

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. КУЗНЕЦОВА В.В. на диссертационную работу 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 темы

Как известно, актуальность научной темы определяется с одной стороны логикой развития современного знания, а с другой – требованиями рынка, социально-политическим и государственным заказами. В этой связи синтез материалов для современной микро и нано электроники, обладающих новыми фундаментальными свойствами и имеющих широкую востребованность, благодаря уникальным потребительским качествам, всегда будет актуальным. При этом наиболее перспективными по сравнению с традиционными методами являются методы прямого получения нанообъектов с использованием эффектов спонтанного образования наноструктур, которые относятся к широкому классу фундаментальных явлений самоорганизации в конденсированных средах. Таким образом, поставленная перед автором задача разработки методик ионно-лучевой кристаллизации с целью получения фоточувствительных приемников оптического излучения с расширенным спектром поглощения в ИК-области на основе полупроводниковых нано гетероструктур с промежуточной энергетической подзоной представляется нам современной и важной.

Новизна исследований и научная значимость результатов

Главные научные результаты, полученные диссертантом, можно свести к следующему:

- Облучение ионами аргона низких энергий моно (Si, Ge) - и бинарных (GaAs, InAs) полупроводниковых мишеней приводит к образованию на их поверхности аморфной метастабильной волнообразной структуры
- Ионно-лучевая кристаллизация позволяет прогнозируемо получать упорядоченные нанообъекты в гетеросистемах Ge/Si и InAs/GaAs с латеральными размерами не превышающими 15 нм и поверхностной слоевой плотностью около 10^{11} см^{-2}

- Увеличение степени поглощения ИК-излучения в промежуточной энергетической подзоне *p-i-n* гетероструктур Ge/Si и InAs/GaAs, содержащих вертикально-связанные массивы наноструктур, приводит к усилению генерации фотоэлектрического тока.

Переходя к общей характеристике работы, считаем необходимым отметить следующее. Во-первых, представляемая работа характеризуется как четкой предметной определенностью – полупроводниковые гетероструктуры, так и реальными целевыми достижениями – методики ионно-лучевой кристаллизации для фоточувствительных приемников с использованием фундаментальных явлений самоорганизации в конденсированных средах. На наш взгляд диссертант успешно справился со всеми поставленными задачами.

Автором проведен критический анализ методов получения наноразмерных полупроводниковых гетероструктур. Предложено использовать ионно-лучевую кристаллизацию в качестве альтернативы молекулярно-лучевой эпитаксии и МОС-гидридной технологии, которые традиционно применяются для получения наноразмерных полупроводниковых гетероструктур.

Показана перспективность применения устройств с промежуточной энергетической подзоной и возможность их реализации на гетеропереходах I и II рода.

Серьёзное внимание автор уделил методикам, применяемым для исследования состава слоев, морфологических характеристик, электрических и оптических свойств и т.п. С особой тщательностью описаны технические особенности применяемого оборудования для ионно-лучевой кристаллизации, порядок подготовки материалов и методы контроля за технологическим процессом.

Исследованы эффекты низкоэнергетического распыления Si, Ge, GaAs, InAs. Определены коэффициенты распыления в диапазоне от нормального падения ионного пучка до слабо скользящего. Полученные значения открывают возможность управления эффективностью массопотока при ионно-лучевой кристаллизации. Исследования кинетики распыления GaAs, InAs позволили автору сделать заключение о нестехиометрическом характере указанного процесса на его начальной стадии.

Проанализированы условия смены механизмов кристаллизации наноструктур в зависимости от параметров гетеропары. Исследована

температурная зависимость структурных переходов в гетеросистеме Ge/Si(001), характерная для процесса ионно-лучевой кристаллизации. Определены условия, приводящие к увеличению средних размеров нанокластеров и смещению пиков фотолюминесценции в инфракрасную часть спектра.

Предложена феноменологическая модель массопереноса при ионно-лучевой кристаллизации, позволяющая определять плотность массопотока вблизи поверхности подложки. Исследованы особенности формирования фотоэлектрических наноструктур с промежуточной подзоной в зависимости от технологических параметров синтеза: температуры подложки, величины ионного тока, времени осаждения.

Определены условия размерного квантования в гетероструктурах Si/Ge, GaAs/InAs. Подробно проанализированы геометрические, фотолюминесцентные и емкостные характеристики выращенных однослойных и многослойных фотоэлектрических наноструктур с промежуточной подзоной.

Для описания спектральных и вольтамперных характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе квантово-размерной гетероструктуры InAs/GaAs автором предложена диффузионно-дрейфовая модель носителей заряда, основанная на методе переходных матриц. Рассчитанный коэффициент полезного действия солнечных элементов с квантовыми точками составил 17,2%, что на 3,4% выше, чем у солнечных элементов с аналогичной *p-i-n* архитектурой, но без квантовых точек в *i*-слое.

Степень обоснованности и достоверности положений, выводов и заключений.

Обоснованность выводов и заключений диссертанта основывается на корректной постановке задачи и глубокой методической проработке порядка и последовательности исследований и всех проведенных экспериментов. Тщательное описание применяемых в работе методов исследований не вызывает нареканий.

Исследование процесса ионно-лучевой кристаллизации фотоэлектрических наноматериалов и характеристик приборных устройств проводили с привлечением современных методов диагностики, таких как зондовая сканирующая микроскопия, электронная сканирующая и просвечивающая микроскопии, фотолюминесцентные методы, емкостные вольт-фарадные измерения, вольт-амперные измерения на имитаторе солнечного излучения, спектральные

исследования внешнего квантового выхода. Структурно-морфологические и фазовые исследования выполнены с применением апробированных методик: растровой и просвечивающей электронной микроскопии, электронографии, рентгеновского микроанализа, Оже-спектроскопии, рентгенографии, сканирующей зондовой микроскопии. Электрофизические параметры получены методами термостимулированной поляризации, ВФХ, ВАХ и т.п. Для объяснения полученных результатов использованы методы физико-математического моделирования.

Вместе с тем, нельзя не сделать ряд замечаний по представленным описаниям и заключениям автора.

Не вполне понятно, какие условия термодинамического равновесия имеет ввиду автор, рассматривая приближения для решения диффузионных уравнений (с.234-235)? Не представляется возможным осуществить апробацию диффузионно-дрейфовой модели носителей заряда, основанной на методе переходных матриц, предложенной автором: численные значения параметров модели, использованные в расчете, приведены не полностью и не систематизированы. Анализ модели проведен весьма скупо: возможные причины отклонения результатов моделирования от результатов экспериментов не обсуждаются (рис. 6.6, 6.7). Комментарий к результатам, представленным на рис.6.4, явно недостаточен: разработать и оптимизировать архитектуру (рис.6.5) фотоэлектрических устройств на основе проведенных автором расчетов весьма проблематично.

Следует указать на не совсем корректные иллюстрации - рис. 1.3, рис.1.7, приведенные в гл.1, в которых частично «потеряны» необходимые обозначения!

Изложение материала содержит не всегда удачные и обоснованные авторские словообразования и словосочетания: «астехиометрия», «квазиатом, состоящий из 2-х атомов», «измерения касательно тока...», «слои внедренных наноостровков создают подзону в запрещенной зоне...» и т.п. Гетеропереходы 1 и 2 рода, автор ошибочно называет гетероструктурами 1 и 2 рода .!

Однако, высказанные замечания, не ставят под сомнение основные результаты диссертационной работы.

Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертанта.

Проблемы, затронутые автором, тесно связаны с применением их в области современных высоких технологий. В работе сделан серьезный шаг на пути к реализации получения фоточувствительных приемников методами ионно-лучевой технологии с использованием фундаментальных явлений самоорганизации в конденсированных средах.

Результаты диссертационной работы представляют интерес для использования в учреждениях РАН, на предприятиях электронной промышленности, также для организаций, специализирующихся на создании и применении приборов фотоэнергетики и полупроводниковой электроники: ФГУП «НИИ «Полус» (Москва), ФГУП «НПО» Орион» (Москва), «ГИРЕДМЕТ» и др.

Соответствие критериям, предъявляемым к диссертациям.

Оценивая работу в целом, можно сказать, что она представляет собой законченное научное исследование; методы исследования современны и соответствуют поставленной задаче. Конкретное личное участие автора заключается в формулировании цели и задач исследования, выборе методов исследования, проведении экспериментов и интерпретации полученных результатов, разработке теоретических моделей ионно-лучевой кристаллизации и фотоэлектрического преобразователя с промежуточной подзоной. Роль соавторов в тексте диссертации оговаривается и сводится либо к проведению исследований свойств выращенных структур по заданным автором методикам, либо в помощи при подготовке программного кода.

Основные положения диссертации доложены на 18 научных конференциях, опубликованы в 21 статье из перечня ВАК, защищены 2 патентами РФ и 8 свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ. Содержание автореферата соответствует основным полученным результатам и защищаемым положениям.

Диссертация Чеботарева С.Н. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны физико-технологические основы ионно-лучевой кристаллизации полупроводниковых наноструктурированных материалов, позволившие получить и исследовать характеристики нового класса фотоэлектрических устройств с промежуточной подзоной на основе элементарных полупроводников A^4 и

полупроводниковых соединений A^3B^5 , что имеет важное значение для развития физики наногетероструктур и фотоэнергетики.

Считаю, что диссертационная работа Чеботарева Сергея Николаевича «Ионно-лучевая кристаллизация фотоэлектрических наноматериалов с промежуточной энергетической подзоной» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденных правительством Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г. (пп. 9 - 14), а ее автор, Чеботарев Сергей Николаевич, заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент – доктор
физико-математических наук, профессор
кафедры физической химии Санкт-Петербургского
государственного электротехнического университета
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)



12.05.2015

КУЗНЕЦОВ Владимир Владимирович

197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

Федеральное государственное автономное

образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

тел. +7(812) 346-17-23

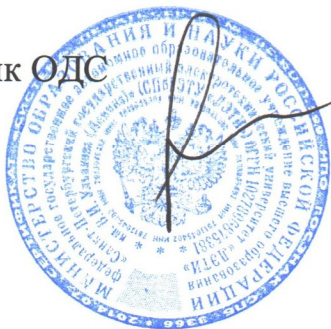
факс: +7(812) 346-27-58

e-mail: vvkuznetsov@inbox.ru

<http://www.eltech.ru/>

Подпись Кузнецова В.В. «ЗАВЕРЯЮ»

Начальник ОДС



Русяева Т.Л.