

На правах
рукописи

Панютин Евгений Анатольевич

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ
ФОСФИДА ГАЛЛИЯ: ЭПИТАКСИАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ,
КОНЦЕПЦИЯ ЛЕГИРОВАНИЯ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2009

Работа выполнена в Физико-техническом институте
им. А.Ф. Иоффе РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
проф. Жилиев Юрий Васильевич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
проф. Константинов Олег Владиславович,
ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН;

доктор физико-математических наук,
проф. Пихтин Александр Николаевич,
СПбГЭТУ (ЛЭТИ).

Ведущая организация –
Санкт-Петербургский политехнический университет.

Защита состоится 22 октября 2009 г. в 12.30

на заседании диссертационного совета Д002.205.02
при Учреждении Российской академии наук
Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН
по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан 21 сентября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.205.02
доктор физико-математических наук

Л. М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Разработка и исследование электронных компонентов на основе фосфида галлия является одним из направлений обширной и разветвленной программы, нацеленной на создание элементной базы высокотемпературной электроники, т. е. такой электроники, которая была бы ориентирована на высокотемпературные применения.

Активизация подобных исследований, наблюдаемая в последнее время, обязана дальнейшему развитию таких разноплановых и несмежных областей современной техники, как аэрокосмические технологии и вопросы безопасности ядерных реакторов, глубинное бурение и гелиоэнергетика, мониторинг двигателей внутреннего сгорания и создание робототехнических устройств для работы в экстремальных условиях.

Возможные пути решения означенной проблемы, которые представляются перспективными в настоящее время, связываются либо с созданием вакуумных микросхем, либо основаны на дальнейших разработках в области технологии широкозонных материалов, таких как GaP, GaN, SiC, способных обеспечить работоспособность приборов, по крайней мере при $T \geq 300^\circ\text{C}$. Каждый из этих материалов, по-видимому, потенциально пригоден для достижения указанных целей, однако, в силу различных причин, связанных, например, со степенью «продвинутой» технологии или с экономической стороной проведения основных технологических процессов, тот или иной материал представляется оптимальным не только для своего температурного диапазона, но и для своей области использования.

Важнейшими предпосылками для освоения и дальнейшего развития соответствующих технологических аспектов фосфида галлия являются наличие развитой технологии получения подложек большой площади, относительно небольшие энергозатраты на проведение эпитаксиальных процессов и достаточный опыт в области приборов на основе технологически близкого GaAs. Все это позволяет считать фосфид галлия важным кандидатом на роль базового материала в технологии массового производства приборов

для таких применений, где условия можно квалифицировать как экстремальные, однако максимальная температура рабочей среды не превышает 400°C.

Кроме того, весьма привлекательные значения других основных электрофизических параметров материала (в частности, подвижности носителей GaP – 50-200 см²/В·с, критическое поле начала его ударной ионизации ~ 10⁶ В/см) обеспечивают дополнительные возможности для разработки конкурентоспособных приборов, что должно явиться дополнительным мотивом для дальнейшего продолжения исследований.

Целью настоящей работы было определение возможностей газофазной эпитаксии (ГФЭ) фосфида галлия как основы для создания элементной базы на рабочий диапазон до 400-500°C путем разработки и исследования ряда приборов с *p-n*-переходом, а также математического моделирования некоторых технологических аспектов их получения.

Объектом разработки и исследования являлись высокотемпературные диоды (выпрямительные, стабилизионные и эмиссионные), динисторы и полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом, а также высокотемпературные матрицы, содержащие элементарные полевые транзисторы; все приборы были изготовлены на базе многослойных GaP-*p-n*-структур, полученных методом ГФЭ.

Методом исследования было изучение и анализ электрофизических параметров приборных элементов и структур, а также компьютерное моделирование кинетики диффузионных процессов (в том числе в рамках концепции диффузии со сменой состояний), сопутствующих эпитаксиальному росту этих структур. Исследовались ВАХ и частотные характеристики приборов при различных температурах в диапазоне 25÷500°C; анализировалась взаимосвязь их выходных параметров с параметрами подложки, спецификой легирования и технологическими режимами соответствующего технологического процесса.

Метод разработки геометрических параметров транзисторов и транзисторных матриц – компьютерное 3D-моделирование.

Задачи исследования:

- развитие методов эпитаксиальной и постэпитаксиальной технологии фосфид-галлиевых структур применительно к получению высокотемпературных приборов, содержащих один или несколько *p-n*-переходов;
- предложение и исследование моделей (в том числе двумерных и нестационарных), адекватно описывающих элементарные механизмы массопереноса в процессе легирования GaP, способствующих установлению взаимосвязей между исходными технологическими факторами и выходными параметрами структур и приборов;
- исследование электрофизических характеристик полученных приборов, установление их взаимосвязи с параметрами соответствующих технологических режимов и выработка рекомендаций по оптимизации этих параметров;
- исследование влияния температуры в диапазоне от 25 до 500°C на основные характеристики полученных элементов и приборов.

Представляемые к защите научные положения

Положение 1 (о влиянии дислокации на фронт диффузии ионов цинка в фосфиде галлия).

Повышенная концентрация вакансий галлия V_{Ga} , сопутствующая формированию винтовой дислокации в процессе эпитаксиального роста цинксодержащей *p-n*-структуры, приводит к локальному аккумулярованию ионов цинка, что сопровождается образованием крупномасштабных концентрационных страт и деформированием поверхности *p-n*-перехода.

Положение 2 (о двухкомпонентном легировании *p*-слоя диода).

Дополнительное введение цинка в процессе легирования *p*-слоя *n-n⁰-p*-структуры (Mg – основная компонента) приводит к формированию *p-n*-переходов, обладающих высокой устойчивостью к работе в режиме лавинного пробоя в широком диапазоне токов; уменьшение доли Zn ведет к увеличению порогового напряжения без изменения значений тока утечки и его температурной зависимости.

Положение 3 (о возможности использования n^0 -слоя в качестве полуизолятора).

Функцию полуизолирующей подложки для полевого транзистора с p -каналом в температурном диапазоне до 400°C может выполнять n^0 -слой, причем толщина этого слоя w_{n^0} должна быть > 10 мкм.

Положение 4 (о бинарном легировании p -слоя многопереходных p - n -структур).

Дополнительное введение цинка в процессе легирования p -слоя n - p -структуры (Mg – основная компонента) приводит к сглаживанию геометрического микрорельефа p - n -переходов и снижению уровня технологических флуктуаций межпереходных расстояний.

Положение 5 (об эмиссии горячих электронов в вакуум).

Интегральный ток эмиссии электронов с периферии p - n -перехода наиболее резко зависит от двух параметров: плотности дислокаций в плоскости p - n -перехода и концентрации Zn-компонента в легировании p -слоя; эта зависимость не монотонная и в обоих случаях имеет максимум.

Основные результаты

1) Выявлена роль винтовых дислокаций с точки зрения их взаимодействия с акцепторным цинком в процессе роста слоя p -типа.

2) Предложена и исследована кинетическая модель диффузии цинка вблизи дислокации в процессе эпитаксиального роста GaP; установлена роль диффузии Zn в формировании свойств получаемых p - n -переходов.

3) Предложена и исследована модель двухкомпонентной (Mg и Zn) диффузии акцепторов в окрестности дислокации; продемонстрировано влияние дополнительного компонента (Zn) на свойства полученных p - n -переходов и многопереходных структур.

4) Предложено использование дополнительного фактора управления технологическим процессом – изменение соотношения концентраций Zn-Mg, предоставляющего новые возможности в варьировании свойств приборов.

5) Разработана поэтапная технология получения полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом, а также базовых матриц на их основе. Исследованы характеристики полученных приборов.

6) Разработана технология получения эффективных эмиттеров электронов в газоразрядную среду; предложено их использование для создания эффекта многоэлектронного иницирования сильноточного разряда; разработана конструкция защитного газоразрядного ограничителя тока; изготовлены макетные образцы и исследованы их характеристики.

7) Исследованы характеристики полученных приборов (диод, динистор, транзистор) в диапазоне температур $25 \div 400^\circ\text{C}$ (500°C).

Приоритет результатов

Представляемые к защите результаты исследований электрофизических свойств GaP-приборов, полученных методами газофазной эпитаксии и ориентированных на высокотемпературное применение, получены впервые.

Значение результатов

Исследование температурной зависимости обратной ветви ВАХ *p-n*-переходов для случаев различного легирования *p*-области совместно с последующим анализом позволило установить взаимосвязь между плотностью дислокаций подложки, температурой и временем роста *p*-слоя, с одной стороны, и необходимой толщиной буферного слоя – с другой.

Исследование характеристик макетных образцов на базе *p-n⁰-n*-структур с использованием Mg-легирования *p*-слоя продемонстрировало возможность получения относительно высоковольтных (> 300 В) высокотемпературных (до 500°C) выпрямительных диодов.

Использование бинарного Zn-Mg-легирования позволило получить *p-n*-структуры, обратное смещение которых приводит к развитию существенно более однородного лавинного пробоя, имеющего неразрушающий характер в широком диапазоне пороговых напряжений и токов пробоя. На основе этих структур были изготовлены высокотемпературные (до 500°C) стабилитроны с напряжением стабилизации, лежащим в диапазоне $12 \div 80$ В.

Обнаружение эмиссионного тока обратносмещенных *p-n*-переходов, достигающего заметной величины для структур с определенным соотношением Zn- и Mg-компонентов, дало возможность использовать такие структуры для многоэлектронного инициирования газового разряда. Разработка и изготовление соответствующих узлов инициирования позволило сократить время задержки начала развития пробоя в защитных газовых разрядниках в 4-5 раз (до величины 5-8 нс).

Анализ процессов коллективной миграции в неоднородных средах, сопровождающей легирование растущего слоя, позволил объяснить особенности микрорельефа GaP-*p-n*-переходов и качественные различия их свойств в зависимости от характера легирования.

Подход, основанный на использовании n^0 -слоя в качестве полуизолирующего, позволил осуществить разработку, получение и исследование высокотемпературных (до 400°C) полевых транзисторов с *p*-каналом и управляющим *p-n*-переходом.

Объем и структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения (всего 132 страницы) и содержит 37 рисунков; список литературы включает в себя 125 наименований.

Апробация работы:

Результаты работы докладывались на 7-й Всесоюзной конференции по процессам синтеза и роста полупроводниковых кристаллов и пленок (Новосибирск, 1986), Всесоюзной научно-технической конференции «Создание комплексов высоковольтной преобразовательной и сильноточной техники» (Москва, 1986), 4-й Всесоюзной конференции по физике газового разряда (Махачкала, 1987), Всесоюзной конференции по микроэлектронике (Звенигород, 1994), 2-й Российской конференции по физике полупроводников (Зеленогорск (СПб.), 1996), на 23-м международном конгрессе (3-ed Int. Symp. of Compound Semicond. St. Petersburg, Sept., 1996), на конференции “MRS meeting-99”.

Публикации:

По материалам диссертации опубликовано 14 работ (5 из которых в реферируемых изданиях).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ дано обоснование актуальности темы диссертации, определена цель и сформулированы задачи исследования, приведены основные результаты работы и выносимые на защиту научные положения.

ПЕРВАЯ ГЛАВА посвящена обзору литературы и постановке задач исследования.

В частности, в параграфе 1.1 приводятся краткие сведения, касающиеся истории открытия фосфида галлия и первых исследований, способствующих созданию технологии монокристаллического GaP.

В параграфе 1.2 дан обзор наиболее заметных работ экспериментального и теоретического характера, направленных на установление основных свойств GaP как полупроводникового материала.

Параграф 1.3 посвящен сравнительному анализу ряда эпитаксиальных методов, потенциально пригодных в качестве основы для создания широкого класса электронных приборов – от высоковольтных и сильноточных преобразователей до микросхем.

В параграфе 1.4 приводится краткое изложение (применительно к фосфиду галлия) принципов основного технологического процесса – газофазной эпитаксии в хлоридной системе, используемого в качестве базовой технологии, а также определяется класс структур, перспективных для получения приборов высокотемпературного применения.

В параграфе 1.5 излагаются некоторые данные, относящиеся к собственным дефектам и фоновым примесям, типичным для эпитаксиального GaP, получаемого хлоридным методом.

В параграфе 1.6 представлены основные концепции, объясняющие особенности диффузии ионов Zn и Mg в материалах A^3B^5 с учетом таких факторов, как зарядовое состояние иона и различный характер взаимодействия с собственными дефектами. В частности, рассматривается механизм миграции Mg с участием собственных межузельных атомов Ga, а также вводится представление диссоциативной диффузии ионов Zn.

Параграф 1.7 содержит сведения, относящиеся к структуре и методам получения высокотемпературных омических контактов.

В заключительном параграфе 1.8 представлен обзор опубликованных примеров GaP-приборов, полученных с использованием различных технологий (в основном это различные модификации эпитаксиального выращивания из жидкой фазы).

ГЛАВА 2 отражает в основном технологический аспект работы. В ней прослеживаются наиболее значимые этапы применяемого эпитаксиального процесса, приводится подробное описание установки и основных процедур, формулируются требования к исходным материалам и компонентам, излагаются некоторые специфические особенности получения многослойных *p-n*-структур и выявляются ограничения хлоридного метода. В этой же главе приведены результаты предварительного исследования некоторых морфологических и электрофизических параметров структур, наиболее важных в плане их дальнейшего использования как основы для получения высокотемпературных приборов.

Параграфы 2.1-2.3. Здесь дается общая характеристика хлоридного ГФЭ-процесса с точки зрения возможности получения многослойных *p-n*-структур в широком диапазоне параметров слоев – их толщины, уровня легирования, и последовательности выращивания. Приводятся основные реакции процесса, формулируются термодинамические условия, соответствующие режиму роста и режиму травления. В рамках концепций неравновесной термодинамики формулируется понятие об основных режимах роста (застройки поверхности) – диффузионных и кинетических. Приводятся данные относительно требований, предъявляемых к расходным материалам (подложки, источник фосфора, водород), используемым в хлоридном процессе.

В параграфах 2.4-2.5 дано описание и представлена блок-схема использованной технологической установки. Кроме того, на основе предварительных экспериментов и с учетом опыта технологии GaAs устанавливается – на качественном уровне – взаимосвязь между задаваемыми режимами – парциальным давлением трихлорида, температурным градиентом между зонами источника и роста и т. д., с одной стороны, и визуально

наблюдаемой морфологией получаемых слоев – с другой. Это дает дополнительные возможности для выработки предварительных рекомендаций, в частности, для установления температурного диапазона нагрева зоны расположения подложек (750-850°C) и задания расходов газопаровых компонентов, обеспечивающих скорость роста слоя в пределах 8-10 мкм/ч.

Параграф 2.6. Здесь излагаются общие представления относительно нижнего значения температуры кристаллизации, определяемого кинетическими соображениями; это позволяет отметить ряд некоторых специфических для GaP ограничений, накладываемых на способ и уровень легирования слоев, их толщины и их взаимную комбинацию. Эти ограничения связаны со временем пребывания сформированных в процессе роста *p-n*-переходов непосредственно в высокотемпературной фазе и возникают вследствие учета диффузионных процессов, сопутствующих эпитаксиальному росту и могущих привести к нежелательному изменению свойств *p-n*-перехода.

Параграф 2.7 посвящен технологии буферного слоя: отсутствие указанных ограничений для любого эпитаксиального слоя, который в процессе роста предшествовал бы *p-n*-переходу, делает целесообразным и особенно значимым создание специального (буферного) слоя, выращиваемого непосредственно на подложке. Основное его предназначение – предотвращение нежелательной диффузии примеси из подложки и улучшение морфологии застраиваемой поверхности, непосредственно предшествующей осаждению активных слоев приборной структуры.

Специальные исследования, направленные на выяснение позитивной роли буферного слоя применительно к газофазному процессу получения GaP и использующие в качестве критерия среднюю поверхностную плотность выходов винтовых дислокаций, позволили установить следующее. Для n^+ -слоев и n^0 -слоев, в процессе их роста до толщины 15-20 мкм, наблюдается сокращение (относительно подложки) плотности дислокаций на 1-2 порядка, т. е. до 10^4 - 10^5 см⁻², после чего дальнейшее снижение плотности практически прекращается. С учетом этого результата в большинстве последующих исследований приборные структуры

имели буферный слой указанной толщины в качестве обязательной компоненты.

В параграфе 2.8 приведено описание технологии получения термостойких контактов к слоям *n*- и *p*-типа (напыляемые контакты на базе систем Au/Ge-Au, Au/Zn-Au и Cr-Au). Здесь же обозначены некоторые факторы, наиболее резко влияющие на контактные свойства (способы подготовки поверхности слоев, особенности травления и обезжиривания, режимы последующей термообработки напыленных контактных пленок), а также предложены пути, способствующие уменьшению контактного сопротивления.

Параграф 2.9. Здесь приведены результаты измерений простейших электрофизических характеристик, и в первую очередь ВАХ для различных типов структур с *p-n*-переходом.

Наибольшее внимание было уделено исследованию параметров обратной ветви ВАХ и, в частности, зависимости обратного тока, как наиболее термочувствительного параметра, от различных технологических факторов, в том числе от исходной концентрации дислокаций на подложке и от характера легирования *p*-слоя. Анализ измерений обратного тока, проведенный на большом количестве образцов и для различных технологических сценариев, показал качественное различие вида обратных ветвей ВАХ (поведение в предпробойной области, характер пробоя, статистические распределения параметров ВАХ выборки образцов) в случаях Zn-легирования и Mg-легирования для большинства технологических режимов. Поскольку цинк и магний являются важнейшими (с точки зрения глубины залегания их уровней) акцепторными примесями, а также учитывая их явно неидентичное влияние на характеристики получаемых *p-n*-переходов, анализ природы подобного различия представляется актуальным с точки зрения отыскания дополнительных технологических возможностей для управления нелинейными свойствами *p-n*-перехода (в особенности при повышенной температуре).

Существование устойчиво наблюдаемой разницы между статистически средними значениями тока утечки для вариантов цинка и магния при варьировании большинства технологических режимов дает основание для проведения более тщательного анализа специфических особенностей легирования в процессе роста слоя,

которые могут быть напрямую связаны с различием в микромеханизмах миграции и диффузии соответствующих ионов.

Хотя процессы диффузии в объеме структуры и не являются доминирующими при формировании растущего p -слоя (легирование осуществляется путем внедрения примесных атомов в застраиваемую поверхность), тем не менее при наличии структурной неоднородности матрицы (в частности, обусловленной существованием ростовых дислокаций) сопутствующие процессы локальной диффузии внутри слоя могут приводить к значительному перераспределению изначально однородной – в среднем – концентрации акцептора и впоследствии отражаться на параметрах перехода.

В параграфе 2.10 представлены выводы, обобщающие полученные результаты.

ГЛАВА 3 включает в себя результаты компьютерного моделирования особенностей микрорельефа дефектно-примесной компоненты эпитаксиального слоя, появление которых обязано радиальному перераспределению концентрации акцептора вблизи ядра дислокации при температуре эпитаксии. Предлагается и анализируется несколько моделей, дополняющих друг друга (системы нелинейных уравнений, описывающих двух- и трех-компонентную диффузию для двух различных механизмов – диссоциативного (цинк) и «диффузии с вытеснением» (магний); в том числе решаются и двумерные нестационарные задачи с движущейся границей, соответствующие процессу роста). Основная цель моделирования – расчетно-теоретическая трактовка качественных различий в экспериментально наблюдаемых параметрах обратных ветвей ВАХ p - n -переходов в случаях различных вариантов p -легирования.

Во Введении дано обоснование и позиционирование методов вычислительного эксперимента в исследовательском процессе.

В параграфе 3.1 предлагается трактовка во многом ключевого для GaP-структур совокупного понятия неконтролируемой технологической неоднородности, а также выявляется взаимосвязь структурных нарушений решетки в виде дислокаций или иных макродефектов с аномалиями концентрации

акцепторной (как наиболее критичной) примеси, формирующими локальный микрорельеф реального *p-n*-перехода. Предполагается, что величина и характер этих аномалий могут кардинально различаться и непосредственно отражают особенности элементарных механизмов диффузии ансамбля ионов того или иного акцептора.

Параграф 3.2. Здесь проведен краткий сравнительный анализ некоторых моделей диффузии, имеющих место для A^3B^5 и отражающих специфику различных механизмов переноса, обсуждаемых в литературе. В порядке усложнения рассматриваются двух- и трехкомпонентные модели, модели диффузии с учетом зарядового состояния, затрагиваются вопросы особенностей комплексообразования. В частности, наибольшее внимание уделено концепции, использующей представление о миграции иона магния, контролируемой межузельным атомом галлия Ga_i , а для диффузии цинка – механизму, основанному на предположении о доминирующей роли малоподвижных вакансий галлия V_{Ga} , имеющих большую вероятность взаимодействия с межузельными ионами Zn_i .

В параграфе 3.3 намечен общий подход и сформулирована система уравнений, описывающая стационарные распределения концентраций этих дефектов V_{Ga} и Ga_i вблизи дислокации. Дислокация трактуется в рамках континуальных моделей и вводится в систему через функцию усредненного потенциала деформации, спадающего по мере удаления от ее оси по степенному закону; ее влияние проявляется в виде локального понижения энергии образования френкелевской пары и, соответственно, локального повышения (при температуре эпитаксии) интенсивности термогенерации точечных дефектов. Фактор неоднородности определяется как локальное превышение концентраций вакансий или межатомов в максимуме над их равновесными значениями вдали от дислокации в зависимости от понижения порога дефектообразования пары и соотношения диффузионной активности ее компонентов.

В параграфе 3.4 продемонстрировано, что стационарные распределения концентрации цинка, отражающие предрасположенность его ионов к пребыванию в двух состояниях и

возникающие в p -слое в окрестности дислокации как результат его диффузионного перераспределения, могут быть получены в ходе решения граничной задачи для системы уравнений баланса относительно ансамблей вакансий и этих двух типов ионов. Высокподвижные ионы межузельного цинка, взаимодействуя в процессе миграции с вакансиями и превращаясь в малоподвижные ионы замещения, являются своеобразным резервуаром, способствующим долговременному аккумулярованию цинка вакансиями, пребывающими в избытке в окрестности дислокации. В самосогласованном представлении задача формулируется в виде нелинейной системы из трех уравнений баланса относительно V_{Ga} , Zn_i , Zn_s .

Решение граничной задачи для этой системы показывает, что заполнение вакансий приводит к формированию резко неоднородных (стратифицированных) профилей с максимумом для Zn_s и более пологих распределений, имеющих слабый провал на оси дислокации, для Zn_i . В итоге оказывается, что концентрационные распределения цинка как акцептора, т. е. суммарные распределения $Zn_i + Zn_s$ вблизи дислокации также имеют максимум, причем степень их неоднородности, обуславливаемая наличием значительной разницы коэффициентов диффузии составляющих, определяется, в том числе, и характером локальных профилей концентрации V_{Ga} .

Параграф 3.5 дает более глубокое и детальное понимание аномалий концентрации акцептора, которые появляются вблизи дислокации в процессе роста p - n -переходов; в нем приведено распространение рассмотренных одномерных (поперечных к направлению роста) моделей на двумерный (z , r) и, далее, на нестационарный (z , r ; t) случай, описывающий эволюцию внутренних диффузионных потоков.

Процесс диффузии цинка в окрестности дислокации, присутствие которой проявляется в этом случае в виде формирования облака вакансий галлия с максимумом на ее оси, может быть описан в виде уравнений, связывающих изменения концентрации V_{Ga} и концентрации Zn_s , изначально имеющих однородные распределения. Учитывая относительно пологий характер функций концентрации Zn_i , это распределение можно

считать однородным и заданным; такое приближение дает возможность ограничиться системой двух уравнений диффузии, учитывающих, как и прежде, помимо процессов переноса и рекомбинации, также термовыбросы ионов цинка из состояний замещения.

Индивидуализация многослойной эпитаксиальной структуры, определяемая соотношением толщин и технологически задаваемых (усредненных) концентраций легирующей или фоновой примеси, а также порядком следования слоев, вводится в систему уравнений через переменные граничные условия (налагаемые на величины потоков), задаваемые на границе, совпадающей с растущей поверхностью.

С практической точки зрения представляет интерес получение двух различных семейств кривых: распределений градиентов концентраций акцепторов (и доноров) вблизи непосредственной (искривленной) поверхности перехода и пространственных профилей непосредственно переходов (их положений как функции продольной координаты). Оценка локальной деформации положения поверхности перехода, вызванной присутствием дислокации (через возникновение концентрационных особенностей акцептора для рассмотренных механизмов диффузии), позволяет делать обоснованные выводы относительно допустимой близости двух последовательно выращиваемых переходов (что в дальнейшем было использовано при получении динисторной структуры).

Параграф 3.6. Аналогичный подход может быть применен и для оценки поперечного диффузионного перераспределения магния. Сходная процедура, состоящая в получении численных решений граничной задачи для системы уравнений относительно концентраций собственных межатомов Ga_i и мигрирующих ионов магния, позволяет получить стационарные состояния для концентрации ионов Mg. Полученные профили оказались не только менее резкими, но и имеющими «обратную кривизну», т. е., в окрестности дислокаций наблюдаются концентрационные «провалы». На основе этих данных можно получить распределения концентраций акцептора для случая двухкомпонентного цинк-магниевого легирования. Изменение взаимного соотношения этих

компонентов позволяет управлять не только «усредненной степенью неоднородности» суммарной концентрации такого бинарного акцептора, но и характером микрорельефа переходов.

Предполагается, что использование комбинированного Mg-Zn-легирования *p*-слоя может послужить дополнительным фактором управления свойствами и параметрами ВАХ *p-n*-перехода (и в первую очередь свойствами ее обратной ветви).

В параграфе 3.7 сформулированы выводы.

В ГЛАВЕ 4 представлены результаты разработок ряда фосфид-галлиевых приборов, основное предназначение которых – работа в температурном диапазоне до 400-500°C. Макетные образцы приборов были произведены на базе GaP-структур, сходных с теми, которые уже рассматривались в главе 2 в качестве объектов предварительных экспериментов, однако далее доработанных с учетом идеологии, развитой в главе 3. Здесь же приводятся результаты исследований основных характеристик приборов – диодов, диодисторов, транзисторов – в широком диапазоне температур. Технология получения конкретного прибора, включающая в себя цепочку постэпитаксиальных операций, наиболее детально описана на примере полевых транзисторов и транзисторных матриц. В качестве дополнительного приложения GaP-структур представлены результаты разработки эмиттера горячих электронов, интегрированного в высокоточный газоразрядный прибор (малоинерционный защитный разрядник) и способствующего, путем обеспечения многоэлектронного инициирования начала разряда, уменьшению его времени переключения.

В параграфе 4.1 изложены общие методические вопросы высокотемпературных измерений, представлена схема измерительной установки, включающей в себя нагреваемую камеру со специальным держателем и контролем температуры, а также комплекс измерительных приборов, позволяющий получать вольт-амперные, частотные и импульсные характеристики.

В параграфе 4.2 представлены выпрямительные диоды, для которых в качестве основы применялись *n-n⁰-p*-структуры с Mg-легированным *p*-слоем, были получены в меза-исполнении с

диаметрами единичного диода 0.8 мм и 1.2 мм. Вольт-амперные характеристики, снятые в широком диапазоне температур, показали работоспособность диодов, по крайней мере, до 500°C. Значение коэффициента выпрямления k при этой температуре превышало 100 (для 400°C коэффициент $k > 1000$), причем возрастание обратного тока, наблюдаемое при увеличении температуры начиная от 25°C, составило два порядка. Допустимое обратное напряжение, в зависимости от толщины n^0 -слоя, лежало в пределах 20÷300 В и не уменьшалось с температурой. Предельные рабочие частоты диодов (определяемые через их коэффициенты выпрямления) находятся в мегагерцовом диапазоне и уменьшаются с ростом температуры от значений 45-50 МГц до 10 МГц. При 400°C диоды демонстрировали подобные характеристики в течение 24 ч без видимых изменений.

Параграф 4.3. Здесь рассмотрены особенности работы высокотемпературного стабилитрона. Технологические условия, приводящие к повышению стабильности развития неразрушающего лавинного пробоя (включая также и режим постоянного тока) при напряжениях стабилизации для различных структур в диапазоне от 15 до 80 В, трактуются в рамках формирования концентрационных профилей специального вида, создаваемых в результате совместного Mg-Zn-легирования. Кроме того, исследования температурного поведения обратной ветви ВАХ до 500°C позволяют сделать вывод о том, что повышение температуры служит дополнительным фактором стабилизации лавинного пробоя.

В параграфе 4.4 дано описание структуры, изложены особенности технологии и для диапазона 25÷400°C представлены ВАХ диносторов, которые переключались, в зависимости от температуры, при напряжениях 15-40 В за время 150-200 нс. Меньшие (по сравнению с диодами) значения предельных рабочих температур связаны не с деградиационными изменениями ионной подсистемы, а с увеличением обратного тока, достигающего критических значений при напряжениях, близких к остаточному.

В параграфе 4.5 рассматриваются возможные конструктивные решения и геометрические варианты полевого транзистора, а также дается обоснование – с учетом специфических особенностей и ограничений ГФЭ-процесса – для выбора предпочтительной базовой (многослойной эпитаксиальной)

структуры. Далее приводится детальное описание технологического цикла создания *p*-канального транзистора нормально открытого типа (включая все литографические операции, получение омических контактов и создание изолирующего SiO₂-слоя), а также приведены некоторые данные относительно особенностей жидкостного травления GaP. Здесь же рассматриваются ограничения, накладываемые литографическим процессом – а также другими постэпитаксиальными операциями – на геометрические параметры транзистора.

В параграфе 4.6 приводятся экспериментальные результаты исследования вольт-амперных характеристик транзисторов в температурном диапазоне 25÷400°С. Обсуждаются вопросы, связанные с разбросом параметров характеристик единичных приборов, получаемых в пределах одной подложки и одного технологического цикла. Дается объяснение ряду специфических особенностей ВАХ. Анализируются причины возникновения дополнительных ограничений температурного диапазона для случая полевого транзистора. Кроме того, анализируются проблема наличия микронеоднородности в активной зоне транзистора, ее технологические источники и возможные проявления в характеристиках прибора.

В параграфе 4.7 формулируются дополнительные проблемы и ограничения, возникающие при получении однокристалльных транзисторных матриц, приводится их конструкция и излагается ряд вопросов технологии их получения.

В параграфе 4.8 представлены экспериментальные исследования эмиссионного тока из периферии эмиттерных структур в газ (режим постоянного тока). Здесь же приводится описание конструкции сильноточного защитного разрядника со встроенным узлом инициирования на основе GaP-эмиттера, кратко излагается технология его изготовления, а также излагаются вопросы методики и экспериментальной техники, обеспечивающей необходимое временное разрешение наблюдения кинетики разряда. В заключение приводятся результаты исследований уменьшения задержки развития газового пробоя, обеспечивающего быстрое переключение разрядника.

В параграфе 4.9 приведены выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная цель диссертационной работы – разработка ряда фосфид-галлиевых приборов, предназначенных для работы в температурном диапазоне до 400°C, исследование их наиболее термочувствительных электрофизических параметров, выявление взаимосвязей между этими параметрами и технологическими режимами эпитаксии, а также выработка обоснованных рекомендаций для улучшения некоторых из этих параметров с точки зрения последующего практического использования подобных приборов.

Достижению этой цели способствовали проведенные исследования и разработки, основные результаты которых могли бы быть сформулированы следующим образом:

- развиты модельные представления, учитывающие специфические особенности диффузии цинка и магния в слое GaP в процессе эпитаксии, и выявлено значение этой специфики для процессов формирования микропрофиля *p-n*-перехода;
- исследованы важнейшие характеристики и параметры ряда приборов, образующих функционально замкнутую систему: выпрямительного диода, полевого транзистора, динистора.
- разработаны и исследованы новые для фосфида галлия приборы: стабилитроны, эмиттеры горячих электронов в газоразрядную среду, матрицы на основе полевых транзисторов;
- продемонстрирована возможность использования нелегированного *n*⁰-слоя в качестве полуизолирующего слоя *p*-канального транзистора для работы в диапазоне до 400°C;
- было показано, что структурная однородность GaP-слоев, обеспечиваемая хлоридным процессом, и связанная с ней однородность основных электрофизических параметров, достаточны для получения на их основе микросхем средней степени интеграции.

Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

[1] Жилиев Ю. В., Куликов А. Ю., Панютин Е. А., Сералиев Т. А., Челноков В. Е., Шамрай В. Б. Высокотемпературные диоды на фосфиде галлия. Сб. ст. «Силовые полупроводниковые приборы», Таллин, «Валгус», 1986, с. 263–266.

[2] Жилиев Ю. В., Криволапчук В. В., Куликов А. Ю., Панютин Е. А., Сералиев Т. А. Исследование ВАХ фосфидгаллиевых силовых диодов. Всесоюзная научно-техническая конференция «Создание комплексов высоковольтной преобразовательной и сильноточной техники» (Москва, 25–27 ноября 1986). М., 1986, с. 69–70.

[3] Жилиев Ю. В., Криволапчук В. В., Панютин Е. А., Сералиев Т. А. Исследование параметров высокотемпературных стабилитронов. Всесоюзная научно-техническая конференция «Создание комплексов высоковольтной преобразовательной и сильноточной техники» (Москва, 25–27 ноября 1986). М., 1986, с. 70–71.

[4] Жилиев Ю. В., Криволапчук В. В., Куликов А. Ю., Панютин Е. А. Оптическая диагностика особо чистых слоев фосфида галлия. 7-я Всесоюзная конференция по процессам синтеза и роста полупроводниковых кристаллов и пленок (Новосибирск, июнь, 1986). Новосибирск, 1986.

[5] Тухас В. А., Хромой Ю. Д., Панютин Е. А., Жилиев Ю. В. Особенности пробоя газа при многоэлектронном иницировании с использованием GaP-эмиттеров. 4-я Всесоюзная конференция по физике газового разряда (Махачкала, сентябрь 1987). Махачкала, 1987.

[6] Жилиев Ю. В., Панютин Е. А. Локализация фронта включенного состояния тиристора. Сб. ст. «Силовые полупроводниковые приборы», Таллин, 1986.

- [7] Жилияев Ю. В., Панютин Е. А., Федоров Л. М. Высоко-температурные фосфид-галлиевые полевые транзисторы. Письма в ЖТФ **20**, июнь, 1994, с. 26–31.
- [8] Жилияев Ю. В., Панютин Е. А., Федоров Л. М. Матричные кристаллы на основе фосфида галлия для высокотемпературных применений. Всесоюзная конференция по микроэлектронике. (Звенигород, ноябрь, 1994). М., 1994.
- [9] Zhilyaev Yu. V., Panyutin E. A., Fedorov L. M. GaP-Devices for high temperature applications // in “23ed Int. Symp. of Compound Semicond”, St. Pet., Sempt. / 23–27, 1996.
- [10] Жилияев Ю. В., Панютин Е. А., Федоров Л. М. GaP-матрицы полевых транзисторов для высокотемпературных применений. 2-я Российская конференция по физике полупроводников (Зеленогорск (СПб.), февраль, 1996). СПб., 1996.
- [11] Zhilyaev Yu. V., Panyutin E. A., Fedorov L. M. GaP-Devices for high temperature applications // in “MRS meeting-99”, Nov. 29 – Dec. 3, Boston-Massachusetts, 1999, p. 413.
- [12] Жилияев Ю. В., Панютин Е. А., Федоров Л. М. Двух-компонентное акцепторное легирование эпитаксиального фосфида галлия и его использование в приборах высокотемпературной электроники. Письма в ЖТФ В **2**, 2008, с. 81–86.
- [13] Панютин Е. А. Легирование структурно-неоднородных эпитаксиальных слоев фосфида галлия. Диффузионное перераспределение цинка. Письма в ЖТФ В **13**, 2009, с. 33–40.
- [14] Жилияев Ю. В., Панютин Е. А., Федоров Л. М. Высоко-температурные диоды на основе фосфида галлия. Письма в ЖТФ В **17**, 2009, с. 50–57.