

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Еримеева Георгия Александровича на тему «Особенности взаимодействия низкоэнергетических ионов аргона с поверхностью кристаллических моноарсенидов со структурой сфалерита», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

Обработку поверхности ионными пучками используют для предварительной очистки, модификации структуры тонких слоев и пленок, подготовки поверхности и ионного легирования. При этом во время ионного облучения могут протекать следующие процессы: дефектообразование, локальный разогрев, кратерообразование, удаление легколетучих примесей, перераспределение химического состава слоев, увеличение плотности дислокаций. Совокупность этих процессов определяет состояние поверхности после ионно-лучевой обработки и существенным образом зависит от условий ионного воздействия, а также кристаллического строения и состава приповерхностных слоев.

В последнее десятилетие наблюдается значительный рост интереса к изучению наноструктурирования поверхности и разработке способов управления составом приповерхностных слоев. Диссертация Еримеева Г.А. посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию закономерностей взаимодействия ионов аргона низких энергий с поверхностью кристаллических моноарсенидов со структурой сфалерита. В работе также исследовано динамическое изменение состава приповерхностных областей моноарсенидов и изучены закономерности кристаллизации низкоразмерных систем моноарсенидов со сфалеритной структурой. В этом контексте тема рецензируемой диссертации представляется актуальной и имеющей важную научную значимость и практическую ценность.

## **Новизна научных результатов и выводов**

В работе разработан экспериментальный метод управления структурой и составом приповерхностных слоев полупроводниковых многокомпонентных материалов, а также получена совокупность экспериментальных результатов по исследованию закономерностей кристаллизации полупроводниковых наноструктур. К основным новым научным результатам диссертации можно отнести следующие:

- Разработана модель формирования периодически модулированной упорядоченной волнообразной структуры на поверхности моноарсенидов галлия и индия при бомбардировке ионами аргона.
- Предложена теория нестехиометричного распыления бинарных полупроводниковых материалов, учитывающая изменение состава приповерхностных слоев за счет преимущественного распыления компонент.
- Получены новые экспериментальные результаты, характеризующие закономерности упорядочивания волнообразной поверхности и влияние докритических углов падения ионного пучка на параметры фасетированных поверхностей.
- Получены сведения о влиянии энергии, плотности ионного тока и температуры подложки на изменение состава приповерхностных областей моноарсенида галлия при бомбардировке ионами аргона.

## **Практическая значимость результатов**

- Установлены закономерности управления процессом наноструктурирования поверхности моноарсенидов галлия и индия со структурой сфалерита при бомбардировке ионами аргона низких энергий.

- Разработана лабораторная методика выращивания плотных массивов островковых наноструктур арсенида индия на поверхности арсенида галлия, используя низкоэнергетичные ионные пучки.
- Предложен методика измерения содержания мышьяка и галлия в приповерхностных слоях естественно окисленного моноарсенида галлия при скользящем облучении низкоэнергетическими ионами аргона.
- Сформулирован научно-обоснованный подход к получению низкоразмерных полупроводниковых структур с использованием низкоэнергетичных ионных пучков.

### **Достоверность полученных результатов и обоснованность положений**

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выносимых на защиту научных положений диссертационной работы обусловлена тем, что они получены с использованием апробированных экспериментальных методов исследования и применением современного и адекватного математического аппарата. Автором диссертации применены методы электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния, атомно-силовой микроскопии, масс-спектропии и фотоэлектронной спектроскопии для изучения геометрических размеров, химического состава, электрических и оптических свойств наноструктур.

### **Оценка содержания диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 124 страницы, включая 41 рисунок и 5 таблиц. Список литературы содержит 130 источников.

Результаты исследований представлены в 6 статьях, опубликованных в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК, и 2 статьях в журналах, индексируемых в наукометрической системе Scopus. Результаты представлены и опубликованы в сборниках трудов 8 международных и всероссийских конференций. Всего по теме диссертации опубликовано 16 научных работ. Опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации. Результаты исследований были использованы при выполнении научно-исследовательских работ как фундаментального, так и прикладного характера.

Личный вклад автора состоял в разработке концептуальных подходов, выполнении расчетов, непосредственном проведении экспериментальных исследований, обработке, анализе и обобщении полученных результатов. Положения, выносимые на защиту и составляющие научную новизну, получены лично автором.

Автореферат корректно передает содержание диссертационной работы и содержит краткое изложение всех выносимых на защиту положений.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В главе 3 на стр. 54 приводятся выражения (3.3) – (3.5), в которых используется константа  $\Xi$ , пропорциональная, по утверждению автора, мощности осаждения. Хотелось бы услышать пояснение, касающееся использования термина «мощность осаждения», а также обоснование критерия выбора такого параметра. Это же замечание относится к уравнениям (3) – (5) на стр. 10 автореферата.

2. В той же главе 3 на стр. 64-65 представлены микрофотографии волнообразной поверхности при разных углах падения ионного пучка, полученные с помощью атомно-силовой микроскопии, а на стр. 67 отмечается, что для арсенида галлия критический угол составил  $\theta_{кр} = 72^\circ$ , для арсенида индия он достигает  $\theta_{кр} = 78^\circ$ . В то время как на микрофотографиях приведены изображения поверхности для указанных критических углов и для

углов  $60^\circ$  и  $85^\circ$ . В связи с чем возникает вопрос о размерах интервалов, в которых наблюдается переход от параллельного к перпендикулярному упорядочиванию.

3. В главе 4 на стр. 82 приведен рисунок 4.7 – фотоэлектронный спектр естественно окисленного арсенида галлия с кристаллографической ориентацией (001) на котором высота спектров выражена в относительных единицах, а в таблице 4.1 на стр. 83 представлены уже данные о массовой доле галлия и мышьяка. При этом в тексте диссертации крайне лаконично описана методика расчета массовой доли компонентов по данным фотоэлектронной спектроскопии.

4. В главе 5 на стр. 88 приведены энергетические и угловые зависимости коэффициентов распыления арсенидов галлия и индия, полученные для энергий ионов аргона в 150, 200 и 300 эВ. В то время как в предыдущих главах энергия ионов зачастую превышала 500 эВ. Какими критериями руководствовался автор, сдвигая экспериментальный интервал в сторону меньших энергий?

Отмеченные замечания носят частный и, по большей части, дискуссионный характер, не затрагивают основных научных положений работы и сказываются на общей высокой оценке работы в целом.

### **Заключение**

Диссертационная работа Еримеева Г.А. изложена грамотно и доказательно, ее научное содержание и стиль изложения соответствует современному международному уровню исследований в области физики конденсированного состояния. Диссертацию можно охарактеризовать как завершенную научно-квалификационную работу, в которой решена научная проблема, имеющая существенное значение для развития физики и технологии полупроводниковых наноструктур.

Считаю, что диссертационная работа «Особенности взаимодействия низкоэнергетических ионов аргона с поверхностью кристаллических

моноарсенидов со структурой сфалерита» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Еримеев Георгий Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент –  
доктор физико-математических наук,  
профессор, Лауреат Государственной  
премии РФ в области науки и техники,  
Почетный работник высшего  
профессионального образования,  
Вице-президент АО НПП «Радий»



Подпись Бавижева М.Д. заверяю:  
Президент АО НПП «РАДИЙ»  
Конов Магомет Абубекирович

  
БАВИЖЕВ Михаил Данильевич

16 мая 2018 г.

Акционерное общество  
«Научно-производственное  
предприятие» «Радий»,  
125315, г. Москва, ул. Часовая, д.28,  
тел. +7 495 151-49-67,  
e-mail: mbavizhev@mail.ru,  
<http://www.npp-radiy.ru>