

«УТВЕРЖДАЮ»



Руководитель центра физики
наногетероструктур
ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
чл. корр. РАН, д.ф.-м.н.

Копьев П.С.

«3» марта 2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Чеботарева Сергея Николаевича
«Ионно-лучевая кристаллизация фотоэлектрических наноматериалов
с промежуточной энергетической подзоной», представленную на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук по специальности
01.04.07 – физика конденсированного состояния

Актуальность

Исследование полупроводниковых наногетеросистем является одним из магистральных направлений развития современной физики конденсированного состояния. В рамках данного направления особую актуальность приобретают фундаментальные и прикладные задачи, направленные на разработку новых материалов и технологических методов их получения для создания нового класса оптоэлектронных и фотоэлектрических устройств. Весьма интересным подходом, позволяющим расширить спектр поглощения солнечного излучения и повысить величину генерируемого электрического тока, является идея использования фотоэлектрических наноматериалов с промежуточной подзоной, которая развивает и, в некотором роде, дополняет традиционную и широко известную концепцию каскадных гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей. В этой связи диссертационная работа Чеботарева С.Н., посвященная установлению физических закономерностей и разработке физико-технологических основ нового метода ионно-лучевой кристаллизации фотоэлектрических наноструктур с промежуточной энергетической подзоной, несомненно является актуальной научной задачей с высоким прикладным потенциалом.

Общая характеристика работы

Основное содержание диссертации изложено в шести главах. Во введении сформулированы цели и задачи диссертации, обоснована актуальность исследований, представлены выносимые на защиту положения, отмечается новизна и практическая ценность полученных результатов.

Глава 1 посвящена рассмотрению направлений совершенствования фотоэлектрических преобразователей. Показана перспективность использования устройств с промежуточной энергетической подзоной. Обоснован значительный потенциал метода ионно-лучевой кристаллизации для получения таких устройств.

В главе 2 представлено описание физико-технологических основ ионно-лучевой кристаллизации, обеспечивающей осаждение кремния, германия, арсенида галлия и арсенида индия на полупроводниковые подложки из массопотоков малой плотности, создаваемых бомбардировкой мишеней ионами аргона малой энергии в высоковакуумных условиях.

В главе 3 рассмотрены использованные в диссертационной работе аналитические методы исследования. Разработаны методики создания прецизионных нанозондов и восстановления реальных размеров нанообъектов. Предложена методика определения коэффициентов распыления полупроводниковых материалов ионами аргона низких энергий.

В главе 4 приведены результаты исследования энергетической и угловой зависимостей коэффициентов распыления полупроводников ионами аргона низких энергий. Отдельно рассмотрена проблема астехиометрии распыления двухкомпонентных полупроводниковых материалов. Обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований осаждения материалов при различной геометрии системы «мишень – подложка», угле наклона падения пучка и влияние профиля плотности ионного тока на равномерность осаждения.

В главе 5 экспериментально изучено влияние времени осаждения, температуры подложки, величины и профиля ионного тока, энергии бомбардирующих ионов на размеры, дисперсию и поверхностную плотность островковых наноструктур. Исследована фотолюминесценция и КРС-спектры многослойных фотоструктур с промежуточной подзоной.

В главе 6 предложена теоретическая модель фотоэлектрических преобразователей с промежуточной подзоной. Изготовлены и экспериментально изучены характеристики прототипов таких устройств.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

Изложенные в диссертации результаты докладывались на профильных научных конференциях, прошли апробацию на научных семинарах. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах, запатентованы и реализованы в виде программ для электронно-вычислительных машин. Автореферат диссертации и опубликованные работы полностью раскрывают ее содержание. В тексте диссертации степень личного участия автора в коллективно написанных работах отмечена.

Научная новизна работы заключается в получении новых сведений о процессах ионно-лучевой кристаллизации наноструктурированных полупроводниковых материалов, разработке теоретической модели и изготовлении прототипов фотоэлектрических преобразователей с промежуточной подзоной. Среди основных результатов выделим следующие:

1. Экспериментально показано, что воздействием ионных пучков низких энергий и малой плотности тока на поверхность одно- и двухкомпонентных полупроводниковых мишеней возможно создать массопоток ростового вещества со скоростями в доли монослоев в секунду.

2. Определены интегральные и дифференциальные угловые коэффициенты распыления кремния, германия, арсенида галлия, арсенида индия в широком диапазоне углов при бомбардировке аргоновыми пучками низких энергий и малой плотности.

3. Установлены характерные особенности первоначальной астехиометрии состава распыляемого потока арсенида галлия и арсенида индия.

4. Продемонстрирована возможность формирования методом ионно-лучевой кристаллизации достаточно однородных по размерам массивов nanoостровков германия на кремнии и арсенида индия на арсениде галлия;

5. Разработана теоретическая модель, изготовлены и измерены характеристики прототипов однопереходных фотоэлектрических *p-i-n* преобразователей с промежуточной энергетической подзоной.

Научная значимость диссертационной работы:

1. Продемонстрирована возможность метода ионно-лучевой кристаллизации для получения полупроводниковых квантово-размерных гетеросистем, в том числе фотоэлектрических наноматериалов.

2. Обнаружен эффект затухающей астехиометрии состава двухкомпонентных прямозонных полупроводников при бомбардировке низкоэнергетичными ионами инертного газа.

3. Установлены угловые закономерности распыления важнейших полупроводников оптоэлектронного назначения.

4. Развита теория и практика фотоэлектрических устройств с промежуточной подзоной.

Практическая ценность полученных результатов заключается в доказательстве принципиальной возможности применения разработанного соискателем метода ионно-лучевой кристаллизации для получения наноструктурированных полупроводниковых материалов. Разработанные метрологические решения позволяют повысить точность атомно-силовых микроскопических исследований нанообъектов различной природы. Полученные автором данные могут быть положены в основу технологии управляемого синтеза фотоэлектрических и оптоэлектронных устройств с промежуточной подзоной, а также создания нового класса приборов нанофотоники.

Рекомендации по использованию результатов

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать к использованию в ИОФ РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), СПбГЭТУ (ЛЭТИ) (Санкт-Петербург), СПбГПУ (Санкт-Петербург), МГУ (Москва), ФИ РАН (Москва), МФТИ (Москва), МИФИ (Москва), МИСиС (Москва), ИФТТ РАН (Черноголовка), ИК РАН (Москва), ИФМ РАН (Нижний Новгород), ИФП СО РАН (Новосибирск), ЮФУ (Ростов-на-Дону), ЮНЦ РАН (Ростов-на-Дону), СКФУ (Ставрополь), ИСЭ СО РАН (Томск), НТ-МДТ (Зеленоград), НИИ «Полюс» (Москва), ОАО НПП «Квант» (Москва), ЗАО «Телеком-СТВ» (Зеленоград), ОАО «Сатурн» (Краснодар), в других научных учреждениях и университетах.

Замечания и недостатки

1. В работе экспериментально исследованы зависимости интегральных и дифференциальных коэффициентов распыления одно- и двухкомпонентных полупроводников, которые затем используется в качестве входных параметров разработанной соискателем модели массопереноса при ионно-лучевой кристаллизации. Следует отметить, что в настоящее время разработаны компьютерные модели, которые позволяют провести численное моделирование этих коэффициентов. В этой связи полезно было бы провести сравнение полученных автором экспериментальных результатов с данными такого компьютерного моделирования.

2. В своей работе соискатель предложил новый оригинальный метод получения наноматериалов с промежуточной подзоной. Все экспериментальные данные, анализ которых производится в диссертации, получены при использовании элементарных и бинарных полупроводниковых соединений. Однако в настоящее время все более широкое практическое применения находят многокомпонентные системы. Хотелось бы иметь результаты оценки применимости предложенного соискателем метода для получения таких многокомпонентных наноструктур.

3. При обсуждении КРС-спектров и спектров фотолюминесценции многослойных наноструктур с промежуточной подзоной, выращенных методом ионно-лучевой кристаллизации, автор по сдвигам характеристических максимумов лишь качественно указывает на изменение химического состава наноструктур при варьировании ростовых условий. Представляется, что для лучшего понимания механизма кристаллизации целесообразно было бы провести количественные расчеты.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера, не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают научной и практической значимости выполненной работы.

Заключение

На основании выполненных исследований в диссертационной работе Чеботарева С.Н. обоснованы теоретические положения и получены новые практические результаты, совокупность которых следует квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное значения для развития

физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур, использующихся в оптоэлектронике и фотоэнергетике.

Диссертационная работа «Ионно-лучевая кристаллизация фотоэлектрических наноматериалов с промежуточной энергетической подзоной» полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук (пп. 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор, Чеботарев Сергей Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв составлен доктором технических наук, профессором, заведующим лабораторией фотоэлектрических преобразователей Андреевым Вячеславом Михайловичем (Место работы: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе. Адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26, тел. +7(812) 297 56 49, e-mail: vmandreev@mail.ioffe.ru), доктором физико-математических наук, профессором, главным научным сотрудником лаборатории фотоэлектрических преобразователей Румянцевым Валерием Дмитриевичем (Место работы: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе. Адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26, тел. +7(812) 292 73 94, e-mail: Rumyan@scell.ioffe.ru), доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории фотоэлектрических преобразователей Хвостиковым Владимиром Петровичем (Место работы: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе. Адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26, тел. +7(812) 292 79 24, e-mail: vlkhv@scell.ioffe.rssi.ru).

Результаты диссертационной работы Чеботарева С.Н. обсуждены и одобрены на семинаре Центра физики наногетероструктур Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе «2» марта 2015 г, протокол № 4.

Заведующий лабораторией,
докт. техн. наук, профессор

Андреев В.М.

Главный научный сотрудник,
докт. физ.-мат. наук, профессор

Румянцев В.Д.

Ведущий научный сотрудник,
докт. физ.-мат. наук

Хвостиков В.П.

Подписи Андреева В.М., Румянцева В.Д., Хвостикова В.П. заверяю: