP}$, сформированных на пористых подложках InP.
7. Механизмы, объясняющие повышение качества параметров после воздействия γ -квантами ^{60}Co и СВЧ излучения в контактах металл–полупроводник A^3B^5 .

Научная новизна:

1. Показано улучшение электрофизических параметров приборных структур с барьером Шоттки $TiB_x\text{-}n\text{-GaAs(GaP, InP)}$ под влиянием внешних воздействий, связанное с радиационно-стимулированным геттерированием дефектов в приконтактной области металл – $n\text{-GaAs(GaP, InP)}$.
2. Обнаружен стимулированный микроволновым излучением массоперенос металла в приконтактной области полупроводника приводящий к уменьшению эффективной толщины переходного слоя и увеличению высоты барьера Шоттки; разработаны методики облучения диодных структур на воздухе.
3. Обнаружена корреляция и закономерности по стимулированию релаксации внутренних механических напряжений в арсенидгаллиевых диодных структурах с барьером Шоттки при воздействии γ -квантами и СВЧ излучением, определены оптимальные дозы способствующие улучшению электрических характеристик приборных структур.
4. Установлено, что контактная система $TiB_x\text{-}n\text{-GaP}$ обладает повышенной термостойкостью без изменения электрофизических параметров барьера Шоттки вплоть до $T = 600^\circ\text{C}$.

5. Установлено, что микроволновая обработка приводит к структурно-примесному упорядочению на границе раздела TiB_x – n -GaP, сопровождающемуся более однородным распределением профилей компонентов полупроводника и TiB_x .
6. Показано, что изменение удельного контактного сопротивления с ростом температуры в интервале от 77 до 232 К обусловлено термоэлектронным механизмом; а его возрастание в интервале температур 232–386 К в образцах Au-TiB_x - $\text{AuGe-}n$ -GaP, связано с проводимостью по металлическим шунтам.
7. Увеличение высоты барьера и уменьшение коэффициента идеальности и обратного тока в диодах Шоттки коррелирует с увеличением радиуса кривизны пластины. Подобное изменение кривизны пластины связано с перестройкой дефектной структуры в области границы раздела фаз контакта металл-GaAs и может быть объяснено в рамках модели восходящей диффузии, являющейся следствием стимулированной радиацией релаксации BMH.
8. Экспериментально показано, что в диодных структурах $\text{Au-Ti-}n$ - n^+ -GaAs до и после облучения γ -квантами ^{60}Co до дозы 5×10^4 Гр обратный ток термогенерационной природы уменьшается более чем на порядок во всем диапазоне измеряемых напряжений, вплоть до напряжения пробоя, что обусловлено уменьшением концентрации центров генерации-рекомбинации.

Научная и практическая значимость результатов исследования:

1. Экспериментально определен диапазон доз и времени обработки, в котором возможно улучшение параметров полупроводниковых приборных структур с барьером Шоттки на основе GaAs, GaP и InP при воздействии на них гамма-квантов ^{60}Co и СВЧ излучения.
2. Результаты экспериментальных исследований по улучшению параметров приборных структур на основе GaAs, GaP и InP при внешнем воздействии на них гамма-квантов ^{60}Co и СВЧ излучения, позволяют уточнить представления о межфазных взаимодействиях в контактах и сопутствующим им процессах релаксации внутренних механических напряжений.
3. Разработана методика позволяющая определить закономерности протекания твердофазных реакций в структурах металл-GaAs(GaP, InP) и результирующий фазовый состав структуры, а также выбраны соединения для формирования термически стабильных контактов металл-GaAs(GaP, InP).
4. Разработан новый технологический подход к изготовлению автоэпитаксиальных пленок InP n -типа, выращиваемых методом жидкофазной эпитаксии на пористых подложках n^+ -InP и омических и барьерных контактов к ним с использованием аморфных фаз внедрения TiB_x .
5. Полученные данные о стойкости к внешним воздействиям (проникающая радиация, СВЧ излучение, быстрые термические нагрузки и др) полупроводниковых приборных структур с барьером Шоттки на основе A^3B^5 и механизмах воздействия могут быть использованы при создании полупроводниковых приборов с барьером Шоттки на основе соединений A^3B^5 и аморфных пленок TiB_x .
6. Определенный диапазон доз облучения γ -квантами ^{60}Co и СВЧ арсенидгаллиевых диодных структур с барьером Шоттки за счет изменения радиуса кривизны пластины арсенида галлия может быть использован в

технологических целях для улучшения параметров приборных структур.

7. Использование фаз внедрения TiV_x для эпитаксиальных структур InP за счет подавления диффузионных процессов позволяет расширить температурный диапазон структур с барьером Шоттки вплоть до 600 °C за счет исключения взаимной диффузии компонентов материалов контакта.
8. Генераторные диоды Ганна, изготовленные на пористой подложке генерируют СВЧ колебания при рабочих напряжениях близких к пороговым, что на 20% ниже, чем в обычных генераторах Ганна, изготовленных на стандартных подложках InP за счет повышения однородности приконтактного и активного слоев InP.

Реализация результатов. Полученные результаты являются основой для разработки радиационно- и термостойких полупроводниковых приборов на основе A^3B^5 , а также для создания высококачественных микроволновых приборов и твердотельных приемно-передающих устройств, в том числе приборных структур с барьером Шоттки и диодов Ганна на основе GaAs(InP, GaP) в научно-производственных объединениях и приборостроительных организациях.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных и республиканских конференциях: «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» (г. Ташкент, 2010, 2006, 2005); «Радиационная физика твердого тела» (г. Севастополь, Украина, 2008, 2005); «Актуальные проблемы физики» (г. Баку, 2008); «Проблемы современной гражданской авиации» (г. Баку, 2007); «Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе» (г. Баку-Сумгаит, 2007); «Structural Relaxation in Solids» (Vinitsa, 2005); «Актуальные проблемы физики полупроводников» (г. Дрогобич, 2005); «Взаимодействие излучения с твердым телом» (г. Минск, 2005); «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников» (г. Андижан, 2005); «Информационные и электронные технологии в дистанционном зондировании» (г. Баку, 2004). Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на объединенном семинаре Спецсовета при Физико-техническом институте НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

Опубликованность результатов. Основное содержание диссертационной работы отражено в 28 работах, опубликованных в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах и трудах Международных конференций, симпозиумов (одна монография, 13 статей, 14 работ в трудах и тезисах международной конференции).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и библиографического списка из 240 наименований. Вся диссертационная работа изложена на 246 страницах машинописного текста и содержит 47 рисунков, 16 таблиц.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цели и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор литературных данных о проблемах и задачах в области технологии полупроводниковых приборов с барьером Шоттки и улучшения их свойств технологическим способом, а также особенности формирования контактов металл- A^3B^5 . Анализ литературных данных и практики технологии полупроводниковых приборов с барьером Шоттки позволил выявить основные проблемы технологии барьерных и омических контактов к полупроводниковым материалам A^3B^5 , связанные с применением для их формирования различных металлов. А также рассмотрены основные физические процессы на границе раздела фаз металл- A^3B^5 обусловленные влиянием внешних воздействий.

Во второй главе изложены экспериментальные результаты по влиянию γ -радиации ^{60}Co и БТО на свойства арсенидгаллиевых приборных структурах с барьером Шоттки.

Показано, что при облучении диодных структур $\text{Au-Al-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$ γ -квантами ^{60}Co в диапазоне доз $10^3 \div 10^4$ Гр их параметры улучшаются, т.е. высота барьера ϕ_B увеличивается, коэффициент идеальности n и обратный ток $I_{обр}$ уменьшаются. Увеличение высоты барьера и уменьшение коэффициент идеальности и обратного тока в диодах Шоттки коррелирует с увеличением радиуса кривизны пластины R .

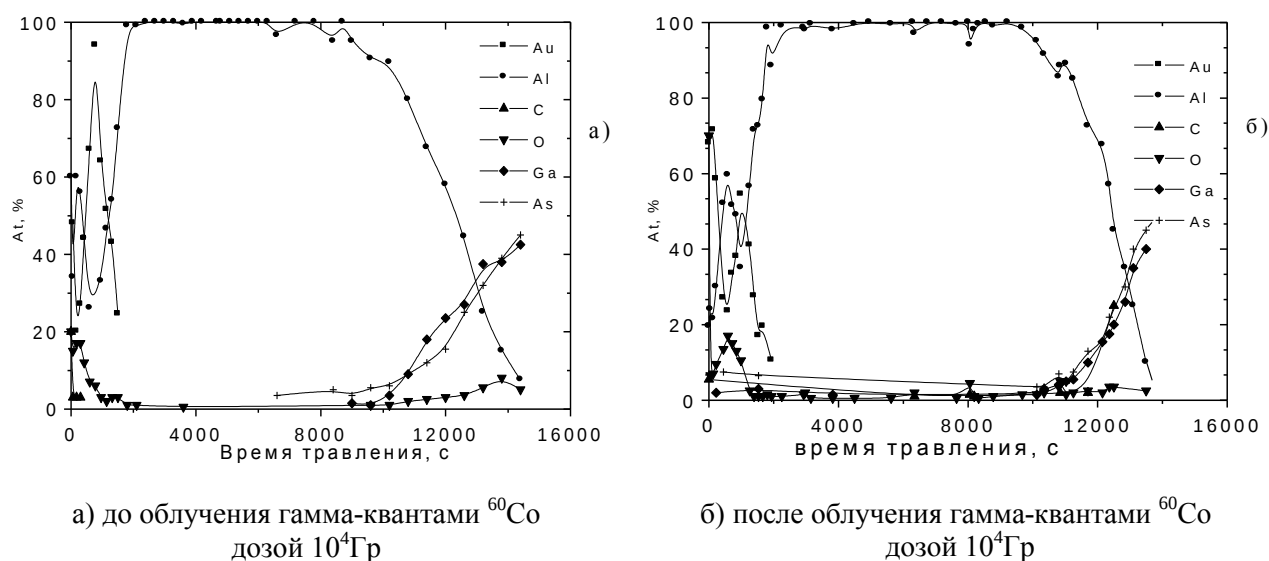


Рис. 1. Профили распределения компонентов в контакте $\text{Au-Al-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$

Подобная перестройка дефектной структуры в области границы раздела фаз контакта металл-GaAs может быть объяснена в рамках модели восходящей диффузии, являющейся следствием стимулированной радиацией релаксации ВМН. Факт же восходящей диффузии в контактах $\text{Au-Al-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$ подтверждается данными электронной Оже-спектроскопии представленными на рис. 1, из которых видно, что в результате облучения γ -квантами ^{60}Co до дозы 10^4 Гр обостряется профиль распределения Al в области границы раздела Al-GaAs и уменьшается толщина переходного слоя. При этом радиус кривизны облученной до 10^4 Гр пластины $\text{Au-Al-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$ увеличился практически на порядок по сравнению с исходной структурой, (радиус кривизны исходной системы был 2 м, после

облучения стал 20 м). А также в этой главе обсуждаются результаты исследования влияния гамма-радиации ^{60}Co в диапазоне доз $10^2 \div 10^5$ Гр на электрические параметры полупроводниковых структур с барьером Шоттки $\text{Au-Ti-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$.

До и после облучения измерялись статические вольтамперные характеристики диодных структур. Из ВАХ определялись параметры диодов Шоттки: высота барьера ϕ_B , коэффициент идеальности n , и зависимости обратного тока $I_{обр}$ от времени облучения.

На рис. 2 приведена дозовая зависимость коэффициента идеальности и высоты барьера Шоттки арсенидгаллиевых диодных структур с барьером Шоттки $\text{Au-Ti-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$. Видно, что в диапазоне доз $10^2 - 10^5$ Гр параметры барьера Шоттки улучшаются, высота барьера увеличивается от 0,87 эВ в необлученных структурах до 0,89 эВ после облучения до дозы 10^5 Гр, а коэффициент идеальности уменьшается от величины 1,25 до 1,12. Анализ обратных токов в диодных структурах $\text{Au-Ti-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$ до и после облучения γ -квантами ^{60}Co до дозы 5×10^4 Гр показал, что практически на всех облученных диодных структурах обратный ток термогенерационной природы уменьшается больше, чем на порядок во всем диапазоне измеряемых напряжений, вплоть до напряжения пробоя, что обусловлено уменьшением концентрации центров генерации-рекомбинации и, как следствие, увеличением времени жизни неосновных носителей заряда τ_p в базовой области диода.

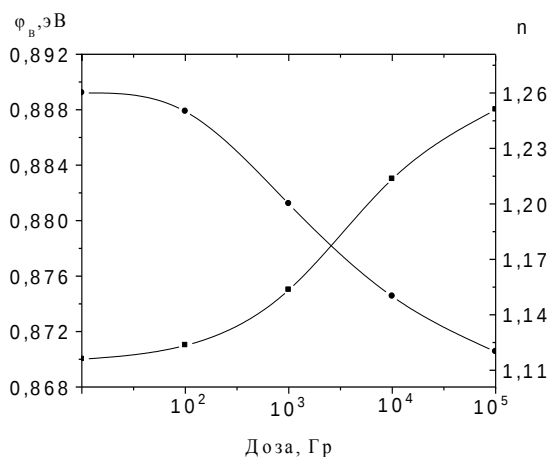


Рис. 2. Влияние облучения γ -квантами ^{60}Co на параметры ПБС $\text{Au-Ti-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$

А также рассмотрено влияние γ -радиации ^{60}Co на параметры контактных структур $\text{Au-TiB}_x\text{-GaAs}$. Экспериментальные результаты исследования показывают, что облучение контактных структур γ -квантами ^{60}Co способствует релаксации ВМН и в некоторых случаях улучшению их параметров вследствие радиационно-стимулированного геттерирования, способствующего структурно-примесному упорядочению в области границы раздела фаз металл-полупроводник. Поскольку такие данные по радиационному воздействию (облучение γ -квантами ^{60}Co) на контакты, содержащие

фазы внедрения TiB_x отсутствовали, мы провели экспериментальные исследования по выявлению дозовых зависимостей параметров барьеров Шоттки $\text{TiB}_x\text{-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$ и $\text{Au-TiB}_x\text{-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$. До и после облучения γ -квантами ^{60}Co в интервале доз $10^2 - 10^6$ Гр при интенсивности дозы 1 Гр/с были измерены прямые и обратные ветви ВАХ барьерных структур, из которых были рассчитаны параметры: высота барьера ϕ_B и коэффициент идеальности n , приведенные в табл. 1. На этих же структурах на профилометре П201 до и после облучения был измерен радиус кривизны R пластины. Из табл.1 видно, что при сравнительно малых дозах γ -радиации ^{60}Co ($(10^3 - 10^5)$ Гр для ПБС $\text{TiB}_x\text{-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$ и $5 \cdot 10^2 - 10^5$ Гр для $\text{Au-TiB}_x\text{-}n\text{-}n^+\text{-GaAs}$) наблюдается улучшение параметров ПБС. При этих же дозах существенно

увеличивается радиус кривизны пластины с сформированными на ней ПБС. Во всем рассмотренном интервале доз γ -радиации наблюдается уменьшение обратного тока в структурах обоих типов. Полученные данные

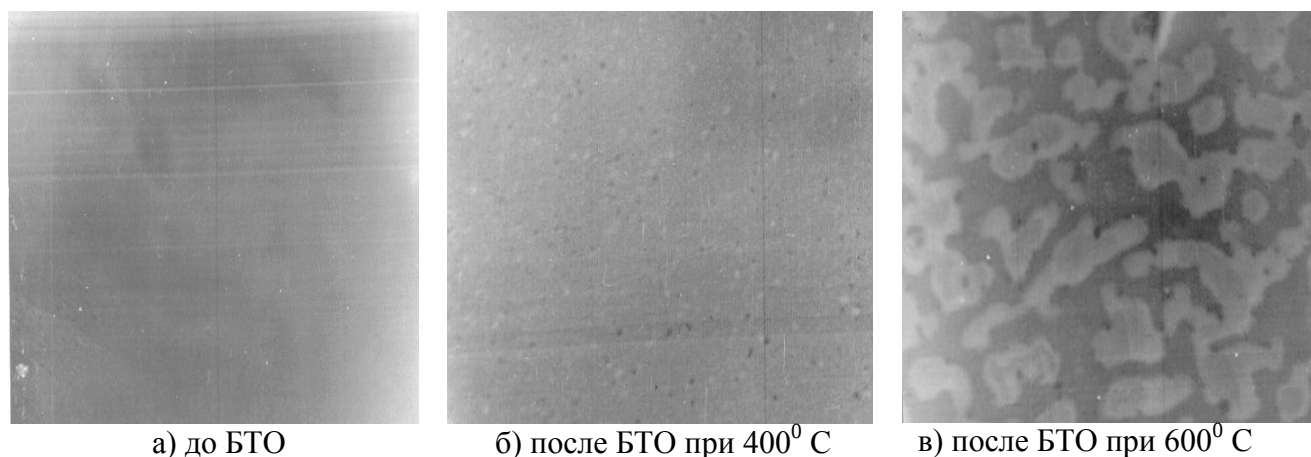
Таблица. 1

Дозовые зависимости φ_B , n и R ПБС $\text{TiB}_x-n-n^+-\text{GaAs}$ и $\text{Au-TiB}_x-n-n^+-\text{GaAs}$, облученных γ -квантами ^{60}Co

$\text{TiB}_x-n-n^+-\text{GaAs}$								
Доза, Гр								
	Исх.	10^2	$5 \cdot 10^2$	10^3	10^4	10^5	$5 \cdot 10^5$	10^6
φ_B , эВ	0,79	0,79	0,79	0,81	0,82	0,84	0,82	0,82
n	1,3	1,3	1,25	1,18	1,15	1,1	1,16	1,18
R , м	7,8	7,8	7,8	12	14	32	30	30
$\text{Au-TiB}_x-n-n^+-\text{GaAs}$								
φ_B , эВ	0,79	0,79	0,79	0,80	0,82	0,82	0,80	0,80
n	1,28	1,28	1,22	1,15	1,15	1,15	1,17	1,17
R , м	10	10	16	24	24	24	24	24

свидетельствуют о стимулированной γ -радиацией ^{60}Co релаксации ВМН и находятся в соответствии с общей моделью стимулированной внешними воздействиями релаксации ВМН гетеросистем, предложенной профессором Тхориком Ю.А. [5].

Наряду с γ -квантами ^{60}Co в качестве технологического фактора, влияющего на свойства барьерных структур на основе фаз внедрения мы выбрали быструю термическую обработку на электрофизические характеристики силовых диодов Шоттки $\text{Au-TiB}_x-n-n^+-\text{GaAs}$ на пластине и их взаимосвязь со свойствами границы раздела фаз TiB_x-GaAs в зависимости от режимов термообработки. Быстрые термические обработки были выполнены при температурах 400°C и 600°C в течение 60 с в водородной атмосфере. Морфология поверхности пленки Au в контакте $\text{Au-TiB}_x-n-n^+-\text{GaAs}$ до и после быстрой термической обработки при $T = 400^\circ\text{C}$ и 600°C показана на рис. 3. Из рис. 3 видно, что быстрая термическая обработка при $T=400^\circ\text{C}$ существенно не изменила морфологию поверхности пленки Au .



а) до БТО б) после БТО при 400°C в) после БТО при 600°C
Рис. 3. Морфология поверхности металлизации Au-TiB_x (увеличение 6000 раз)

После быстрой термической обработки при $T=600$ °С наблюдается преобразование мелкозернистого строения металлического покрытия (золота) в крупнозернистое. При этом электрические характеристики диодов Шоттки коррелируют с изменениями в морфологии поверхности $\text{TiB}_x\text{-GaAs}$. Для исходной выборки высота барьера Шоттки $\phi_B=0.78$ эВ и коэффициент идеальности $n = 1.2$. После быстрой термической обработки при $T=400$ (600) °С вышеупомянутые параметры были 0.78(0.6) эВ и $n = 1.15(1.64)$ соответственно. Показано, что силовые диоды Шоттки на основе контакта $\text{Au-TiB}_x\text{-GaAs}$ является термостойкими до 400°С.

В третьей главе обсуждаются экспериментальные результаты по влиянию СВЧ-излучения на электрические характеристики ПБС с контактом Шоттки на основе арсенида галлия при сравнительно малой длительности воздействия СВЧ-излучения.

Изменение параметров диодных структур с барьером Шоттки вследствие воздействия СВЧ облучения приведено в табл. 2. Из приведенных данных видно, что облучение диодных структур в течение 0,5÷20 с приводит к некоторому улучшению параметров прямой ветви ВАХ барьеров Шоттки, а именно: увеличению ϕ_B и уменьшению коэффициента идеальности. При этом на всех облученных диодных структурах во всем диапазоне доз существенно уменьшается обратный ток термогенерационной природы, что связано с увеличением времени жизни неосновных носителей тока в базовой области диодов обусловленного стимулированным СВЧ излучением геттерированием дефектов.

Таблица 2

Влияние СВЧ излучения на электрофизические параметры диодных структур с барьером Шоттки $\text{Au-TiB}_x - n\text{-}n^+\text{-GaAs}$

Режим обработки	Параметры			
	n	ϕ_B , эВ	I_S , А	$I_{обр}$, А при $U_{обр}=4$ В
Исходные	1,14	0,73	$8,3 \times 10^{-11}$	$2,1 \times 10^{-9}$
3 с	1,14	0,74	$7,4 \times 10^{-11}$	$2,2 \times 10^{-9}$
5 с	1,08	0,78	$3,8 \times 10^{-11}$	$1,6 \times 10^{-9}$
10 с	1,06	0,82	$1,14 \times 10^{-11}$	$3,6 \times 10^{-10}$
20 с	1,06	0,82	$1,8 \times 10^{-11}$	$1,6 \times 10^{-10}$

А также структурные исследования пленки TiB_x до и после СВЧ обработки показали, что микроволновое облучения в течение 10 с приводит к появлению в ней однородного полосчатого контраста с периодичностью полос $-625\text{\AA}$ и глубиной $-100\text{\AA}$. Этот эффект, как показали наши данные по измерению кривизны системы $\text{TiB}_x\text{-GaAs}$ сопровождается её уменьшением после СВЧ обработки, т.е. изменением собственных деформации в системе и их релаксаций вдоль направления $\langle 111 \rangle$. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о наличии эффекта стимулированного СВЧ излучением геттерирования в полупроводниковых структурах с барьером Шоттки на основе GaAs за счет релаксации внутренних механических напряжений. Изменение параметров диодных структур подвергнутых СВЧ обработке полностью коррелирует с характером их изменений в аналогичных структурах, подвергнутых облучению гамма-квантами ^{60}Co .

В этой главе также приводятся новые экспериментальные данные о влиянии микроволновой обработки на параметры диодных структур с барьером Шоттки Au-Ti- $n-n^+$ -GaAs и релаксаций ВМН в пластинах с $n-n^+$ -структурой GaAs и диодных структурах Au-Ti- $n-n^+$ -GaAs. В табл. 3 приведены параметры диодных структур и величины радиусов изгиба пластин до и после СВЧ облучения. Из табл. 3 видно, что параметры барьеров Шоттки - высота барьера ϕ_B , коэффициент идеальности n и величина обратного тока $I_{обр}$ при фиксированном напряжении коррелируют с изменением радиуса кривизны систем с ростом дозы СВЧ облучения (ростом времени обработки). Облучение диодных структур Au-Ti- $n-n^+$ -GaAs в течении 5 с приводит к полной релаксации ВМН ($R=\infty$, а $\chi=0$, система ненапряжена), при этом ϕ_B возрастает, а величины n и $I_{обр}$ уменьшаются. Уменьшение коэффициента идеальности n и обратного тока $I_{обр}$, увеличение высоты барьера ϕ_B в интервале времени 2-10с после СВЧ обработки свидетельствует о структурно-примесном упорядочении в приповерхностном слое GaAs и переходе системы в термодинамически более равновесное состояние по сравнению с исходным, что является следствием стимулированной СВЧ облучением релаксации внутренних механических напряжений. На это указывают данные

Таблица 3.

Влияние времени СВЧ обработки на радиус кривизны R и параметры

ϕ_B , n и $I_{обр}$ диодных структур Au-Ti- $n-n^+$ -GaAs

Параметры структур	Время облучения, с						
	0	1	2	3	5	6	10
R , м	6,0	12	12	19	∞	∞	∞
ϕ_B , эВ	0.63	0.63	0.64	0.69	0.72	0.72	0.72
n	1.35	1.35	1.30	1.22	1.15	1.15	1.15
$I_{обр}$, А, при $U_{обр} = 4$ В	4×10^{-8}	4×10^{-8}	2×10^{-8}	4×10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}

по изменению профиля атомных плоскостей поверхности структур $n-n^+$ -GaAs и Au-Ti- $n-n^+$ -GaAs (рис. 4 и рис. 5) в результате СВЧ обработки. Видно, что под действием микроволновой обработки в течении 2-10 с в обоих образцах возможно достижение значительной, почти полной релаксации ВМН. При этом по данным рентгенотопографических исследований, базирующихся на явлении аномального прохождения рентгеновских лучей, распределение плотности дислокаций в $n-n^+$ -структуре GaAs носит слабовыраженный W-подобный характер, который не изменяется после указанных выше режимов СВЧ обработки. Зарождаются отдельные дислокации и распространяются по плоскостям скольжения от края вглубь подложки. Контраст от микровключений исчезает – включения распадаются. Изменения в дислокационной структуре таких образцов сопровождаются интенсивным перераспределением полей упругих деформаций и более однородным их распределением по образцу, что в приборных структурах, с диодной топологией, коррелирует с увеличением процента выхода приборов с

идентичными параметрами. Полученные экспериментальные данные коррелируют с изменением радиуса изгиба гомо- и гетеросистем после СВЧ облучения.

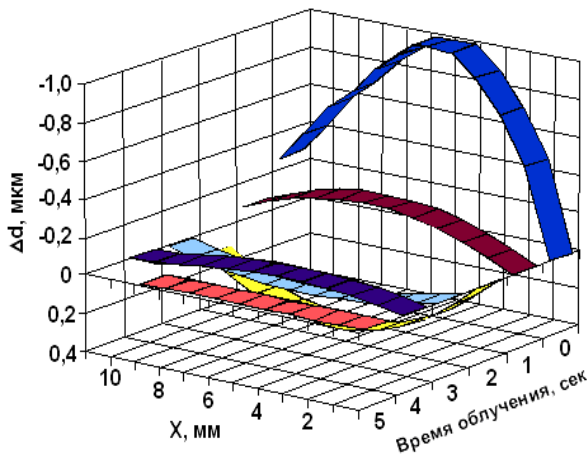


Рис.4. Изменение профиля атомных плоскостей поверхности структур $n-n^+$ -GaAs в результате СВЧ-обработки

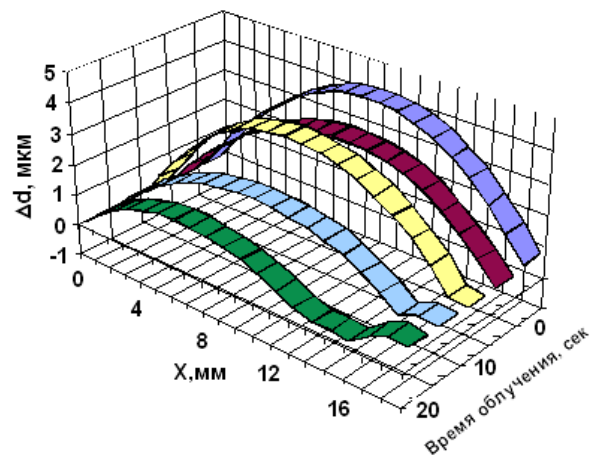


Рис.5. Изменение профиля атомных плоскостей поверхности структур Au-Ti- $n-n^+$ -GaAs в результате СВЧ-обработки

Экспериментальные данные показывают, что при малых дозах СВЧ облучения арсенидгаллиевых приборных структур с барьером Шоттки, вследствие возбуждения электронной подсистемы полупроводника наблюдается релаксация внутренних механических напряжений, сопровождающаяся изменением электрофизических свойств приповерхностных слоев арсенида галлия, коррелирующих с изменением параметров диодных структур с барьером Шоттки.

Аналогичные эффекты до и после СВЧ обработки наблюдаются диодах с барьером Шоттки $Mo-n-n^+$ -GaAs. Экспериментальные результаты показывают, что СВЧ обработка диодных структур приводит к улучшению параметров барьеров Шоттки, а именно: увеличению высоты барьера ϕ_B и уменьшению коэффициента идеальности n . Увеличение высоты барьера ϕ_B и уменьшение коэффициента идеальности n после СВЧ обработки в диодах Шоттки коррелирует с увеличением радиуса кривизны пластины R , что может быть связано с радиационно-стимулированным структурно примесным упорядочением на границе раздела $Mo-GaAs$. А также экспериментальные данные показывают, что улучшение параметров барьера Шоттки, связано с уменьшением толщины переходного слоя $Mo-GaAs$. Действительно, распределение компонентов в контактах $Mo-GaAs$, для контрольного и подвергнутого СВЧ обработке образцов показывает, что после СВЧ обработки в контактах произошли изменения, связанные с массопереносом компонентов и уменьшением вследствие этого эффективной толщины переходного слоя. При этом наблюдается, увеличение высоты барьера от 0,74 до 0,78 В. Мы полагаем, что изменения происходящие на границе раздела $Mo-GaAs$ после СВЧ обработки обусловлены релаксацией внутренних механических напряжений в контакте следствием чего является увеличение радиуса кривизны контактной структуры (табл.4.).

Таблица 4

**Параметры диодных структур с барьером Шоттки
Mo-p-n⁺-GaAs до и после СВЧ обработки в течение 5 секунд**

Параметры					
	φ_B^{IV} , эВ	φ_B^{CV} , эВ	n	R , м	$\frac{\delta}{\varepsilon_i}$, нм
Исходный	0,74	0,86	1,18	7,2	9,7
СВЧ обработка, 5 сек	0,78	0,93	1,12	14	5,6

Таким образом, экспериментальные данные показывают, что низкодозовая микроволновая обработка может быть использована для управления свойствами арсенидгаллиевых приборных структур с диодами Шоттки при воздействии на них СВЧ излучения с частотой $f=2,45$ ГГц длительностью $0 \div 20$ с.

В четвертой главе рассмотрены экспериментальные исследования влияние кратковременного быстро термического отжига и микроволнового излучения на свойства контакта $TiB_x-n-GaP$.

Для оценки термостойкости барьерных контактов $TiB_x-n-GaP$ использовалась быстрая термическая обработка (БТО) при температурах 400, 600 и 800 °С. До и после быстрой термической обработки на тестовых структурах со сплошным слоем TiB_x методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследовалась морфология поверхности пленки TiB_x на серийном атомно-силовом микроскопе Nanoscope IIIa. На дифрактометре “ДРОН-2” исследовался фазовый состав металлизации. Для получения профилей распределения компонентов металлизации использовался метод электронной Оже-спектроскопии. На диодных структурах до и после быстрой термической обработки измерялись ВАХ, из которых определялись высоты барьеров Шоттки φ_B и коэффициент идеальности n .

Результаты Оже-анализа показали, что существенное перемешивание на границе раздела $TiB_x-n-GaP$ отсутствует как в исходных образцах, так и прошедших быстрой термической обработки при температуре $T = 400$ и 600 °С. При температуре отжига 800 °С, наблюдается структурная перестройка TiB_x , что способствует сильному "размыванию" границы раздела. Это подтверждают и данные рентгенофазового анализа показавшего, что пленки TiB_x содержат как рентгеноаморфную фазу TiB_x , так и незначительное количество поликристаллического гексагонального TiB_2 . Отжиг не повлиял на фазовый состав пленки. Поэтому можно полагать, что наблюдаемые изменения на межфазной границе связаны со структурной модификацией контактирующего слоя.

Действительно, как видно из рис. 6 отжиг при 400 и 600°С поверхность изменяет очень мало. Резкое изменение рельефа вызывает отжиг при 800°С на поверхности, наблюдаются отдельные формирования диаметром порядка 100 нм и высотой до 20 нм, со средней плотностью 60 шт/мкм².

Резкое изменение рельефа при 800°С является следствием структурных перестроек в пленке TiB_x , сопровождаемых усилением массопереноса на межфазной границе металл-GaP (рис. 6). А также, температуры отжига 800°С могут приводить к дополнительной генерации дефектов как вследствие термической нестабильности материала, так и за счет межфазных взаимодействий.

Доминирующим в токопереносе и при данных температурах отжига остается механизм термоэлектронной эмиссии. Измерения ВАХ диодных структур показали, что величина коэффициента идеальности n для разных диодов составляет $1,2 \div 1,3$, что в соответствии с [6] отвечает термоэлектронному механизму токопереноса, а высота барьера Шоттки $\phi_B = 1,0 \div 1,2$ эВ. БТО при $T = 400(600^\circ\text{C})$ существенно не изменила эти параметры. БТО при $T = 800^\circ\text{C}$ привела к резкому ухудшению величин n и ϕ_B – величина n возросла до $2,5-3$, а ϕ_B уменьшилась до $0,7 \div 0,8$ эВ.

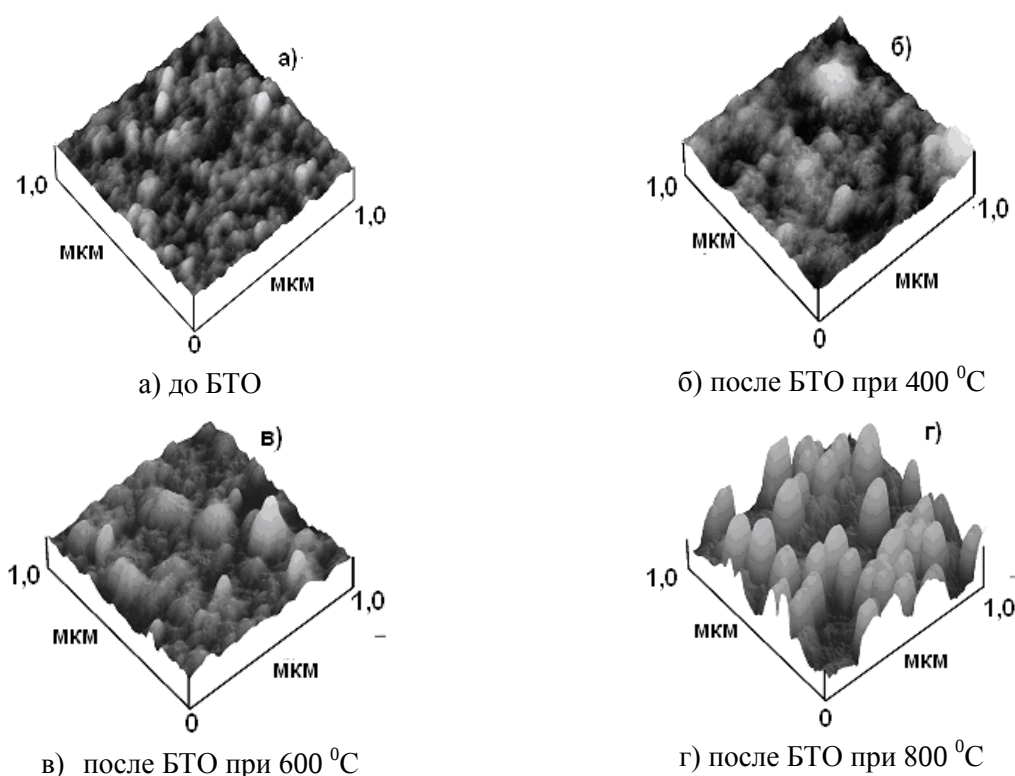


Рис. 6. Морфологические особенности поверхности $\text{TiB}_x\text{-n-GaP}$.

Таким образом, совокупность комплексных исследований барьерных контактов $\text{TiB}_x\text{-n-GaP}$ методами АСМ, рентгеновской дифракции, Оже-спектроскопии и вольтамперметрии показали, что контактная система $\text{TiB}_x\text{-n-GaP}$ обладает повышенной термостойкостью не изменяя значений электрофизических параметров барьера Шоттки вплоть до $T = 600^\circ\text{C}$. Ухудшение ВАХ при БТО при 800°C связано со структурной перестройкой слоя TiB_x , которая резко усиливает его диффузионную проницаемость для атомов полупроводника, что и приводит к деградации электрофизических параметров барьера.

В этом разделе также рассматривается влияние микроволновой обработки в течение 10 секунд на электрические характеристики диодных структур $\text{TiB}_x\text{-n-GaP}$. На диодных структурах $\text{TiB}_x\text{-n-GaP}$, до и после СВЧ обработки на частоте $f = 2,45$ ГГц при плотности мощности $P = 1,5$ Вт/см² измерялись ВАХ и ВФХ. На рис. 7 а, б приведены обратные ветви ВАХ и ВФХ исходной диодной структуры до и после микроволновой обработки в течение 10 секунд.

Анализ обратных токов в диодных структурах $\text{TiB}_x\text{-n-GaP}$ до и СВЧ обработки в течение 10 с показал, что практически на всех облученных диодных структурах обратный ток уменьшается примерно, в 5-10 раз во всем диапазоне измеряемых напряжений, что обусловлено уменьшением концентрации центров генерации-рекомбинации. При этом после 10 с СВЧ обработки на ВФХ изменение не наблюдается рис. 7 (б), т.е. концентрация легирующей примеси в n-области GaP не изменилась, поэтому наблюдаемые изменения ВАХ обусловлены не объемными параметрами GaP, а гомогенизацией переходного слоя и структурно-примесным упорядочением границы раздела $\text{TiB}_x\text{-n-GaP}$. Показано, что воздействие СВЧ излучения в течение 10 с частотой 2,45 ГГц, на параметры диодных структур с барьером Шоттки $\text{TiB}_x\text{-n-GaP}$, приводящее к структурно-примесному упорядочению в приповерхностных слоях полупроводника, обуславливает улучшение параметров диодных структур.

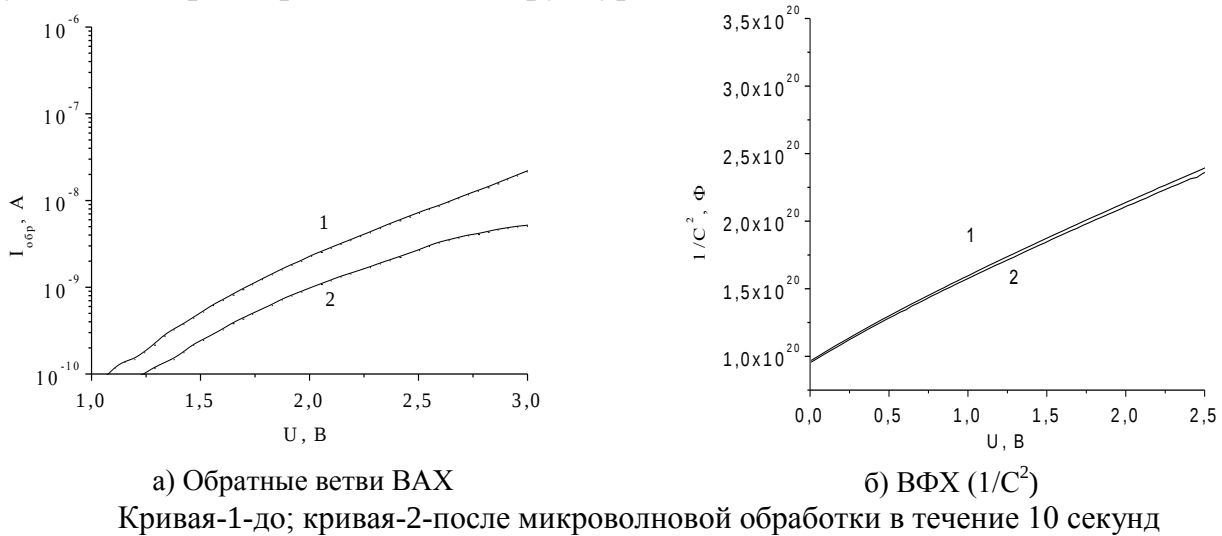


Рис. 7. Обратные ветви ВАХ и ВФХ ($1/C^2$) диода Шоттки $\text{TiB}_x\text{-n-GaP}$

На рис. 8 и 9 приведены профили распределения TiB_x и n-GaP до и после микроволновой обработки исходных и прошедших БТО структур. Из

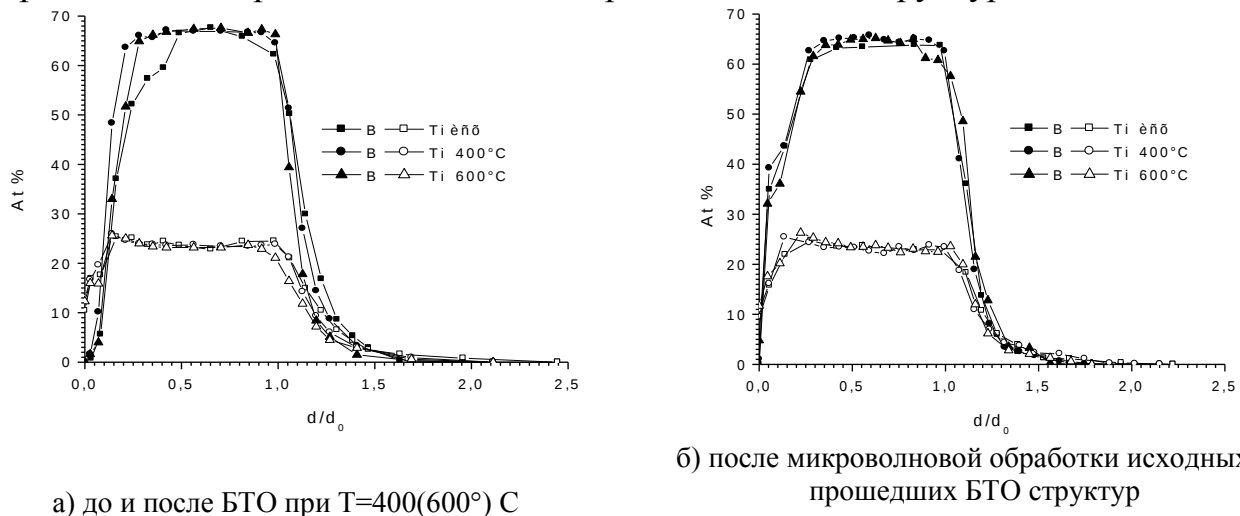


Рис. 8. Профили распределения TiB_x в контактах $\text{TiB}_x\text{-n-GaP}$

представленных на рисунках видно, что микроволновая обработка приводит к структурно-примесному упорядочению на границе раздела TiB_x - n -GaP сопровождающемуся более однородным распределением профилей компонентов полупроводника и TiB_x . Однако, судя по профилям, ни после БТО, ни после микроволновой обработки фазовый состав металлизации и переходного слоя существенно не изменился. Сопоставление профилей компонентов металлизации и полупроводника после БТО и микроволновой обработки показывает, что более интенсивная гомогенизация свойств границ раздела TiB_x - n -GaP наблюдается после микроволновой обработки и сопровождается увеличением крутизны профилей компонентов полупроводника (галлия и фосфора). Эффект обострения профилей Ga и P связан также с релаксацией внутренних механических напряжений. Оценка деформации в исходных (необлученных) контактах TiB_x - n -GaP и этих же облученных в СВЧ поле показала, что после облучения деформация уменьшалась на 13-15%.

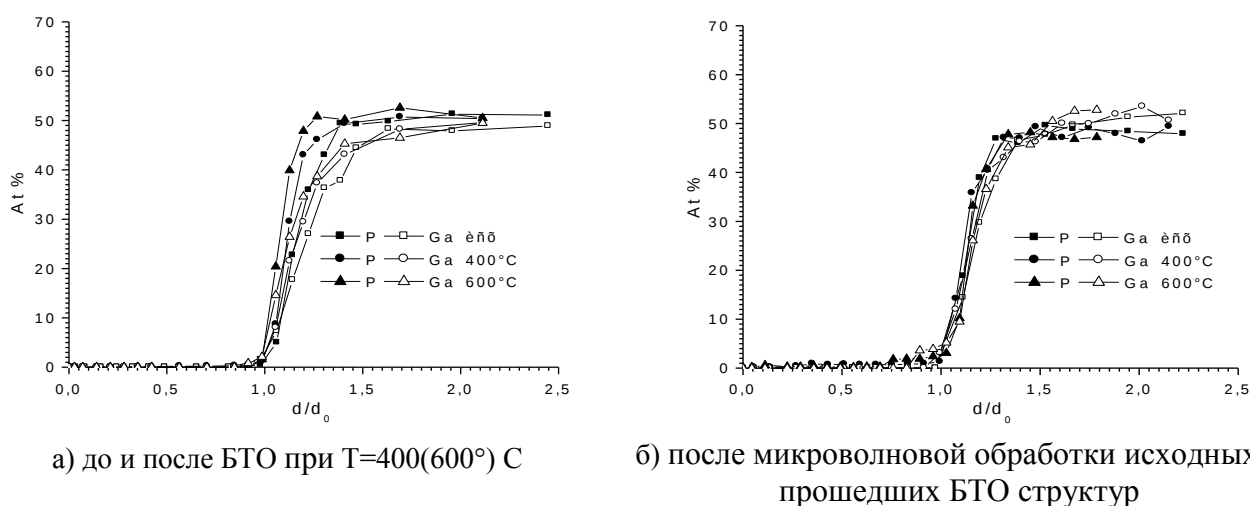


Рис. 9. Профили распределения GaP в контактах TiB_x - n -GaP

В пятой главе рассмотрен новый технологический подход к изготовлению автоэпитаксиальных пленок InP n -типа, выращиваемых методом жидкофазной эпитаксии на пористых подложках n^+ -InP и омических и барьерных контактов к ним с использованием аморфных (квазиаморфных) фаз внедрения TiB_x . Показаны преимущества диодов с барьером Шоттки TiB_x - n - n^+ - n^{++} -InP, изготовленных на пористых подложках перед таковыми, изготовленными на стандартных жестких подложках, а также возможность создания на эпитаксиальных структурах InP, выращенных на пористых подложках диодов Ганна на частотный диапазон 120-150 ГГц. Изложены результаты исследования морфологии поверхности, структурного совершенства автоэпитаксиальных слоев на жестких и пористых подложках InP и ВАХ диодов Шоттки на их основе. Показано, что эпитаксиальные пленки InP, выращенные на пористой подложке с буфером, легированные диспрозием со стороны ростовой поверхности и оловом верхний слой, являются структурно более совершенными, чем на «жестких» подложках. Морфология поверхности автоэпитаксиальных слоев InP, выращенных на жестких и пористых

подложках InP приведена на рис. 10. Из рис. 10а видно, что эпитаксиальные слои InP, выращенные на «мягких» подложках оказываются более совершенными, чем на «жестких». Слои InP, выращенные на обычных подложках с буфером (рис. 10 б) и без буфера (рис. 10 в), имеют более развитую поверхность, чем эпислой, выращенные на пористой подложке InP с буфером.

А также в этой главе представлены оценки величины полей остаточных упругих макродеформаций ε автоэпитаксиальных слоев InP, выращенных на жестких и пористых подложках InP, полученные методом рентгеновской дифрактометрии.

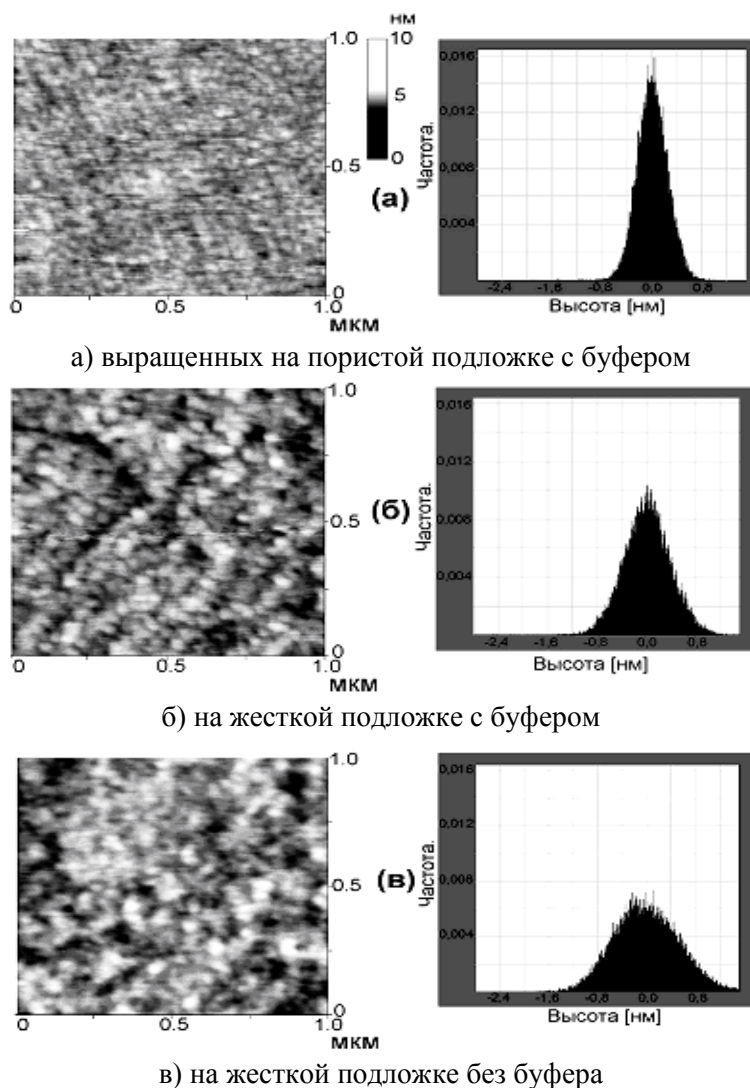


Рис. 10. АСМ изображение фрагментов поверхности и гистограммы распределения высот неровностей автоэпитаксиальных слоев InP

Показано, что эпитаксиальные слои, выращенные на пористой подложке с буферным слоем имеют наивысший уровень структурного совершенства, лучшее распределение компонентов (рис. 11), наименьшую полуширину кривой дифракционного отражения по сравнению с эпислоями, выращенными на жестких подложках.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные по исследованию структурных и морфологических особенностей эпислоев InP, выращенных на

жестких и пористых подложках с буферным слоем, а также барьерных контактов к ним с использованием фаз внедрения TiB_x свидетельствует о реальной возможности формирования на их основе приборных структур с барьером Шоттки.

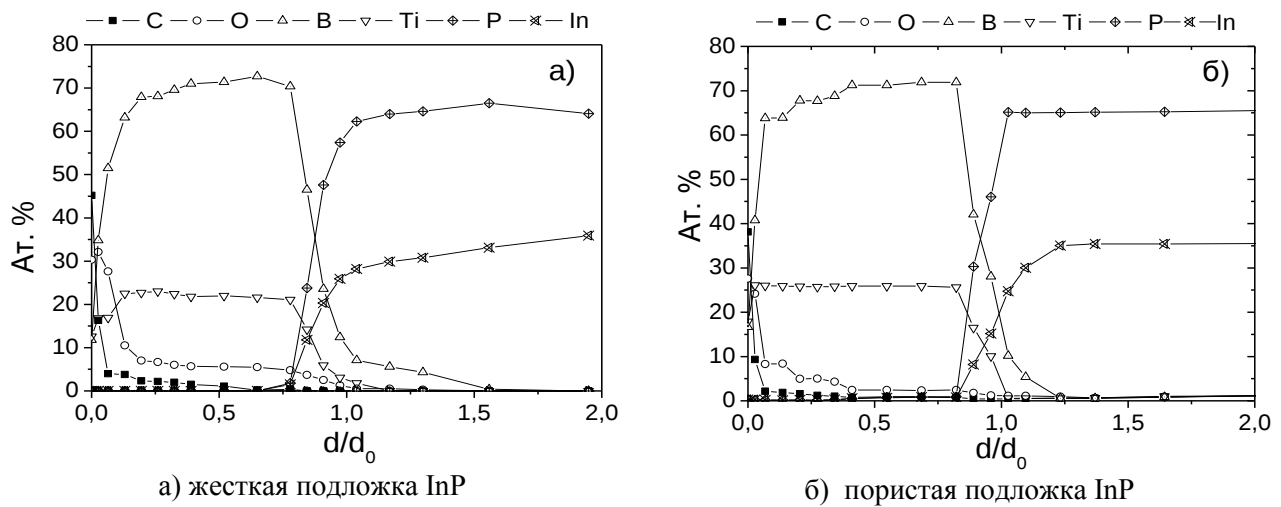
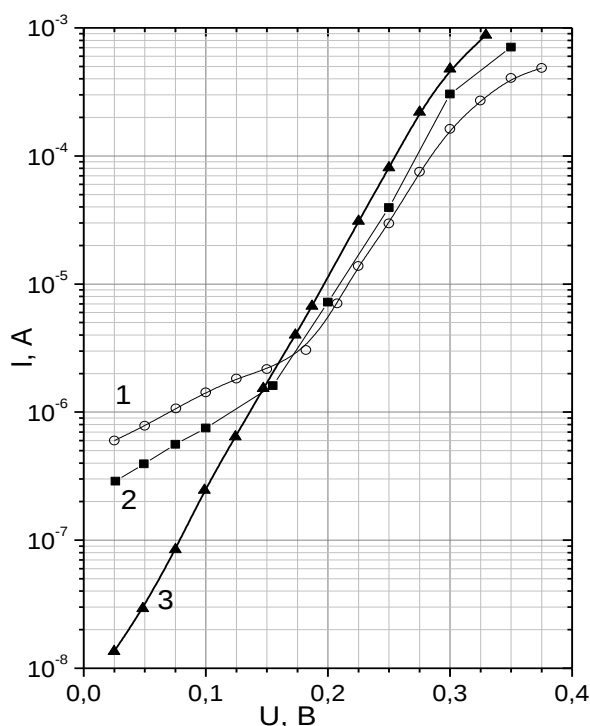


Рис. 11. Профили распределения компонентов в контактах $TiB_x-n-n^+-n^{++}InP$.

В шестой главе рассмотрена структурные и электрофизические свойства барьерных контактов $Au-TiB_x-n-n^+-n^{++}InP$, сформированных магнетронным распылением Au и TiB_x на стандартные («жесткие») и пористые («мягкие») подложки $n^{++}InP$ и термической устойчивости контактов сформированных Au и TiB_x на стандартные и пористые подложки $n^{++}InP$. Диодные структуры с барьером Шоттки, сформированные на пористых подложках InP обладают лучшими параметрами, чем диодные структуры, изготовленные на стандартных подложках InP , что обусловлено их большей структурной и топографической однородностью и минимальным содержанием концентраторов напряжений.

На рис. 12 представлены прямые ветви вольт-амперных характеристик контактов $Au-TiB_x-n(n^+)-n^{++}InP$, изготовленных на эпислоях, выращенных на стандартных и пористых подложках. Наблюдаются существенные отличия в токопереносе этих контактных структур в области малых прямых смещений, где играют существенную роль структурно-фазовые неоднородности контактов. Для контактов, изготовленных с использованием пористых подложек токи утечки уменьшаются более чем на порядок величины. Обратные ветви ВАХ диодов Шоттки, изготовленных эпитруктурах, выращенных на подложках InP трех типов (пористой с буфером и 2^х типов стандартных - с буфером и без буфера) показал, что ВАХ этих диодов отличаются уровнем утечки и напряжением пробоя диода Шоттки.

Экспериментально показано, что повысить термостойкость барьерных контактов к InP можно при использовании в качестве барьерообразующих материалов термостабильных и химически инертных аморфных (или квази-аморфных) пленок на основе TiB_x .



1—на жесткой подложке без буфера, 2— на жесткой подложке с буфером,
3— на пористой подложке с буфером.

**Рис. 12 Прямые ветви ВАХ диодных структур с барьером Шоттки
 $\text{Au-TiB}_x\text{-n-(n}^+\text{)-n}^{++}\text{InP}$**

На рис. 13 представлены профили распределения компонентов в контактах $\text{TiB}_x\text{-n}^{++}\text{InP}$ до и после быстрых термических отжигов. Видно, что отсутствует значительное перемешивание на границах раздела фаз как в исходных, так и прошедших БТО до 600°C образцах. При температурах отжига превышающих 600°C процессы, протекающие в контактной структуре указывают на усиление химических реакций между атомами контактообразующей пары. В этом случае отсутствует механизм ограничения межфазных взаимодействий, связанный с поступлением атомов к месту реакции и формированием сплава сложного химического состава. Усиление массопереноса в контактах после их отжига при $T=800^\circ\text{C}$ обусловлено релаксацией ВМН в контактах, сопровождающейся растрескиванием контактной системы. Потеря барьерных свойств TiB_x при отжигах больше 600°C наблюдалась и в случае двухслойной металлизации $\text{Au-TiB}_x\text{-n}^{++}\text{-InP}$. Сопоставление Оже-профилей атомных компонент контактов $\text{Au-TiB}_x\text{-n}^{++}\text{-InP}$ и $\text{TiB}_x\text{-n}^{++}\text{-InP}$, подвергнутых отжигам в диапазоне 400-800°C выявили, что главным фактором, оказывающим доминирующее влияние на характеристики диодов, является на начальном этапе проникновение атомов Au на границе раздела и металлизация промежуточного слоя, а затем происходит усиление аутидиффузии компонентов полупроводника. Наблюдается распад слоевой структуры контакта с образованием неоднородного по химическому составу сплава. Таким образом, величина и соотношение предельных растворимостей In и P в контактирующем с полупроводником слое определяют направление и степень разупорядочения приконтактной области InP.

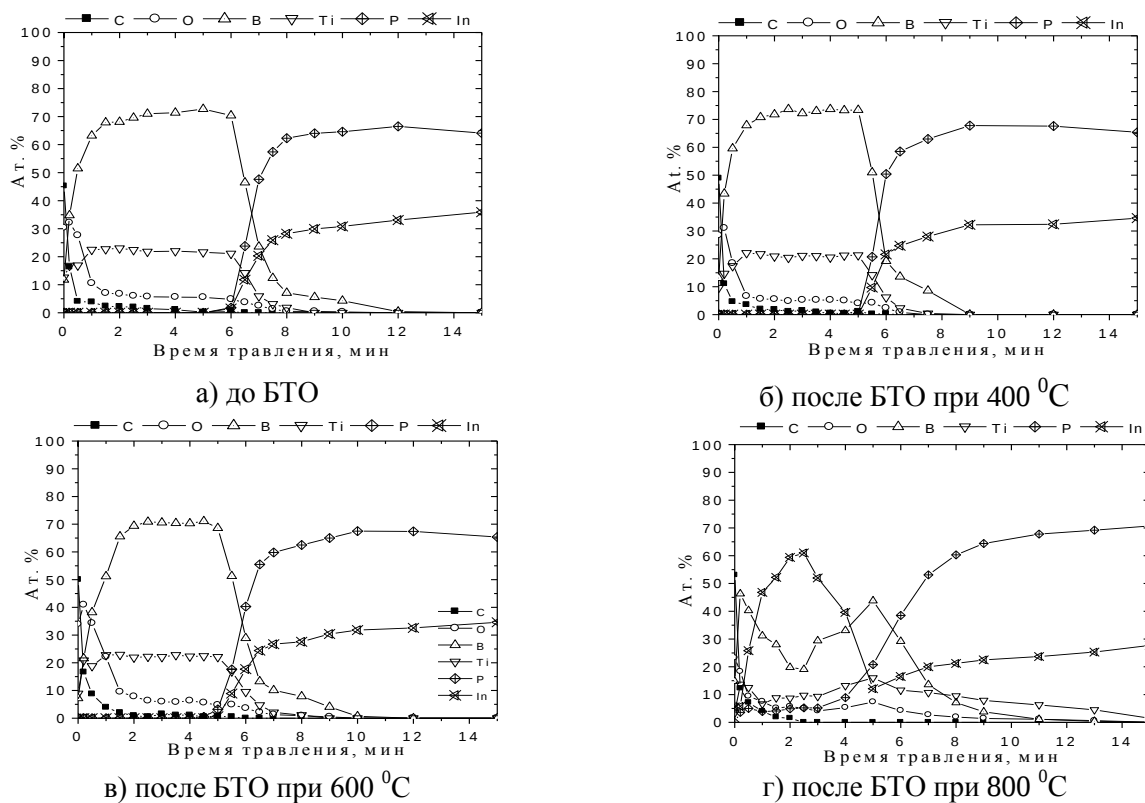


Рис. 13. Распределение компонентов в контактах $\text{TiB}_x\text{-}n^+\text{-InP}$

А также в этой главе представлены особенности электрических характеристик диодов Ганна на эпислоях, сформированных на пористых подложках InP. Макеты диодов Ганна были изготовлены по базовой технологии Государственного предприятия НИИ «Орион» на эпислоях InP, выращенных на стандартных и пористых подложках с использованием омических контактов Au-TiB_x-AuGe, контактное сопротивление в которых было $\leq 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$.

Использовались эпиструктуры, в которых подложка была толщиной ~ 350 мкм с концентрацией легирующей примеси (олово) $\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ буферный слой имел толщину ~ 3 мкм и концентрацию легирующей примеси $\sim 5 \div 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, рабочий (активный) слой – толщину 2 мкм и концентрацию легирующей примеси в нем $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Диаметр меза-структуры был ~ 60 мкм. Диодные чипы были собраны в металло кварцевые корпуса. Измерение СВЧ параметров в частотном диапазоне 120-150 ГГц осуществлялось в прямоугольном волноводном генераторе сечением 0,8x1,6 мм. Максимальная выходная мощность на частоте 120 ГГц (вторая гармоника) составила $\sim 3,5 \div 4$ мВт.

Оказалось также, что генераторы с диодами, изготовленными на пористой подложке начинали генерировать при рабочих напряжениях близких к пороговым, тогда как в обычных генераторах Ганна, изготовленных на стандартных подложках InP генерация СВЧ колебаний возникает при напряжениях, превышающих пороговые на 20%.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные по исследованию электрофизических, структурных и морфологических особенностей эпислоев InP выращенных на стандартных и пористых подложках с буферным слоем, а также

барьерных контактов к ним с использованием фаз внедрения TiB_x свидетельствуют о реальной возможности формирования на их основе термостойких до 600°C высококачественных приборных структур с барьером Шоттки. Показаны преимущества диодов с барьером Шоттки TiB_x - n - n^+ - n^{++} InP, изготовленных на пористых подложках перед таковыми, изготовленными на стандартных жестких подложках, а также возможность создания на эпитаксиальных структурах InP, выращенных на пористых подложках диодов Ганна на частотный диапазон 120-150 ГГц.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что при малых дозах СВЧ-обработки и облучения γ -квантами ^{60}Co арсенидгаллиевых n - n^+ структур, приборных структур с барьером Шоттки и тестовых металлизированных n - n^+ -структур наблюдается релаксация внутренних механических напряжений, сопровождающаяся изменением электрофизических свойств приповерхностных слоев арсенида галлия, коррелирующих с изменением параметров диодных структур с барьером Шоттки.
2. Экспериментально обнаружено немонотонное изменение радиуса кривизны пластин GaAs и GaP, коррелирующее с немонотонным изменением параметров ПБС на основе GaAs и GaP.
3. На основе полученных корреляций и закономерностей по стимулированию релаксации ВМН определен диапазон доз облучения арсенидгаллиевых диодных структур с барьером Шоттки γ -квантами ^{60}Co и СВЧ, в котором наблюдается улучшение электрических характеристик приборных структур.
4. Доказано, что контактная система TiB_x – n -GaP обладает повышенной термостойкостью без изменения электрофизических параметров барьера Шоттки вплоть до $T=600^\circ\text{C}$.
5. Установлено, что микроволновая обработка приводит к структурно-примесному упорядочению на границе раздела TiB_x – n -GaP, сопровождающемуся более однородным распределением профилей компонентов полупроводника и TiB_x , чем в исходных образцах.
6. Предложен новый технологический подход к изготовлению автоэпитаксиальных пленок InP n -типа, выращиваемых методом жидкофазной эпитаксии на пористых подложках n^+ -InP и омических и барьерных контактов к ним с использованием аморфных (квазиаморфных) фаз внедрения TiB_x .
7. Установлены преимущества диодов с барьером Шоттки TiB_x - n - n^+ - n^{++} InP, изготовленных на пористых подложках перед подобными, изготовленными на стандартных жестких подложках, а также возможность создания на эпитаксиальных структурах InP, выращенных на пористых подложках диодов Ганна на частотный диапазон 120-150 ГГц.
8. Экспериментально доказано, что диодные структуры с барьером Шоттки, сформированные на пористых подложках InP обладают лучшими параметрами, чем диодные структуры, изготовленные на стандартных подложках InP, что обусловлено их большей структурной и топографической однородностью и минимальным содержанием концентраторов напряжений.
9. Установлено, что использование фаз внедрения TiB_x для эпитаксиальных структур InP дает реальную возможность формирования на их основе термостойких до 600°C высококачественных приборных структур с барьером Шоттки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротченков Г.С., Михайлов В.А., Блаже В.А., Кисенко В.Е. Процессы взаимодействия на границе раздела М-InР, ответственные за временную стабильность параметров барьеров Шоттки на фосфида индия // Поверхность. Физика, химия, механика. 1997. -№7. -С. 68-74.
2. Галанихин А.В., Маркин Б. В., Чикун В.В. Влияние термических отжигов на вольт-амперные характеристики диодов Шоттки с барьером на основе LaB₆-GaAs, TiB₂-GaAs // Электрон. техн. Сер.1. СВЧ-Техника. 1994. -№.4 (464). -С.38-41.
3. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А., Константинов О.В., Никитин В.Г., Поссе Е.А. Особенности механизма протекания тока в омическом контакте к GaP // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, № 19. -С. 17-24.
4. Борковская О.Ю., Дмитрук Н.Л., Конакова Р.В., Литовченко В.Г., Тхорик Ю.А., Шаховцов В.И. Эффекты радиационного упорядочения в слоистых структурах на основе соединений A³B⁵. Препринт. Киев: ИФ АН УССР. 1986. -№6. -68 с.
5. Тхорик Ю.А., Хазан Л.С. Пластическая деформация дислокации несоответствия в гетероэпитаксиальных системах. // Киев.: Наукова думка. - 1983. 303 с.
6. Родерик Э.Х. Контакты металл-полупроводник // М.: Радио и связь.-1982.- 208 с.

4. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Монография и журнальные статьи:

1. Камалов А.Б. Особенности изготовления и электрофизические свойства контактов n-GaAs(GaP, InP) (**монография**) Киев-2008. 122 с.
2. Камалов А.Б. Изменение эффективной толщины переходного слоя в контактах Mo-GaAs, стимулированной СВЧ излучением // Известия вузов. Радиоэлектроника. –Киев, 2009. –№9-10. –С. 46-51.
3. Камалов А.Б. Модификация свойств контактов Au-Ti(W, Cr, TiB_x)-GaAs внешними воздействиями // Известия вузов. Радиоэлектроника. –Киев, 2009. – №3. –С. 71-77.
4. Камалов А.Б. Effect of external actions on characteristics of gallium arsenide Schottky-barrier diode structures // Radioelectronics and Communications Systems. – © Allerton Press Inc., 2008. –V.51. -№2. –Р. 80-86. (обзорная статья).
5. Арсентьев И.Н., Бобыль А.В., Конников С.Г., Болтовец Н.С., Иванов В.Н., Беляев А.Е., Камалов А.Б., Конакова Р.В., Кудрик Я.Я., Литвин О.С., Миленин В.В., Руссу Е.В. Свойства барьерных контактов к InP с наноразмерными слоями TiB_x. // ФТП. –Санкт-Петербург, 2008. –Том 42. – Вып. 7. –С. 793-798.
6. Арсентьев И.Н., Байдакова М.В., Бобыль А.В., Конников С.Г., Ситникова А.А., Улин В.П., Болтовец Н.С., Иванов В.Н., Беляев А.Е., Камалов А.Б., Конакова Р.В., Кудрик Я.Я., Литвин О.С., Миленин В.В. Морфология поверхности автоэпитаксиальных слоев на пористых подложках InP и

- вольтамперные характеристики диодов Шоттки на их основе // Физика и химия обработки материалов. –Москва, 2008. –№2. –С. 43-47.
7. Камалов А.Б. Необратимые изменения электрофизических параметров диодов Шоттки $\text{Au-TiB}_x\text{-n-p}^+\text{-GaAs}$ под действием СВЧ и ультразвуковой обработок // Узбекский физический журнал. –Ташкент, 2008. –Т.10. – №3. – С. 221-224.
 8. Камалов А.Б. Влияние радиационной и термической обработки на параметры диодов Шоттки $\text{Au-TiB}_x\text{-n-p}^+\text{-GaAs}$ // Физика и химия обработки материалов. –Москва, 2006. –№3. –С. 9-13.
 9. Исмаилов К.А., Тагаев М.Б., Камалов А.Б., Насыров М.У. Влияние термообработки на электрофизические свойства силовых диодов Шоттки $\text{Au-TiB}_x\text{-GaAs}$ // Доклады АН РУз. –Ташкент, 2006. –№1. –С. 24-25.
 10. Исмаилов К.А., Отениязов Е., Камалов А.Б., Бижанов Е. Влияние малых доз гамма радиации и СВЧ излучения на электрофизические параметры диодов с барьером Шоттки GaP и GaAs // Узбекский физический журнал. –Ташкент, 2005. –Т. 7. –№ 2. –С.124-127.
 11. Arsenyev I.N., Bobyl A.V., Tarasov I.S., Shishkov M.V., Boltovets N.S., Ivanov V.N., Belyaev A.E., Kamalov A.B., Konakova R.V., Kudryk Ya.Ya., Lytvyn O.S., Lytvyn P.M., Markovsky E.P., Milenin V.V. New technological possibilities to prepare InP epitaxial layers, as well as ohmic and barrier contacts to them, and the properties of microwave diodes made on their basis // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. –Kiev, 2005. –V. 8. –№ 4. –P.105-114.
 12. Arsenyev I.N., Bobyl A.V., Konnikov S.G., Tarasov I.S., Ulin V.P., Shishkov M.V., Boltovets N.S., Ivanov V.N., Belyaev A.E., Konakova R.V., Kudryk Ya.Ya., Kamalov A.B., Lytvyn P.M., Markovsky E.P., Milenin V.V., Redko R.A. Porous nanostructured InP: Technology, Properties, Application // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. –Kiev, 2005. – V. 8. –№ 4. – P.95-104.
 13. Камалов А.Б. Радиационные эффекты в барьерных контактах металл-GaAs // Петербургский журнал электроники. –2005. – Вып. 4(45). –С. 40-43.
 14. Конакова Р.В, Исмаилов К.А., Утениязов Е., Камалов А.Б., Бижанов Е. Эффекты в полупроводниковых структурах, стимулированные СВЧ излучением // Узбекский физический журнал. –Ташкент, 2003. –Т. 5. –№1. – С. 29-33.

Труды международных конференций:

15. Камалов А.Б. Процессы структурного упорядочения в диодных структурах Mo-GaAs , стимулированные СВЧ излучением // Труды XVIII Международного совещания «Радиационная Физика твёрдого тела» – Севастополь, 2008. –С. 152-157.
16. Камалов А.Б. Исследование термостабильности контактов на основе фаз внедрения с GaP // Труды пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы физики» –Баку, 25-27 июня, 2008. –С. 241-243.
17. Исмаилов К.А., Камалов А.Б., Отегенов Б.Ж. Влияние СВЧ излучения на свойства контакта $\text{Au-Ti-n-p}^+\text{-GaAs}$. // Материалы IV Республиканской

конференции «Рост, свойства и применение кристаллов» РСПК –2005. 27-29 октября 2005 г. Нукус–2005. –С. 63-64.

18. Камалов А.Б. Влияние сверхвысокочастотной обработки на параметры диодов с барьером Шоттки на основе GaP // Труды шестой международной научно-технической конференции «Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе» –Баку-Сумгаит, 14-16 ноября, 2007. –С. 85-87.
19. Камалов А.Б. Радиационные эффекты в барьерных контактах металл- GaAs, стимулированные гамма-радиацией, микроволновым и лазерным облучением // Труды XV Международного совещания «Радиационная Физика твёрдого тела» –Севастополь, 4 - 9 июля 2005. –С. 234-238.
20. Камалов А.Б., Исмаилов К.А., Тагаев М.Б., Бекбергенов С.Е. Влияние гамма радиации и СВЧ излучения на эклектические и механические свойства диодных структур Au-TiB_x-GaAs // Труды юбилейной международной научно-технической конференции посвященной 70-летию академика А.Ш. Мехтиева. «Информационные и электронные технологии в дистанционном зондировании» – Баку, 20-23 декабрь 2004. –С. 291-293.

Тезисы и материалы Международных научных конференций:

21. Камалов А.Б., Бекбергенов С.Б. Электрофизические свойства барьерных структур Pt-GaAs подвергнутых радиационным обработкам // Материалы конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» –Ташкент, 2010. –С. 203-205.
22. Исмаилов К.А., Камалов А.Б., Бижанов Е.К. Радиационные изменения электрофизических свойства полупроводниковых гетероструктур // Материалы конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» –Ташкент, 2010. –С. 198-200.
23. Kolyadina E.Yu., Kamalov A.B., Konakova R.V., Ismailov K.A., Lytvyn P.M., Matveeva L.A., Milenin V.V. Relaxation of intrinsic stresses in Au-Ti(TiB_x)-n-n⁺-GaAs surface barrier structures induced by microwave radiation // Materials of International Scientific-Practical Conference “Structural Relaxation in Solids” – Vinita, May 23-25, 2006. –P. 225-227
24. Камалов А.Б. Влияние СВЧ излучения на электрофизические свойства контактов Au-Ti(Au-TiB_x, W)-GaAs // Материалы международной конференции, посвященной 15-летию независимости Узбекистана «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» –Ташкент, 26-27 октября, 2006. –С. 217-218.
25. Исмаилов К.А., Камалов А.Б., Сапаров Ф. Атермические механизмы релаксации внутренних механических напряжений в полупроводниковых гетероструктурах. // Тезисы Международной научной конференции «Физика и физическое образование: достижения и перспективы развития» –Бишкек, 2006. –С. 20.
26. Камалов А.Б. Влияние гамма и СВЧ излучения на электрофизические характеристики диодных структур с барьером Шоттки Au-Ti-GaAs // Материалы VI Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом». –Минск, 28-30- сентября, 2005. –С. 375-377.

27. Исмаилов К.А., Камалов А.Б., Насыров М.У. Влияние гамма радиации ^{60}Co на изменение радиуса кривизны и электрофизические параметры ПБС Cr-GaP // Материалы международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников». – Андижан, 20-21 декабря, 2005. –С. 36-37.
28. Камалов А.Б. Влияние термообработки на электрофизические свойства силовых диодов Шоттки Au-TiVx-GaAs // Тезисы V Международной конференции «Актуальные проблемы физики полупроводников» – Дрогобичь, 27-30 июня, 2005. –С. 187-188.

РЕЗЮМЕ

диссертации Камалова Амангелди Базарбаевича на тему: «Физические основы контактов металл-GaAs (GaP, InP), сформированных чистыми металлами и аморфными пленками TiB_x » на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников

Ключевые слова: пористая подложка InP, эпитаксиальные структуры, диод Ганна, омический и барьерные контакты, аморфные пленки, Оже-спектроскопия, атомно-силовая микроскопия.

Объект исследования: являются приборные структуры с барьером Шоттки на основе GaAs (GaP, InP), предметом исследования выбраны процесс изменения параметров контактов металл- A^3B^5 , сформированных чистыми металлами и аморфными пленками TiB_x под воздействием гамма-радиации ^{60}Co , СВЧ излучении и быстрой термической обработки.

Цель работы: выяснение механизмов повышения воспроизводимости и стабилизации параметров приборных структур на основе GaAs, GaP и InP с барьером Шоттки, сформированным аморфными пленками TiB_x .

Методы исследования: Оже-электронная спектроскопия в сочетании с ионным травлением (Ar^+ , $E_n=1$ кэВ), рентгеноструктурный анализ, атомно-силовая микроскопия. Облучение гамма квантами ^{60}Co проводилось на установке МРХ- γ -25М, а СВЧ обработка магнетронным излучением на частоте $f=2,45$ ГГц с плотностью выходной мощности $1,5$ Вт/см². Вольтамперные характеристики исследовались на стандартизированных автоматизированных характеристографах.

Полученные результаты и их новизна: проведен анализ механизмов формирования механических напряжений в пленках и структурах контактов к A^3B^5 , которые позволяют выявить закономерности влияния технологических факторов на механические напряжения в структурах контактов. Разработаны физико-технологические основы формирования контактов к A^3B^5 включающие быструю термообработку, позволяющие контролировать параметры контактов путем влияния на процессы фазообразования и параметры границы раздела. Разработан новый технологический подход к изготовлению автоэпитаксиальных пленок InP n -типа, выращиваемых методом жидкофазной эпитаксии на пористых подложках p^+ -InP и омических и барьерных контактов к ним с использованием аморфных фаз внедрения TiB_x .

Практическая значимость: полученные данные по стойкости к внешним воздействиям полупроводниковых приборных структур с барьером Шоттки на основе A^3B^5 могут быть применены при создании полупроводниковых приборных структур с барьером Шоттки на основе A^3B^5 .

Степень внедрения и экономический эффект: результаты исследований использованы в научно-исследовательских работах и опытно-конструкторских разработках в Научно-исследовательском институте «ОРИОН» при разработке и изготовлении СВЧ диодов с барьером Шоттки.

Область применения: твердотельная СВЧ электроника, полупроводниковое приборостроение, технология микроволновых полупроводниковых приборов.

Физика-математика фанлари доктори илмий даражасига талабгор Камалов Амангелди Базарбаевичнинг 01.04.10-Яримўтказгичлар физикаси ихтисослиги бўйича “Ташқи кучларнинг тоза металллар ва TiB_x аморф плёнкалари билан шаклланган металл- A^3B^5 контактлари хоссаларига таъсирини тадқиқ қилиш” мавзусидаги диссертациянинг

РЕЗЮМЕСИ

Таянч сўзлар: InP ғовак тўшамаси, эпитаксиал тузилмалар, Ганн диоди, омик ва ғовли контактлар, аморф плёнкалар, Оже-спектроскопия, атом-куч микроскопияси.

Тадқиқот объектлари: ^{60}Co гамма–радиация, ЎЮЧ–нурланиш ва тезкор термик ишлов таъсирида тоза металллар ва TiB_x аморф плёнкалар билан шаклланган металл- A^3B^5 контакт параметрлари ўзгариши жараёни. Тадқиқот предмети сифатида тоза металллар ва TiB_x аморф плёнкалар билан шаклланган Шоттка ғовили GaAs, (GaP, InP) асосидаги қурилма тузилмалари олинди.

Ишнинг мақсади: Диссертация ишининг мақсади ташқи кучларнинг тоза металллар ва киритиш фазалари билан шаклланган Шоттка ғовили асенидгаллий, фосфидгаллий, ва фосфиндий қурилма тузилмаларига таъсирини ўрганиш.

Тадқиқот услублари: Тажрибавий тадқиқотлар қатор стандартлашган, автоматлашган услублардан A^3B^5 асосидаги Шоттка ғовили яримўтказгич қурилмаларнинг электрофизик ва тузилиш хоссаларни ўрганишда фойдаланган ҳолда олиб борилди. Фазалараро таъсирларни ўрганишда Оже электрон спектроскопия, рентгенструктуравий таҳлил, атом кучли микроскопия (АКМ) усулларида фойдаланилди.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги: A^3B^5 контакт тузилмалари ва плёнкаларда технологик омилларнинг контакт тузилмаларида механик кучланишларга таъсири қонуниятларини очиқ беришга имкон берувчи механик кучланишларнинг шаклланиши механизми таҳлили олиб борилди. Фаза ҳосил қилиш ва бўлиниш чегараси параметрларига таъсир орқали контактларнинг параметрларини назорат қилишга имкон берувчи тезкор ҳарорат ишлови бериш асосида A^3B^5 контактлари шаклланиши физик-технологик асослари ишлаб чиқилди. n^+ -InP ғовакли тўшамаларида суяқ фазали эпитаксия усули билан етилтириладиган n-туридаги InP эпитаксиал плёнкаларини ҳамда TiB_x киритиш аморф фазасини қўллаган ҳолда улар учун омик ва ғовли контактлар тайёрлашга янги технологик ёндашув ишлаб чиқилди.

Амалий аҳамияти: A^3B^5 асосидаги яримўтказгич қурилма тузилмаларининг ташқи таъсирларга барқарорлигини ўрганиш бўйича олинган натижалар A^3B^5 асосидаги яримўтказгич қурилма тузилмаларини яратишда қўлланилиши мумкин.

Татбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги: тадқиқот натижалари илмий–тадқиқот ишларида ва тажриба конструкторлик амалиётларида “ОРИОН” илмий–тадқиқот институтида Шоттка ғовили ЎЮЧ диодлар ишлаб чиқишда ва тайёрлашда қўлланилган.

Қўлланиш соҳаси: Қаттиқ жинсли ЎЮЧ электроника, яримўтказгич қурилмалар тайёрлаш, микротўлқинли яримўтказгич қурилмалар тиехнологияси.

RESUME

Thesis of Kamalov Amangeldi Bazarbayevich on the scientific degree competition of the doctor of sciences in physic and mathematic sciences on specialty 01.04.10 - semiconductor physics subject: “Basic physics of contacts of metal-GaAs (GaP, InP), generated by fine metals and amorphous films TiB_x ”

Key words: InP`s porous bottom layer, epitaxial structures, Gunn diode, ohmic and barrier contacts, amorphous films, Auger spectroscopy, atomic-force microscopy.

Object of research: is instrumental structures with Schottky barrier on basis of GaAs (GaP, InP), as subject of research are selected transition process of the characteristic of metal металл- A^3B^5 , generated by fine metals and amorphous films TiB_x under the influence of ^{60}Co gamma-radiation, microwave radiation and rapid thermal treatment.

Purpose of work: clarifying the mechanism of reproducibility increasing and stabilization of instrumental structures on basis of GaAs, GaP and InP with Schottky barrier generated by amorphous films TiB_x .

Methods of research: auger-electron spectroscopy in aggregate with ion etching (Ar^+ , $E_n=1$ kiloelectronvolt), X-ray structural analysis, atomic-force microscopy. ^{60}Co gamma-quantum irradiation conducted on installation MPX- γ -25M, and microwave treatment with magnetron radiation on a frequency $f=2,45$ GHz with $1,5 \text{ Vt/sm}^2$ output power density. Voltage-current characteristic investigated on standardized automated curve tracers.

The results obtained and their novelty: conducted the analysis of the mechanism of mechanical stress on films and contact structures against the A^3B^5 , which allows clarify the regularity of processing factors` impact on mechanical stress of contact structures. Developed the physic-technological basis of contacts generating against A^3B^5 including rapid thermal treatment, which allows to control contact characteristic by the impact on phase formation process and interface characteristic. Developed the new technological approach to preparation of autoepitaxial films of InP n type, growing by the method of liquid-phase epitaxy on n^+ -InP porous bottom layer and ohmic and barrier contacts to them using the amorphous interstitial phase of TiB_x .

Practical value: findings on external action tolerance of the semiconductor instrumental structures with Schottky barrier on basis of A^3B^5 can be used in creating the semiconductor instrumental structures with Schottky barrier on basis of A^3B^5 .

Degree of embed and economic effectivity: findings of research are used in research scientific works and engineering developments in “ORION” research institution at developing and preparing microwave diode with Schottky barrier.

Field of application: solid-state microwave electronics, semiconductor instrument making, the technology of microwave semiconductor instruments.