

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Проректор по научной и  
исследовательской деятельности  
Южного федерального университета,  
доктор химических наук



Метелица А.В.

«\_\_\_» мая 2018 г.

## **ОТЗЫВ**

ведущей организации о диссертации Еримеева Георгия Александровича  
на тему «Особенности взаимодействия низкоэнергетических ионов аргона  
с поверхностью кристаллических моноарсенидов со структурой сфалерита»  
представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.07 – физика конденсированного состояния

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Получение тонких слоев и низкоразмерных полупроводниковых наноструктур с использованием ионных пучков объединяет родственные ростовые проблемы – эпитаксию и ионную имплантацию. Как показывают многочисленные исследования при ионном воздействии может меняться как структура поверхности, так и образовываться дефекты кристаллической структуры. Использование ионов низких энергий принципиально позволяет обеспечить приемлемо низкий уровень дефектности наноструктур и необходимость в последующем высокотемпературном отжиге отпадает. Особенности формирования морфологии поверхности и ее эволюция при физическом распылении являются предметом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований. Помимо влияния воздействия ионных пучков на структуру поверхности отдельной задачей является изучение изменения состава приповерхностных слоев полупроводниковых материалов, что может найти применение как в масс-спектроскопических исследованиях, так и управляемом травлении поверхности.

Диссертационная работа соискателя направлена на решение актуальной задачи изучения особенностей взаимодействия низкоэнергетических ионов аргона с поверхностью кристаллических моноарсенидов индия и галлия со структурой сфалерита, а также комплексное исследование свойств полупроводниковых структур, подвергнутых ионной бомбардировке. Для этого автором теоретически и экспериментально исследован характер формирования периодически модулированной упорядоченной волнообразной структуры на поверхности моноарсенидов галлия и индия при бомбардировке ионами, падающими под углом на поверхность, а также исследован эффект нестехиометричного распыления бинарных полупроводниковых материалов. Учитывая вышеизложенное, тема диссертационной работы Еримеева Г.А. является актуальной и перспективной для развития физики конденсированного состояния и полупроводникового материаловедения.

**Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации состоит в:**

1) разработке модели формирования периодически модулированной упорядоченной волнообразной структуры на поверхности моноарсенидов галлия и индия при бомбардировке ионов, падающих под углом на поверхность;

2) разработке модели нестехиометричного распыления бинарных полупроводниковых материалов, учитывающей изменение состава приповерхностных слоев за счет преимущественного распыления одной из компонент;

3) установлении, что пересыщенные вакансии, которые возникают при распылении поверхности моноарсенидов галлия и индия с высокой кристаллической симметрией остаются на низких моноатомных террасах, не имея возможности преодолеть образующиеся энергетические барьеры, что в условиях ионно-стимулированной поверхностной диффузии, приводит к формированию локальных углублений, перерастающих в развитую упорядоченную фасетированную структуру;

4) выявлении, что облучение моноарсенидов индия и галлия ионами аргона низких энергий приводит к образованию на поверхности упорядоченной волнообразной структуры ориентация которой зависит от направления падения ионного пучка. При докритических углах падения наблюдается перпендикулярное упорядочивание. В окрестности критических углов образуется стохастическая структура, переходящая в параллельное упорядочивание при закритических углах падения;

5) установлении, что изменение температуры подложки арсенида галлия в диапазоне от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  при бомбардировке ионами аргона с



аргона с энергией  $E = 2$  кэВ и плотностью тока  $j = 1,5$  мкА/см<sup>2</sup> приводит к снижению нестехиометричности начальной фазы распыления.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов работы** достигаются корректностью поставленных задач, использованием современного научного оборудования, физической обоснованностью используемых автором подходов, а также согласованностью полученных данных с известными результатами в области процессов роста тонких пленок и островковых структур с другими альтернативными методами – молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазного осаждения. Достоверность разработанной модели, подтверждается хорошим согласованием результатов расчетов и экспериментальных исследований.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях (6 статей в журналах из перечня ВАК и 2 статьи в журналах Scopus), всего по теме диссертации опубликовано 16 работ. Результаты диссертационного исследования докладывались на 8 международных и всероссийских конференциях.

**Научная ценность работы** состоит в разработке модели формирования периодически модулированной упорядоченной волнообразной структуры на поверхности моноарсенидов галлия и индия при бомбардировке ионов и выводе аналитического выражение для скорости эрозии волнообразной структуры в зависимости от кривизны поверхности, энергии и средней глубины проникновения ионов, ширины полос волнообразной структуры. Разработана модель нестехиометричного распыления бинарных полупроводниковых материалов, учитывающая изменение состава приповерхностных слоев за счет преимущественного распыления одной из компонент и получено аналитическое выражение, определяющее временную зависимость изменения концентрации компонент бинарной системы. Продемонстрирована применимость разработанного соискателем технологического подхода для синтеза гетероструктур с квантовыми точками малых размеров и высокой плотностью, которые востребованы при создании элементов фотоники с уникальными характеристиками.

**Практическая значимость результатов работы** заключается в разработке лабораторного способа низкоэнергетичного ионно-стимулированного наноструктурирования поверхности моноарсенидов галлия и индия со структурой сфалерита. Предложены и реализованы технологические режимы выращивания плотных массивов островковых наноструктур арсенида индия на поверхности арсенида галлия, используя



пункту 5 – «Разработка математических моделей построения фазовых диаграмм состояния и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения», так как в работе разработана физико-математическая модель формирования периодически модулированной упорядоченной волнообразной структуры на поверхности моноарсенидов галлия и индия при бомбардировке ионов, падающих под углом на поверхность и физико-математическая модель нестехиометричного распыления бинарных полупроводниковых материалов, учитывающая изменение состава приповерхностных слоев за счет преимущественного распыления одной из компонент.

Диссертация Еримеева Г.А. обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе соискателя. Содержание диссертации отражено на 124 страницах, содержащих 41 рисунок и 5 таблиц. Наличие некорректного заимствования материала в диссертационной работе без ссылки на автора и (или) источник заимствования не обнаружено. Диссертация оформлена в соответствие с ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Автореферат диссертации по содержанию, актуальности, степени разработанности темы исследования, цели и задачам, научной новизне, теоретической и практической значимости соответствует диссертации.

Основные положения, выносимые на защиту, а также новизна и значимость обоснованы и раскрыты полностью.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования в исследованиях процессов роста квантово-размерных гетероструктур и для отработки технологии создания оптоэлектронных приборов в ИОФ РАН (Москва), ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), СПбГТУ-ЛЭТИ (Санкт-Петербург), ФИ РАН (Москва), МИФИ (Москва), МИСиС (Москва), ИФМ РАН (Нижний Новгород), ИФП СО РАН (Новосибирск), ЮФУ (Ростов-на-Дону), ЮНЦ РАН (Ростов-на-Дону), НИИ «Полус» (Москва), ЗАО «Телеком-СТВ» (Зеленоград), ОАО «Сатурн» (Краснодар), а также в других научных и образовательных учреждениях.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Для управления параметрами ростового потока автор использует изменение напряжения на одном из управляющих электродов трехсеточной ионной пушки и представляет на рисунке 2.2 на стр. 38 калибровочные кривые. В поясняющем тексте к рисунку автор ограничивается упоминанием



о том, что при этом использовался коллектор Фарадея. Необходимо было бы более подробно описать методику получения калибровочных кривых.

2. При выводе выражения (3.19) на стр. 61, определяющего зависимость геометрических размеров волнообразной структуры, формирующейся на поверхности полупроводников при ионном воздействии, от угла падения ионного пучка делается предположение, что диффузия активируется термически и для этого случая рассматриваются соответствующие коэффициенты диффузии, поверхностная свободная энергия и плотность диффундирующих атомов. При этом очевидно, что ионное воздействие может приводить к изменению указанных параметров.

3. Рассматривая на рисунке 4.3 на стр. 76 теоретические кривые, полученные на основе разработанной модели нестехиометрического распыления, и аналогичные экспериментальные результаты, представленные на рисунке 4.5 на стр. 79, соискатель искусственно «обрезает» интервал отображения данных, что несколько снижает возможность сопоставления выводов теории и эксперимента в областях насыщения.

4. Автором не рассматривается вопрос о перемешивании ростового и подложечного материала в процессе формирования островковых структур. Кроме того, причина формирования квантовых точек *dome*-типа и проявление двухмодового режима роста связывается автором с увеличением температуры подложки. Однако более вероятной причиной следует считать большую эффективную толщину выращенного слоя.

5. В тексте диссертации не соблюдается единство обозначений. Например, энергия ионов обозначаются в некоторых случаях  $E_{Ar^{++}}$ , в других  $E$  или  $E_{ион}$ ; символом  $\lambda$  в п. 3.2.1 обозначается параметр, определяющий геометрические размеры волнообразной структуры, а в п. 3.3.2 – длину волны оптического излучения; символом  $D$  в п. 4.1.2 обозначается коэффициент диффузии, а в п. 5.1.1 – диаметр подложки.

6. Восприятие диссертационной работы затруднено из-за использования автором различных терминов применительно к понятию «квантовая точка». Например, «квантовая точка», «наноостровковая структура», «островковая структура», «нанообъект».

Указанные замечания не являются критическими, не снижают ценности полученных результатов и не сказываются на высоком уровне проведенных исследований.

### **Общее заключение по диссертационной работе**

Диссертационная работа «Особенности взаимодействия низкоэнергетических ионов аргона с поверхностью кристаллических моноарсенидов со структурой сфалерита» по своему содержанию, актуальности, научной новизне, теоретической значимости и практической

ценности соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» (пп. 9–14), утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Еримеев Георгий Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, директором НИИ физики ЮФУ Вербенко Ильей Александровичем (место работы: ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», научно-исследовательский институт физики, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194; тел. +7 (863) 243 40 66, e-mail: [ilich001@yandex.ru](mailto:ilich001@yandex.ru)).

Диссертационная работа Еримеева Г.А. и отзыв о ней заслушаны и обсуждены на научном семинаре научно-исследовательского института физики Южного федерального университета «8» мая 2018 г., протокол №3.

Директор  
НИИ физики ЮФУ,  
д.ф.-м.н.,

Вербенко И.А.

Подпись Вербенко И.А. заверяю:



*зам. директора НИИ физики  
Бурава Е.А.*

Научно-исследовательский институт физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194  
тел. +7(863) 243 36 76,  
факс +7(863) 243 40 44  
сайт: <http://www.ip.sfedu.ru>,  
e-mail: [ipphys@sfedu.ru](mailto:ipphys@sfedu.ru)

НИИ физики ЮФУ

Исх. № 604/208

от 10.05 2018 г.