

На правах рукописи



Харламов Николай Александрович

**ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛУЧЕНИЕ И ВОЗМОЖНОСТЬ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЛОЕВ ТВЕРДОГО РАСТВОРА НА ОСНОВЕ
 $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ НА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ**

Специальность 05.27.06

«Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и
приборов электронной техники»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2015

Работа выполнена на кафедре «Технологии материалов электроники» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Научный руководитель: Кузнецов Геннадий Дмитриевич

доктор технических наук, профессор НИТУ «МИСиС»

Официальные оппоненты: Киреев Валерий Юрьевич

доктор технических наук, советник директора

ФГУП «НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина»

Рыжук Роман Валерьевич

кандидат технических наук, старший научный

сотрудник Национального исследовательского

ядерного университета «МИФИ»

Ведущая организация: ОАО «Научно-исследовательский институт

техники им. С.А. Векшинского»

Защита диссертации состоится «25» июня 2015 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.132.06 в ФГОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, Москва, Крымский вал, д. 3, ауд. К-212.

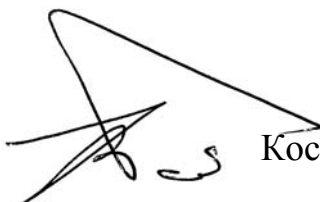
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» и на сайте НИТУ «МИСиС» по адресу:

<http://misis.ru/science/aspirantura/avtoreferaty-dissertacij>

Автореферат разослан «____» мая 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Доктор физико-математических наук, доцент



Костишин В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время ведутся поиски путей существенного расширения возможности практического применения широкозонных полупроводников на основе карбида кремния (SiC) и его твердых растворов для повышения эффективности энергосбережения при исследовании и использовании силовых и оптоэлектронных устройств. Наиболее перспективным материалом на основе карбида кремния считаются твердые растворы $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$. В зависимости от состава твердого раствора могут быть созданы высокоэффективные устройства как силовой, так и оптоэлектроники. Благодаря уникальным свойствам карбида кремния, нитрида алюминия и их твердых растворов приборы на их основе имеют ряд преимуществ перед традиционными кремниевыми и нитридгалиевыми аналогами. Это касается, прежде всего, возможности использования их при повышенных температурах, уровнях радиации и в химически агрессивных средах.

Для силовых приборов это обеспечивает значительное снижение сопротивления в открытом состоянии и, следовательно, увеличение удельной мощности. Высокая теплопроводность (на уровне меди при комнатной температуре) позволяет использовать меньшие по размерам кристаллы, что делает эти приборы на основе p-n переходов (диоды, транзисторы и т.п.) перспективными для экстремальной электроники.

Для оптоэлектронных приборов применение твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ обеспечивает создание высокоэффективных устройств светодиодов с широким спектром излучения, в том числе в ультрафиолетовой области с длиной волны в максимуме спектра от 350 нм до, по крайней мере, 220 нм. Актуальной задачей является замена газоразрядных источников излучения (к примеру, ртутных и дейтериевых ламп) на твердотельные источники. Решаются практически важные задачи в спектрофотометрии, медицине, анализе состава газовых и жидких сред, оптической связи в космосе и ряде других областей.

Специфические трудности выращивания гетероэпитаксиальных пленок возникают при выборе подложки, технологии её изготовления и подготовки к процессу выращивания плёнки и это является одной из наиболее актуальных проблем в технологии приборов с использованием широкозонных полупроводников. В качестве подложек для эпитаксиальных структур используют сапфир, гексагональный карбид кремния, нитрид галлия и нитрид алюминия. Близкими к идеальным являются подложки из нитрида алюминия или нитрида галлия, но их массовое производство отсутствует. Использование подложек из сапфира и карбида кремния в промышленном производстве осложняется из-за их высокой себестоимости.

Получение совершенных пленок требует и создание технологии обработки поверхности, приближающуюся по конечному результату к атомарно гладкому состоянию. При использовании подложек с недостаточно гладкой поверхностью наблюдается объёмный рост, сопровождающейся поликристаллическостью и большой дислокационной плотностью слоёв. Технологические приемы, обеспечивающие выращивание структурно совершенных пленок, является наименее разработанной стадией технологии.

В качестве таких подложек могут выступать «темплейты» - тонкие монокристаллические пленки твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$, нанесенные в качестве буферного слоя на монокристаллический кремний. Технология выращивания монокристаллов кремния, резки пластин кремния и их травления хорошо освоены мировой электронной промышленностью. Именно поэтому проблема выращивания эпитаксиальных слоев твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ на кремнии является одной из важных задач современной полупроводниковой технологии.

Перспективные полупроводниковые приборы, создаваемые на основе твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$, - это в первую очередь многослойные гетерокомпозиции с точно заданными составом, структурой и электрофизическими параметрами. При этом необходимо иметь возможность получения структуры с четкими границами слоёв. Существующие на сегодняшний период основные

методы получения пленок твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ – сублимация и жидкофазная эпитаксия - имеют ряд существенных недостатков. Для сублимационного метода характерны такие недостатки как весьма высокая температура процесса (более 2000 °C), относительно низкая воспроизводимость состава твердого раствора. Метод жидкофазной эпитаксии имеет присущие ему недостатки, включая значительную трудность в подборе легирующей примеси, управление степенью легирования и геометрическими параметрами растущего слоя (толщина, равномерность).

Произведенный анализ опубликованных в последнее время работ позволяет рассматривать метод ионного распыления мишеней нужного состава для формирования слоев твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ как для создания дешевых и качественных подложек (темплейтов), так и для создания гетероструктур для оптоэлектронных и силовых приборов. Необходимо отметить, что с применением ионно-плазменных процессов достигаются следующие результаты:

- ионная очистка исходной подложки перед эпитаксией;
- ионная полировка поверхности подложки перед эпитаксией, достигающая выше, чем 14 класс шероховатости;
- получение эпитаксиального, в том числе наноразмерного слоя твердого раствора заданного состава с контролируемой скоростью;
- получение омического контакта к полученной структуре;
- возможность обеспечения непрерывного и неразрушающего контроля состава поверхности за счет регистрации интегрального сигнала вторичных электронов, возникающий при ионном воздействии на поверхность.

Все процессы реализуются в вакууме без его разрыва, то есть в едином технологическом цикле. Используется стандартное вакуумное оборудование, широко применяемое в электронике, включая различного типа ионные источники с энергией ионов до 5 кэВ.

Целью настоящей работы является физико-технологическое обоснование возможности получения гетероструктур на основе кристаллоориентирован-

ных наноразмерных слоев твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ на монокристаллической подложке кремния с применением ионно-плазменных процессов.

В соответствии с целью диссертационной работы при проведении теоретических и экспериментальных исследований решались следующие задачи:

- установление кинетики низкотемпературного получения наноразмерных слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ магнетронным распылением мишени;
- получение кристаллориентированных слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ на монокристаллическом кремнии с применением принципов эпитаксии и эндотаксии при магнетронном распылении мишени;
- исследование структурных и электрофизических параметров гетерокомпозиции $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x/\text{Si}$;
- выявление особенностей механизма магнетронного распыления однородной компактной мишени и обоснование физико-химической модели образования слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ при низкой температуре;
- обоснование применения гетерокомпозиций (темплейтов) $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x/\text{Si}$ для диодных и оптоэлектронных устройств.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- показана возможность формирования монокристаллических слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{0,7}(\text{AlN})_{0,3}$ и $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}$ толщиной до 100 нм на монокристаллической кремниевой подложке с ориентацией (111) при температуре 800-1000 °С магнетронным распылением однородной компактной мишени со скоростью до 0,1 нм/с;
- установлена возможность использования принципов эндотаксии для получения монокристаллических слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{0,7}(\text{AlN})_{0,3}$ и $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}$ толщиной до 60 нм на монокристаллическом кремнии с ориентацией (111) при температуре отжига микрокристаллического слоя 800-900 °С в течение 30-40 минут в атмосфере аргона;
- показана целесообразность использования кластерной модели магнетронного распыления твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ для прогнозирования кинетики роста слоя;

- проведено физико-химическое обоснование возможности получения непрерывного ряда твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ при низкой температуре с учетом межатомного взаимодействия при различном химическом составе;

- созданы модели светодиода с дальним ультрафиолетовым излучением и различным числом квантовых ям, фотодиода и диода Шоттки на основе твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$.

Практическая значимость работы:

- Разработан технологический процесс ионно-плазменного получения гетероструктур (темплейтов) монокристаллический кремний - монокристаллический наноразмерный слой твердого раствора $(\text{SiC})_{0,7}(\text{AlN})_{0,3}$ и $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}$ с применением магнетронного распыления однородной мишени аналогичного состава со скоростью до 0,1 нм/с при энергии ионов до 500 эВ, плотности ионного потока аргона до 8 мА/см² и температуре до 1000 °С;

- рекомендованы технологические режимы (температура, энергия ионов, плотность потока ионов, рабочая газовая среда) формирования как поли-, так и монокристаллических слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{0,7}(\text{AlN})_{0,3}$ и $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}$ толщиной до 100 нм на монокристаллическом кремнии. Для получения гетероструктуры (темплейта) монокристаллический кремний- монокристаллический слой твердого раствора может использоваться магнетронное распыление однородной компактной мишени как в условиях эпитаксии, так и эндотаксии;

- показана возможность использования разработанного технологического процесса для создания ультрафиолетовых светодиодов, фотодиодов и диодов Шоттки на основе твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$, в том числе на базе темплейтов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x/\text{Si}$.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Технологический процесс магнетронного распыления однородного многокомпонентного материала на основе твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ позволяет формировать наноразмерные слои состава, аналогичного составу мишени и с различной кристаллической структурой при температуре до 1000 °С;

- Магнетронное формирование твердого раствора с различной кристаллической структурой обеспечивает получение гетерокомпозиций (темплейтов) $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x/\text{Si}$ при использовании принципов эндотаксии и эпитаксии;

- Кластерная модель магнетронного распыления и модель изоморфного ионного замещения при формировании наноразмерных слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ позволяет обосновать выбор параметров технологического процесса, обеспечивающего заданную кинетику, структуру и свойства;

- Экспериментально и теоретически обоснована возможность создания электронных устройств на основе гетероструктур (темплейтов) монокристаллический кремний-твердый раствор $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$

Личный вклад Харламова Н.А. состоит в:

-поиске и анализе опубликованных результатов по теме диссертации;

-усовершенствовании узла расположения мишени, подложек и методики получения слоев, обеспечивающих стационарное проведение процесса магнетронного распыления компактной многокомпонентной мишени;

-проведении серии экспериментальных работ по магнетронному получению наноразмерных слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ и гетероструктур на его основе;

-анализе результатов использованных аналитических методов определения параметров слоев твердого раствора и гетероструктур;

-обосновании и уточнении физического кластерного механизма магнетронного распыления многокомпонентной мишени и получении дополнительных физико-химических доказательств изоморфного ионного замещения при низкотемпературном формировании слоя твердого раствора;

-проведении моделирования параметров электронных устройств на основе твердого раствора на монокристаллической подложке;

-обобщении полученных результатов, подготовке научных публикаций и представлении их на конференциях.

Апробация работы:

Основные теоретические и экспериментальные результаты диссертации отражены в работах, опубликованных в ведущих отечественных изданиях, в материалах докладов международных и всероссийских конференций и семинаров и докладывались на международной научно-технической конференции «Микро- нанотехнологии в электронике» (Приэльбрусье, Россия, 2009 г.), Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника» (Республика Дагестан, г. Махачкала, 2009 г.), X Юбилейной международной научной конференции "Химия твердого тела: наноматериалы, нанотехнологии" (Ставрополь, 2010г), IV Международной конференции по физике кристаллов «Кристаллофизика XXI века» (Москва, 2010 г.), III Международной научно-технической конференции "Микро- и нанотехнологии в электронике" (Нальчик, 2010 г.), II Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития полупроводниковой техники» (Республика Дагестан, г. Махачкала, 2012 г.), XI Международная научная конференция "Химия твердого тела: наноматериалы, нанотехнологии" (Ставрополь, 2012 г.), IX Международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», (Астрахань, 2012 г.), VI Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, 2014 г.).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 20 научных работ, в т. ч. 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК по специальности.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов и списка литературы. Объем диссертации составляет 141 страницу машинописного текста, включая 59 рисунков и 19 таблиц, и 1 приложения. Список цитируемой литературы состоит из 102 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы их цель и задачи. Отражены научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится анализ результатов опубликованных работ по теме диссертации. Рассмотрены кристаллографические и физико-химические свойства карбида кремния и нитрида алюминия, а также существующие на данный момент термодинамические модели образования их твердых растворов, зависимости основных параметров от состава.

Определены целесообразные области применения твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ и темплейтов. Показано, что исследования по разработке новых технологических процессов получения кристаллоориентированных слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ находятся в начальной стадии и отсутствуют сведения о возможности получения искусственных подложек (темплейтов) на основе монокристаллического кремния и твердых растворов в системе SiC-AlN. Это касается, прежде всего, установления возможностей ионно-плазменных процессов получения наноразмерных слоев многокомпонентных растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ с использованием однородной мишени заданного состава для магнетронного распыления. Практическая реализация ионно-плазменных процессов позволила бы продвинуться к решению задач по созданию электронных экономически целесообразных и энергоэффективных электронных устройств, работающих в экстремальных условиях эксплуатации.

Показано, что использование однородной компактной мишени твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ для магнетронного распыления требует установления кинетики распыления и получения слоев, особенностей получения необходимого состава и структуры многокомпонентных слоев. Необходимо определить и исследовать возможные подходы к формированию кристаллоориентированных, в том числе монокристаллических слоев и гетероструктур на монокристаллической кремниевой подложке. Получение результатов по электрофизическим па-

раметрам слоев твердого раствора и гетероструктур на их основе позволит определить возможность создания более целесообразных искусственных подложек (темплейтов) для электронных устройств.

Показана необходимость уточнения механизма как магнетронного распыления многокомпонентной однородной мишени, так и формирования слоев для прогнозирования кинетики и свойств.

Во второй главе рассматриваются основные критерии и факторы, влияющие на вероятность образования твердых растворов в системе SiC-AlN, включая различие свойств катионов и анионов, валентность, электроотрицательность, электронные конфигурации, температуру синтеза соединений, растворимость и диффузию в полупроводнике. Показано наличие рассогласования экспериментальных результатов по получению непрерывного ряда твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ во всем диапазоне «х» с существующей фазовой диаграммой состояния, предполагающей наличие твердого раствора выше температуры 2000 К и отсутствие растворимости ниже её. Рассматривается обоснование возможности образования твердых растворов в системе SiC-AlN и при более низких температурах и уточнение фазовой диаграммы этой системы.

Для уточнения модели образования твердых растворов в системе $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ произведены расчеты, основанные на классической теории смешения и методе Урусова-Хиенталы. Данный подход позволяет получить высокое согласование экспериментальных и теоретических результатов по оценке термодинамической устойчивости и растворимости элементов I-VI групп в гексагональных нитридах алюминия, галлия, индия бора и других элементах. Рассчитаны критическая температура, которая является важным параметром при анализе возможности существования твердых растворов, а также параметр взаимодействия, определяющий термодинамическую устойчивость твердых растворов. Параметр взаимодействия выражен в обобщенном виде как сумма деформационной, электростатической, структурной и вакансионной составляющих. Показано, что для системы SiC-AlN существенный вклад имеют только деформационная и электростатическая составляющие.

Выдвинута и подробно рассмотрена модель изоморфного ионного замещения атомов в системе SiC-AlN при их смешении, предполагающая, что замещение атомов кремния в подрешетке кремния возможно только на атомы алюминия и наоборот, и аналогично для подрешеток углерода и азота. Таким образом, согласно предложенной модели, в твердом растворе $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ не происходит попадания анионов в катионную решетку и наоборот. В данном случае существенно снижается значение как деформационной, так и электростатической составляющей. Значения параметра взаимодействия для системы $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ в приближении модели изоморфного ионного замещения в зависимости от состава позволили рассчитать на основе этих значений критическую температуру образования твердых растворов (рисунок 1). Достигнуто высокое согласование теоретических и экспериментальных результатов.

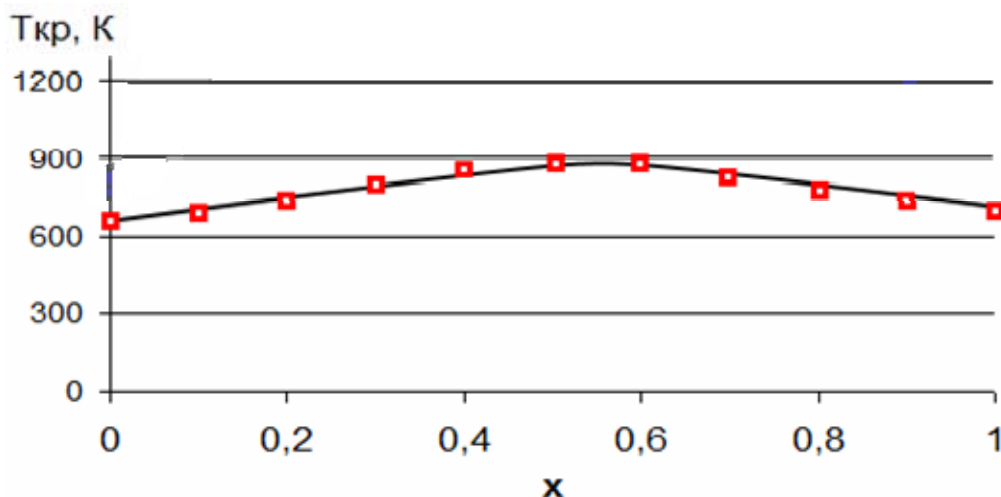


Рисунок 1 – Результаты расчета зависимости критической температуры от состава твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ по модели изоморфного ионного замещения

Рассмотрена возможность моделирования устройств на основе твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ в среде SimWindows. Данный программный продукт основан на весьма точных физических моделях в одномерном приближении. Созданы файлы материалов и электронных приборов (ультрафиолетовых светодиодов, фотодиодов и диодов Шоттки) на основе твердых растворов

$(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ на монокристаллической подложке и показана возможность прогнозирования свойств полупроводниковых гетерокомпозиций с использованием методики моделирования в среде SimWindows. Показан высокий уровень согласования модельных и экспериментальных результатов.

В третьей главе экспериментально показана возможность использования магнетронного распыления ионами Ar^+ однородной компактной мишени твердого раствора в системе SiC-AlN для получения наноразмерных слоев аналогичного состава в качестве альтернативы МОС-гидридной технологии, сублимации и жидкофазной эпитаксии.

Рассматриваются особенности кинетики роста пленок твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ при ионном распылении многокомпонентной мишени и возможности теоретического ее прогнозирования. Исследованы закономерности формирования слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$, рост слоя твердого раствора различного состава определяется энергией и плотностью потоков ионов при их варьировании в пределах 400-800 эВ и до 8 mA/cm^2 , соответственно.

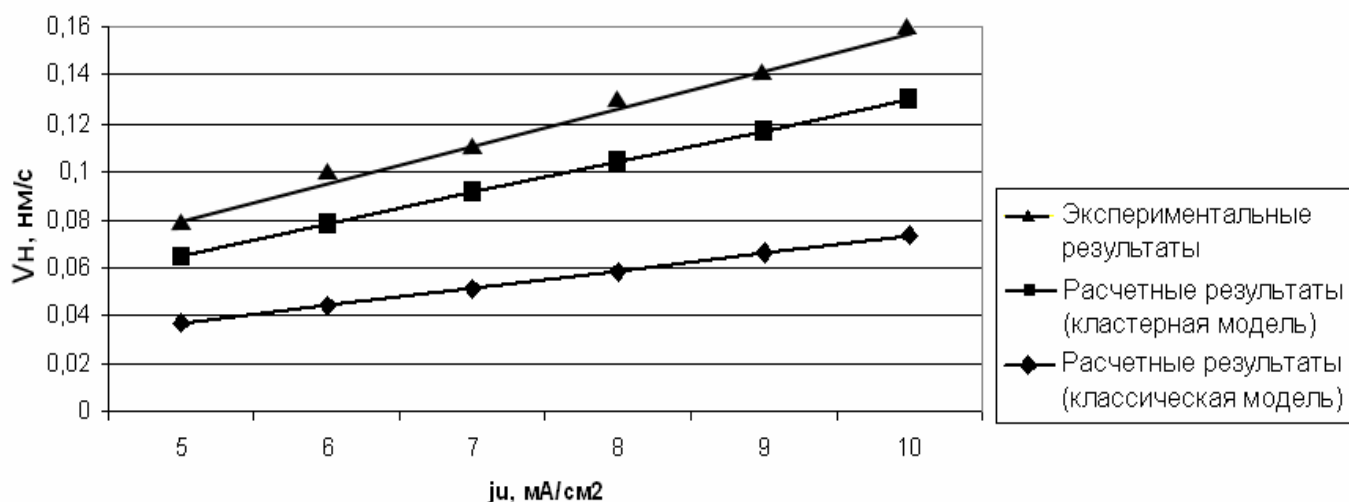


Рисунок 2 - Зависимость скорости получения пленок твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ ($V_{\text{н}}$) от плотности ионного тока ($j_{\text{и}}$). Энергия ионов составляла 500 эВ. Размер кластера для кластерной модели принимался равным 1,5 нм

Использовалось два подхода к расчетам – молекулярный и кластерный. Полученные экспериментальные результаты по кинетике нанесения пленок

твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ магнетронным распылением мишеней в потоке аргона показывают, что наибольшее согласование экспериментальных и расчетных данных может быть получено при использовании кластерной модели распыления (рисунки 2 и 3).

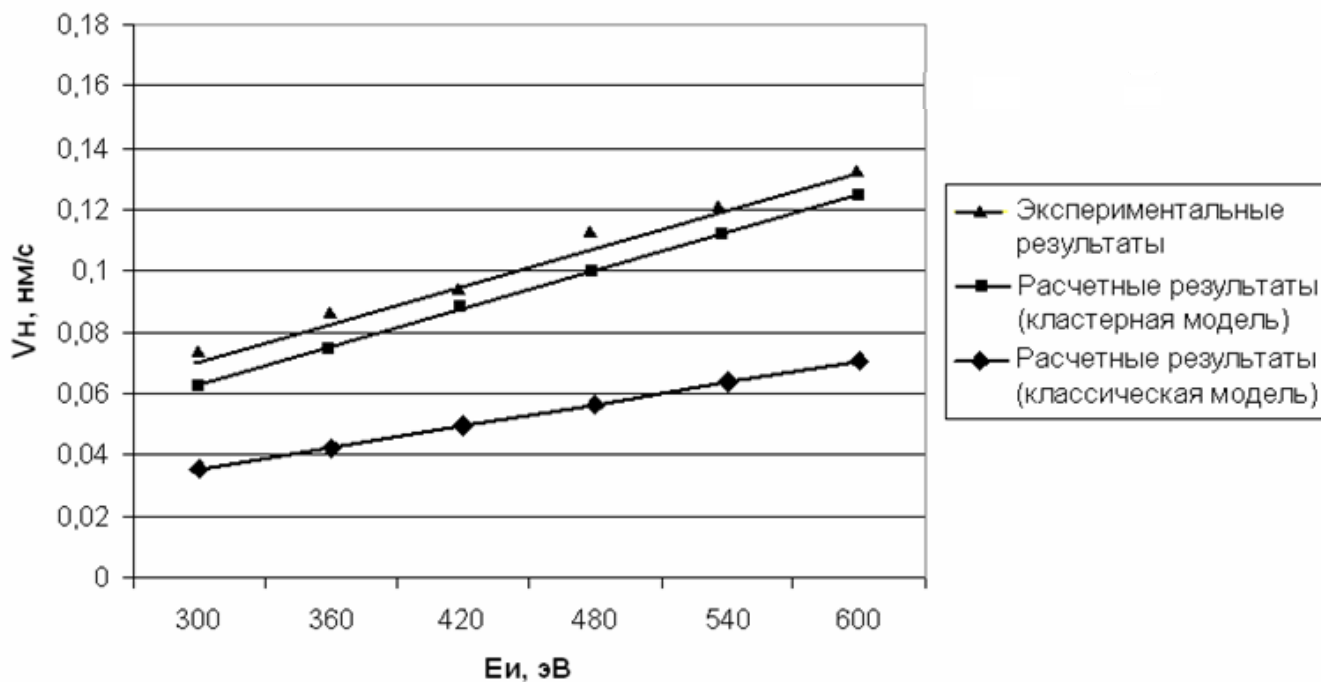


Рисунок 3 - Зависимость скорости получения пленок твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ (V_n) от энергии ионов Ar^+ (E_u). Плотность ионного тока составляла 7-8 мА/см^2 . Размер кластера для кластерной модели принимался равным 1,5 нм

Зависимость состава плёнок от плотности потока ионов исследовалась исходя из анализа составов образцов пленок $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}$, полученных напылением твердого раствора при плотностях тока 3 мА/см^2 , 5 мА/см^2 и 8 мА/см^2 . Энергия ионов составляла 500 кэВ. Результаты масс-спектрометрии приведены в таблице 1. Как видно из таблицы 1, среднеквадратичное отклонение от состава мишени уменьшается с ростом плотности потока. Видно так же, что образцы имеют равномерное распределение состава по толщине пленки вне зависимости от плотности ионного потока.

Таблица 1 - Послойный анализ состава образцов $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}/\text{Si}$, полученных при различных плотностях ионного потока

Элемент	Послойный состав поверхности, мольный %					
	5-30 нм			50-70 нм		
	Плотность потока ионов, мА/см ²					
	3	5	8	3	5	8
Si	27,9	27,1	24,2	22,4	26,1	24,3
C	23,3	23	25,4	28,5	23,8	26,2
Al	22,1	23,2	25,3	27,8	23,2	25,1
N	26,7	26,7	25,1	21,3	26,9	24,4
Среднеквадратическое отклонение	2,37	1,91	0,47	3,18	1,54	0,75

На однородность распределения толщины плёнок по диаметру подложки величина плотности тока не влияет, а отклонение от средней величины по диаметру образца до 4 см не превышает 5 нм.

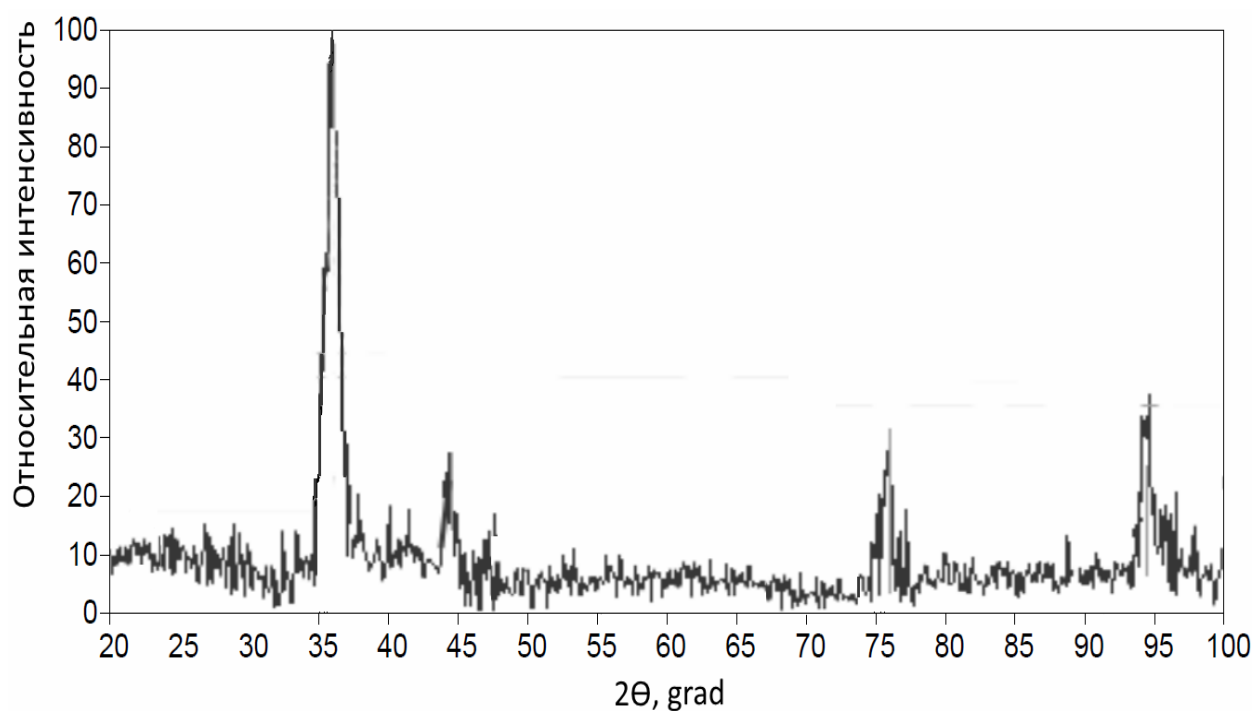


Рисунок 4 – Рентгеновская дифрактограмма поликристаллической пленки $(\text{SiC})_{0,7}(\text{AlN})_{0,3}$, нанесенной на подложку Si

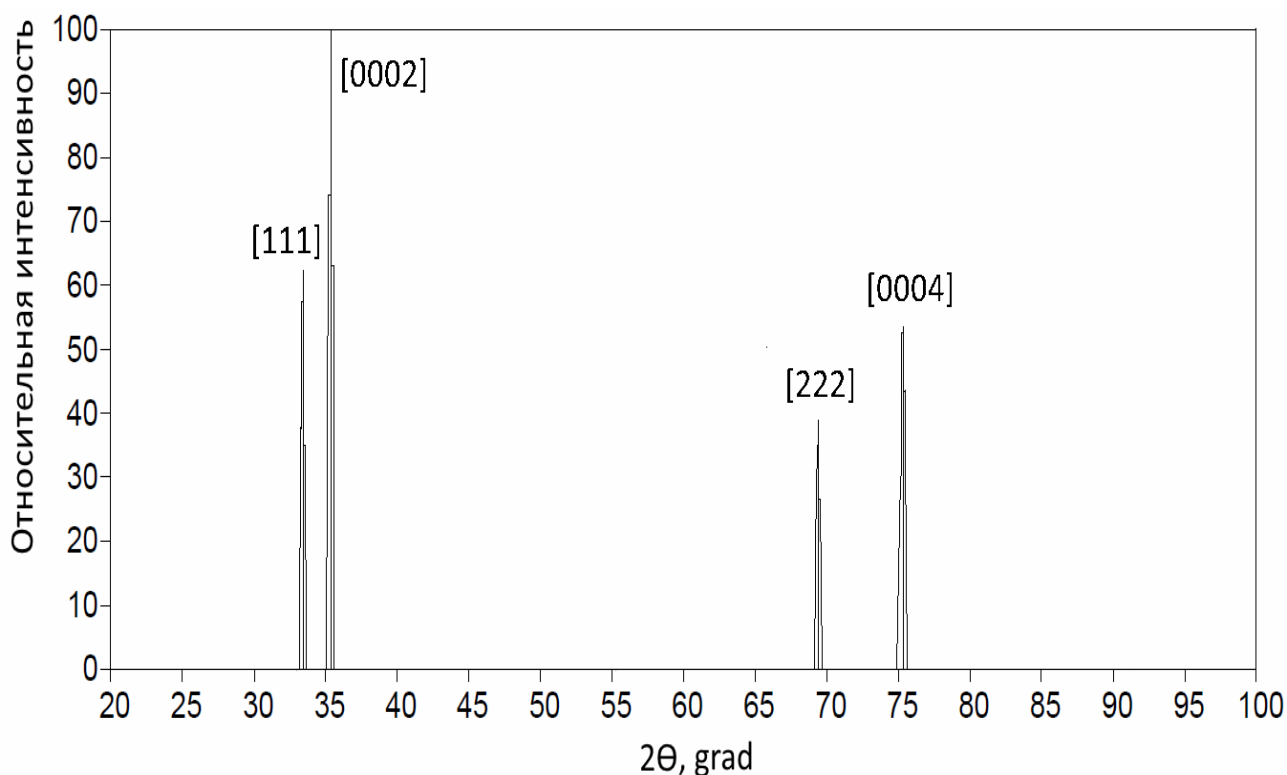


Рисунок 5 - Дифрактограмма структуры $(\text{SiC})_{0,7}(\text{AlN})_{0,3}/\text{Si}$, полученной магнетронным распылением мишени с разогревом подложки до 850°C

Показано, что применение методов эпитаксии и эндотаксии для образцов пленок $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$, полученных магнетронным распылением мишени на монокристаллические подложки Si, позволяют получать слои как с поли-, так и монокристаллической структурой с составом, аналогичным составу мишени (рисунки 4, 5 и 6). Микрошероховатость поверхности слоев толщиной до 100 нм находится на уровне микрошероховатости монокристаллической подложки (рисунки 7 и 8).

Показано, что метод контроля вторичной ионно-электронной эмиссии позволяет осуществлять контроль процесса травления тонкопленочных материалов и многослойных гетероструктур на основе твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ непосредственно в технологическом процессе с регистрацией всех его стадий, имея при этом воспроизводимость результатов в пределах ошибки на уровне 5-7 % измеряемой величины, что обеспечивает регистрацию периода перехода от одного слоя к другому с разрешением по толщине ± 5 нм.

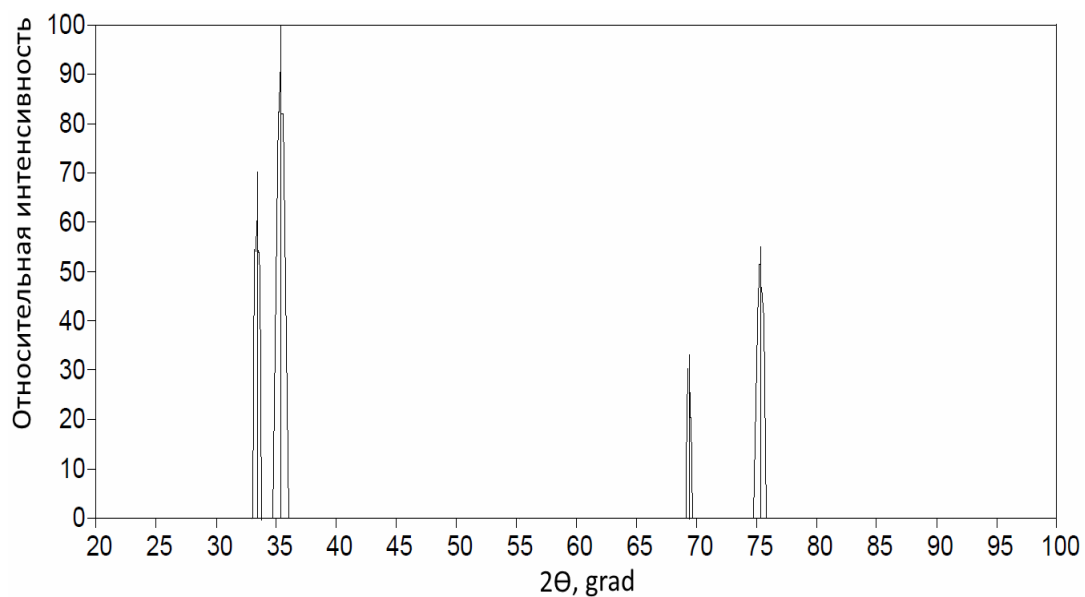


Рисунок 6 - Дифрактограмма структуры $(\text{SiC})_{0,7}(\text{AlN})_{0,3}/\text{Si}$, полученной методом эндотаксии

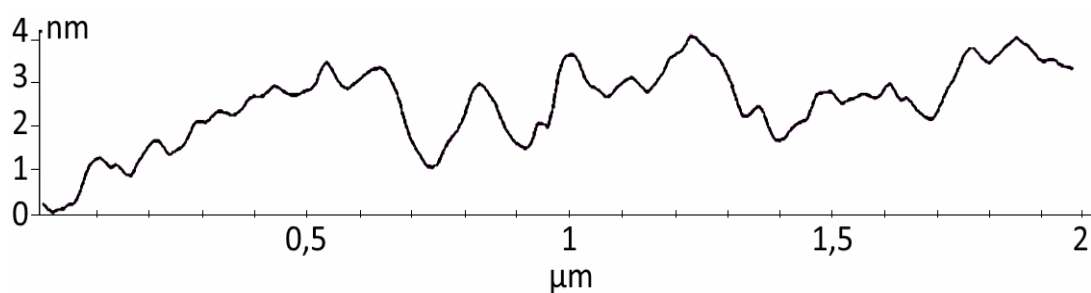


Рисунок 7 – Профилограмма поверхности образца $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}/\text{Si}$, полученного методом эпитаксии при магнетронном распылении мишени

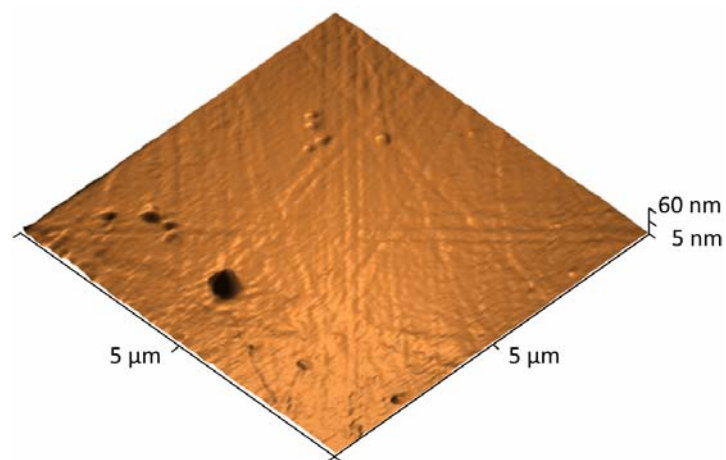


Рисунок 8 – Поверхность образца $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}/\text{Si}$, полученного методом эпитаксии при магнетронном распылении мишени

В четвертой главе проанализирована возможность использования темплетов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x/\text{Si}$ для создания ряда электронных устройств с помощью разработанного технологического процесса получения монокристаллических слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ магнетронным распылением однородной компактной мишени аналогичного состава с использованием принципов эндотаксии и эпитаксии на монокристаллической подложке кремния.

Моделированием и экспериментально с применением магнетронного получения слоев твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ и гетероструктур на их основе подтверждена возможность создания диодов Шоттки для силовой электроники, превышающих по параметрам классические кремниевые диоды. У полученных структур диодов практически отсутствует эффект обратного восстановления, время восстановления обратного сопротивления при переключении в диапазоне температур $25 - 150^\circ\text{C}$ составило не более 50 нс, прямой ток достигает значений до 25 А, а значение напряжения пробоя для диапазона температур $25 - 150^\circ\text{C}$ составляет величину на уровне 650 В, значение тока утечки не превышает 20 мкА.

Структура диода Шоттки на основе гетероструктуры $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}/\text{Si}$ показана на рисунке 9.

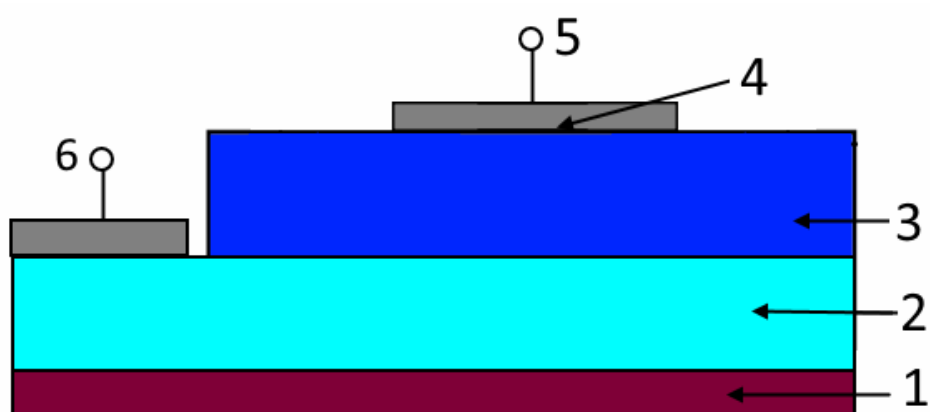


Рисунок 9 – Структура диода Шоттки: 1 – подложка Si; 2 – n^+ -слой $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}$; 3 – n-эпитаксиальный слой $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}$; 4 – барьер Шоттки; 5 – анод; 6 – катод

Прямая ветвь вольт-амперной характеристики такого диода Шоттки при различных температурах изображена на рисунке 10.

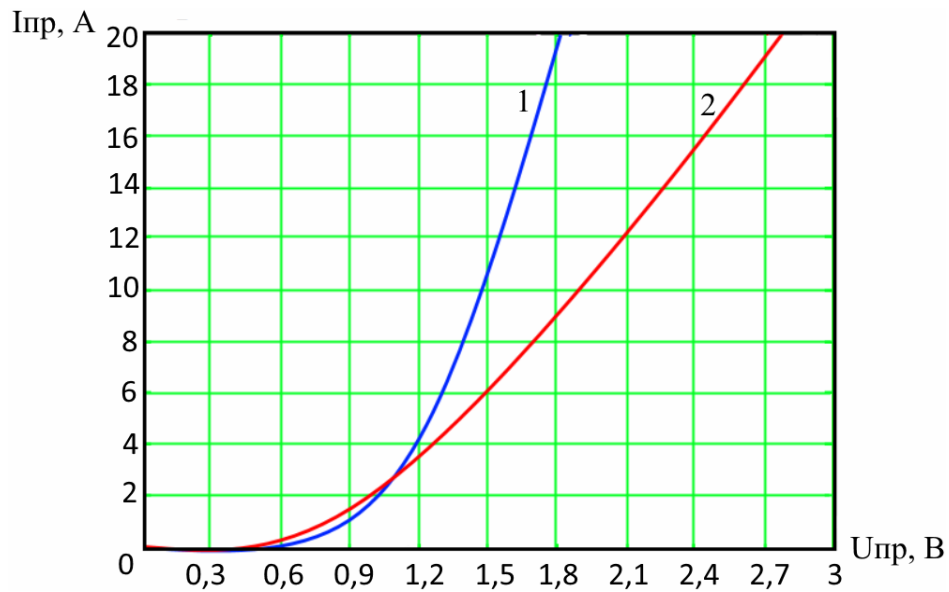


Рисунок 10 – Зависимость тока от прямого напряжения: 1 – 25 °C; 2 – 150 °C

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики при различных температурах представлена на рисунке 11.

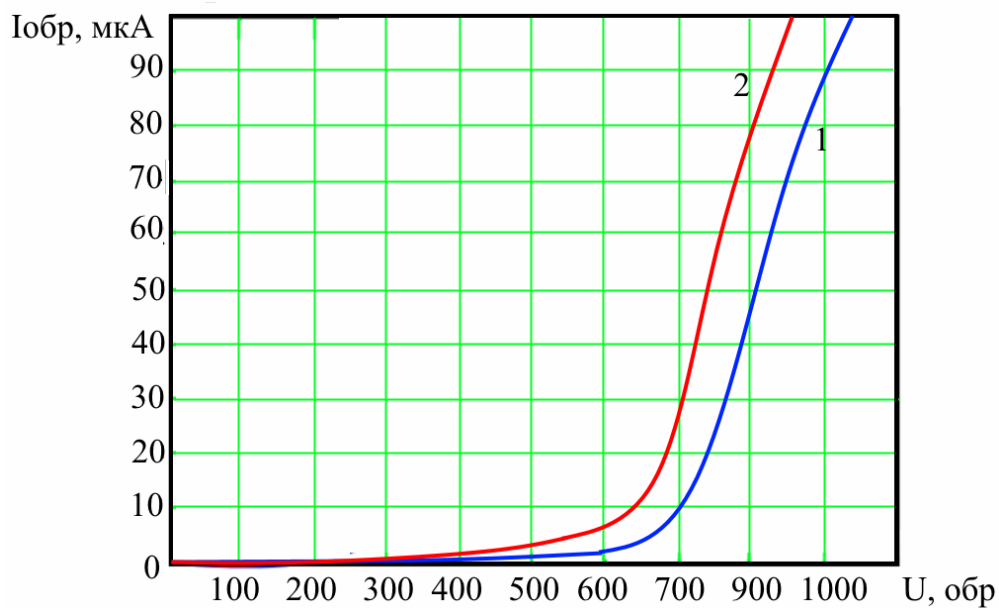


Рисунок 11 – Зависимость тока утечки от обратного напряжения:
1 – 25 °C; 2 – 150 °C

Показано, что на основе слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ возможно создание ультрафиолетовых светодиодов с длиной волны в максимуме спектра излучения от 350 до 220 нм. Структура кристалла УФВД подразумевает применение слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ различного состава, типа проводимости и толщины.

Показана так же возможность создания фотодиода с использованием темплейта $(\text{SiC})_{0,7}(\text{AlN})_{0,3}/\text{Si}$, слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ различного состава и типа проводимости. Предложенные фотодиоды по своим параметрам не уступают таковым на основе нитридов III группы.

Анализ показывает, что большинство задач по получению рассмотренных гетероструктур можно реализовать с использованием вакуум-плазменных процессов и технологических приемов.

Основные результаты и выводы:

1 Разработан низкотемпературный технологический процесс получения наноразмерных слоев на монокристаллической подложке кремния и гетероструктур на основе твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ с применением магнетронного распыления однородной компактной мишени при энергии ионов аргона до 500 эВ и плотности ионного потока до 10 mA/cm^2 .

2 Установлены технологические параметры процесса магнетронного распыления мишени (энергия и плотность ионного потока) из твердых растворов $(\text{SiC})_{0,5}(\text{AlN})_{0,5}$ и $(\text{SiC})_{0,7}(\text{AlN})_{0,3}$, обеспечивающие формирование слоя со скоростью до 0,2 нм/с на различных подложках (кремний, карбид кремния) без их предварительного нагрева.

3 Полученные экспериментальные и расчетные результаты по кинетике нанесения слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ магнетронным распылением мишеней на постоянном токе ионами аргона при плотности тока 5-10 mA/cm^2 и энергии ионов до 700 эВ показали, что наибольшее согласование экспериментальных и расчетных данных может быть получено при использовании кластерной модели распыления с размером кластера 1,0-1,5 нм.

4 Показано, что химический и фазовый состав слоев, полученных магнетронным распылением поликристаллической однородной компактной мишени $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$, практически одинаков с её составом после предварительного распыления в течение 10-15 минут и при плотности тока $7-8 \text{ мА/см}^2$.

5 Физико-химическими расчетами межатомного взаимодействия в системе SiC-AlN с использованием модели изоморфного ионного замещения показана возможность и достоверность получения твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ во всем диапазоне «х» при температуре ниже 900°C . Результаты расчетов подтверждаются полученными экспериментальными данными.

6 Установлено, что атомная структура наноразмерных слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ на монокристаллической подложке кремния с ориентацией (111) определяется как температурой подложки, так и скоростью нанесения слоя. Поликристаллические слои формируются при температуре подложки ниже 800°C при скорости роста до $0,2 \text{ нм/с}$. Монокристаллические слои при эпитаксии образуются при температуре подложки 800°C и выше и скорости роста $0,10-0,15 \text{ нм/с}$. Показано, что получение монокристаллических слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ на монокристаллическом кремнии с ориентацией (111) возможно и при использовании принципов эндотаксии. Установлено, что отжиг гетероструктуры "поликристаллический слой твердого раствора толщиной до 60 нм на монокристаллической кремниевой подложке" при температуре $800-900^\circ\text{C}$ в среде аргона в течение 30-40 минут обеспечивает формирование монокристаллического слоя. Микрошероховатость поверхности монокристаллических слоев твердого раствора во всех случаях находится на уровне шероховатости монокристаллической подложки и соответствует 14 классу.

7 Показано, что разработанный ионно-плазменный процесс с магнетронным распылением однородной компактной мишени из твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ различного состава позволяет получить многослойные наноразмерные гетероструктуры на монокристаллической кремниевой подложке и использовать ионно-электронную эмиссию как метод контроля процесса травле-

ния тонкопленочных материалов и гетерокомпозиций с регистрацией всех его стадий при создании необходимой топологии.

8 Показана возможность применения слоев твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ и самого технологического процесса их получения магнетронным распылением однородной компактной мишени для создания ряда электронных устройств с использованием искусственных подложек (темплейтов) на монокристаллическом кремнии. Разработана физико-топологическая модель ультрафиолетового светодиода с длиной волны в максимуме излучения от 350 до 220 нм на основе твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ с различным числом квантовых ям. Показана возможность создания фотодиода с использованием темплейта $(\text{SiC})_{0,7}(\text{AlN})_{0,3}/\text{Si}$ и слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ различного состава и типа проводимости, позволяющего достичь величины внешней квантовой эффективности не менее 20% в диапазоне длин волн 250-365 нм.

9 Моделированием и экспериментально с применением магнетронного получения слоев твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ и гетероструктур на их основе подтверждена возможность создания диодов Шоттки для силовой электроники. В диапазоне температур от 25 до 150 °С в полученных гетероструктурах диодов практически полностью отсутствует эффект обратного восстановления (время восстановления не более 50 нс), значения тока утечки не превышают 20 мкА при напряжении пробоя на уровне 650В, прямой ток достигает значений до 25А.

Список опубликованных работ по теме диссертации:

1. Неразрушающий контроль процесса ионно-лучевого травления наноразмерных гетероструктур / Симакин С.Б., Сергиенко А.А., Кузнецов Г.Д., Курочка А.С., Курочка С.П., Харламов Н.А. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – №3 (77).

2. Кинетические особенности получения плёнок твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ ионным распылением. / Харламов Н.А., Кузнецов Г.Д., Каргин Н.И., Сафаралиев Г.К. // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2013. – №6.

3. К модели образования твердых растворов в системе SiC-AlN при магнетронном нанесении пленок / Харламов Н.А., Кузнецов Г.Д., Евсеев В.А., Билалов Б.А., Каргин Н.И. // Современные проблемы науки и образования (электронный журнал). – 2014. – №6.

4. Кузнецов Г.Д., Курочка С.П., Харламов Н.А., Сергиенко А.А. Электронная эмиссия в процессе реактивного ионного травления // Труды международной научно-технической конференции «Микро- нанотехнологии в электронике», Приэльбрусье, 2009.

5. Кузнецов Г.Д., Билалов Б.А., Сушков В.П., Харламов Н.А. Омический контакт к широкозонным полупроводникам на основе нитридов // Труды Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника», Махачкала, 2009.

6. Кузнецов Г.Д., Сушков В.П., Харламов Н.А. Прогнозирование возможностей создания ультрафиолетовых светодиодов на основе гетероструктур твердых растворов в системе $(\text{SiC})_{(1-x)}(\text{AlN})_x$ // Труды X Юбилейной международной научной конференции "Химия твердого тела: наноматериалы, нанотехнологии", Ставрополь, 2010.

7. Кузнецов Г.Д., Курочка А.С., Сергиенко А.А., Харламов Н.А. Ионно-электронная эмиссия в процессе ионно-лучевого травления поверхности материалов // Труды IV Международной конференции по физике кристаллов «Кристаллофизика XXI века», Москва, 2010.

8. Кузнецов Г.Д., Евсеев В.А., Харламов Н.А., Билалов Б.А. Оценка параметра межмолекулярного взаимодействия в системе $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ // Труды III Международной научно-технической конференции "Микро- и нанотехнологии в электронике", Нальчик, 2010.

9. Кузнецов Г.Д., Сергиенко А.А., Курочка А.С., Харламов Н.А. Тешев Р.Ш., Симакин С.Б. Ионно-электронная эмиссия в процессе реактивного ионно-лучевого травления наноразмерных гетероструктур // Труды III Международ-

ной научно-технической конференции "Микро- и нанотехнологии в электронике", Нальчик, 2010.

10. Кузнецов Г.Д., Сушков В.П., Харламов Н.А. Моделирование параметров ультрафиолетовых светодиодов на основе твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ // Труды III Международной научно-технической конференции "Микро- и нанотехнологии в электронике", Нальчик, 2010.

11. Курочка А.С., Кузнецов Г.Д., Харламов Н.А. Формирование диэлектрической плёнки методом РИЛТ // II Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития полупроводниковой техники», Махачкала, 2012.

12. Харламов Н.А., Билалов Б.А., Кузнецов Г.Д., Курочка С.П. Методика получения тонких плёнок твердого раствора $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ // II Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития полупроводниковой техники», Махачкала, 2012.

13. Харламов Н.А., Билалов Б.А., Сушков В.П., Кузнецов Г.Д. Моделирование параметров светодиодной гетероструктуры на основе твердых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ // II Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития полупроводниковой техники», Махачкала, 2012.

14. Кузнецов Г.Д., Харламов Н.А., Сушков В.П. Параметры наногетероструктуры ультрафиолетового светодиода на основе твёрдых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ // XI Международная научная конференция "Химия твердого тела: наноматериалы, нанотехнологии", Ставрополь, 2012.

15. Кузнецов Г.Д., Харламов Н.А., Сафаралиев Г.К., Султанов А.О., Делян В.И. Расчет физико-химических параметров смещения в квазибинарной системе $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ // XI Международная научная конференция "Химия твердого тела: наноматериалы, нанотехнологии", Ставрополь, 2012.

16. Курочка А.С., Кузнецов Г.Д., Сергиенко А.А., Харламов Н.А., Курочка С.П., Тешев Р.Ш. Модель кинетической ионно-электронной эмиссии в условиях реактивного ионно-лучевого травления // IV Международная научно-

техническая конференция "Микро- и нанотехнологии в электронике", Приэльбрусье, 2012.

17. Сушков В.П., Харламов Н.А., Кузнецов Г.Д., Билалов Б.А. Основные параметры гетероструктуры ультрафиолетовых светодиодов на основе прямозонных твёрдых растворов в системе $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ // IV Международная научно-техническая конференция "Микро- и нанотехнологии в электронике", Приэльбрусье, 2012.

18. Евсеев В.А., Харламов Н.А., Кузнецов Г.Д. Расчет параметра взаимодействия в твердых растворах на основе нитридов III группы // IX Международная конференция «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», Астрахань, 2012.

19. Харламов Н.А., Сушков В.П., Каргин Н.И., Кузнецов Г.Д. Моделирование параметров солнечных элементов в системе GaN-Si // Труды VI Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», Нальчик, 2014.

20. Харламов Н.А., Кузнецов Г.Д., Сафарилиев Г.К., Евсеев В.А. Уточненная модель образования твердых растворов в системе SiC-AlN // Труды VI Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», Нальчик, 2014.