

## ОТЗЫВ

ведущей организации - Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) - на диссертацию **Шарова Владислава Андреевича** на тему: «Оптические и электронные явления в нитевидных нанокристаллах  $A^{III}B^V$  при механической деформации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников

Диссертационная работа Шарова В.А. посвящена экспериментальному исследованию оптических и электрофизических явлений, возникающих в полупроводниковых нитевидных нанокристаллах при упругих деформациях, близких к критическим.

### **Актуальность диссертационной работы.**

В работе Шарова В.А. объектом исследования являются полупроводниковые нитевидные нанокристаллы группы  $A_3B_5$  – квазиодномерные наноструктуры, характеризующиеся длиной до нескольких десятков мкм и латеральными размерами порядка 100 нм. Структуры такого типа активно исследуются мировым научным сообществом на протяжении последних 20 лет. Интерес к их изучению обусловлен рядом особенностей, вызванных квазиодномерной геометрией. К таким особенностям относятся возможность эпитаксиального синтеза сильно решеточно-рассогласованных

гетероструктур, в том числе АЗВ5 на кремнии, а также возможность получения вюрцитных АЗВ5. Кроме того, нитевидные нанокристаллы характеризуются на порядок большей, чем объемные и планарные полупроводники, механической прочностью, и могут выдерживать упругие деформации до 15%. По этой причине нитевидные нанокристаллы являются идеальными кандидатами для развития широко известного подхода к управлению зонной структурой полупроводника через упругие деформации. В то же время, влияние деформаций на физические свойства одиночных нитевидных нанокристаллов является слабо изученным. В связи с этим актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Диссертация Шарова В.А. состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 121 страницу, включая 61 рисунок и 4 таблицы. Список цитируемых источников содержит 197 наименований.

Во введении обоснована новизна и актуальность работы, приведены цели и задачи, приведены основные научные и практические результаты, сформулированы положения.

В первой главе приведен анализ литературы, посвященной нитевидным нанокристаллам, рассмотрены основные механизмы их эпитаксиального роста, а также механические, оптические и электрофизические свойства. Отдельно рассмотрены существующие экспериментальные подходы к созданию механических деформаций, а также влияние деформаций на физические свойства нанокристаллов.

Вторая глава содержит описание применяемых в работе экспериментальных методик – атомно-силовой микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Рассмотрены возможные конфигурации экспериментов по контролируемой деформации отдельных вертикальных и горизонтальных нитевидных нанокристаллов с помощью зонда атомно-силового микроскопа.



Каждая последующая глава представляет собой независимое научное исследование нитевидных нанокристаллов различного материала, кристаллической структуры и состава в присутствии упругих деформаций.

В третьей главе приведены результаты исследования пьезоэлектрических и фотовольтаических свойств вюрцитных нитевидных нанокристаллов арсенида галлия. В первой части главы исследована пьезоэлектрическая генерация импульсов электрического тока, возникающая в нитевидных нанокристаллах при их деформации зондом. Получена зависимость амплитуды токовых импульсов от деформации. Процесс генерации исследован также при освещении структуры надбарьерным светом, при котором наблюдается фотогенерация. Проведенные эксперименты подтверждают комбинацию пьезоэлектрических и фотовольтаических свойств в вюрцитном арсениде галлия. Во второй части главы исследованы вольтамперные характеристики нанокристаллов при сжатии по оси роста в присутствии надзонной засветки. Показано, что напряжение холостого хода в исследованной структуре падает при увеличении деформации. Построена численная модель, объясняющая экспериментальные результаты влиянием пьезоэлектрической поляризации и тензоэлектрического эффекта. Модель предсказывает увеличение эффективности фотопреобразования при одноосном сжатии в политипических нанокристаллах с аксиальным p-n переходом.

В четвертой главе показан новый механизм управления проводимостью нитевидных нанокристаллах InGaAs, основанный на приложении растягивающих упругих деформаций. Предложенный механизм работает при содержании индия порядка 0,8-0,85. В этом случае поверхностный уровень Ферми закрепляется в запрещенной зоне, вблизи дна зоны проводимости. Упругое растяжение смещает дно зоны проводимости вниз относительно уровня вакуума, не изменяя положение уровня Ферми. При достаточном уровне деформации дно зоны проводимости оказывается ниже уровня Ферми. Это приводит к возникновению поверхностного омического канала

омического канала проводимости и резкому увеличению тока на вольтамперной характеристике, что и было экспериментально показано Шаровым В.А.

В пятой главе автор исследует механизмы управления работой выхода нитевидных нанокристаллов фосфида галлия. Автором впервые получены количественные значения работы выхода вюрцитного [11-20] и сфалеритного [110] GaP – 4,2 и 4,34 эВ соответственно. Показано, что при наличии дефектов двойникования в сфалеритном нанокристалле работа выхода принимает промежуточное значение от 4,2 до 4,34 эВ и зависит от пространственной плотности дефектов. Экспериментальные данные подтверждаются численной моделью, в которой дефекты представлены в виде напряженных кристаллических квантовых ям – монослоев вюрцита в сфалеритной матрице. Также показано, что нанесение субмонослойной мышьяк-содержащей оболочки приводит к увеличению работы выхода GaP на 300 мэВ.

В шестой главе исследованы спектры комбинационного рассеяния напряженных нитевидных нанокристаллов GaP. Автором обнаружены новые нетривиальные деформационные эффекты расщепления фононных мод в рамановском спектре. Показано, что вид спектра связан с неоднородным распределением оптической мощности внутри кристалла. Области локализации поля генерируют более интенсивный сигнал комбинационного рассеяния. Автором построена численная модель, в которой с учетом моделирования распределения поля построен вид рамановского спектра, близкий к экспериментальному. Автор указывает на то, что возможно решение обратной задачи, в которой по виду спектра находится внутреннее распределение поля.

В заключении диссертации перечислены основные результаты работы.

#### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.**

Достоверность и обоснованность полученных научных результатов, выводов и положений достигается за счет использования автором



структуре образцов получены несколькими взаимно-дополняющими методами – РЭМ, ПЭС, ЭДС, КРС, АСМ. Автор уделяет внимание воспроизводимости результатов зондовых измерений, повторяя эксперимент на множестве нитевидных нанокристаллов. При теоретическом анализе результатов используются признанные физические модели и методы моделирования. Приведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными, в третьей главе получено хорошее количественное совпадение по форме вольтамперных характеристик, в пятой главе получено количественное совпадение поверхностного потенциала, в шестой главе получено качественное совпадение формы спектра комбинационного рассеяния.

Основные результаты представленных в диссертационной работе исследований опубликованы в 17 научных работах, из них 7 научных статей в первом квартале Scopus/WoS. Результаты работы представлялись на 14 российских и международных научных конференциях по тематике исследования.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость работы заключается в экспериментальном исследовании влияния крайне высоких одноосных упругих деформаций (4-5%) на зонную структуру и физические свойства полупроводника, что возможно только в геометрии нитевидного нанокристалла. Практическая значимость заключается в исследовании физических явлений, которые могут лечь в основу полупроводниковых устройств, характеристиками которых возможно управлять с помощью упругих деформаций.

#### **Рекомендации для использования результатов и выводов диссертационной работы.**

Результаты и выводы диссертации Шарова В.А. представляют интерес для многих ведущих ВУЗов и организаций, занимающихся исследованиями и производством приборов нового поколения, а конкретно МГУ, МИЭТ,

СПбГУ, СПбПУ, ВШЭ, ИТМО, Светлана-Рост, СПбГЭТУ (ЛЭТИ), Рязанский РТГУ, ННГУ, Воронежский ГУ и др.

**По материалам диссертационной работы имеются вопросы и замечания.**

1. Первая группа вопросов и замечаний обусловлена новизной результатов и отсутствием или сжатым описанием модельных представлений:

– В рамках какой модели объясняется физика пиннинга уровня Ферми на поверхности: барьер Шоттки, барьер Бардина или это объединенная модель?

– Изменяется ли структура поверхностных слоев при деформационном воздействии? Например, в литературе описываются случаи возникновения димеров мышьяка. Как это связано с изменением рамановских спектров? Есть ли изменения при повторных воздействиях зонда?

– При рассмотрении энергетической зонной диаграммы напряженных кристаллических квантовых ям нитевидных нанокристаллов (монослоев вюрцита в сфалеритной матрице) не понятно, учитывалось ли изменение энергетического положения квантовых ям при заполнении носителями заряда? Например, в сверхрешетке Делера квантовые ямы  $i$ -GaAs существенно изменяют свое положение в зависимости от того, в окружении  $n$ -AlGaAs или  $p$ -AlGaAs они находятся и, соответственно, заполняются электронами или дырками.

2. Вторая группа замечаний обусловлена погрешностями в оформлении диссертации.

– В работе имеются некорректные ссылки на рисунки. Например, ссылка на информацию, приведенную на рис.1.15 (стр.17), на самом деле относится к рис. 1.6.

– Пояснительный текст к гетерогранице структуры вюрцит-сфалерит в матрице GaAs иллюстрируется рис. 1.5, подпись под которым утверждает, что это GaP.



– Список сокращений не полный. Например, отсутствует сокращение ПБЭ (обменно-корреляционный потенциал Пердью-Бурен- Эрнцерхопфа).

Следует отметить, что в целом текст диссертации написан на хорошем научно-техническом языке.

В работе получен ряд уникальных результатов, приоритетное закрепление которых в виде патентов важно не только для автора, но и для организации, в которой выполнена работа. Особенно это важно для тех результатов, которые являются перспективными для создания тензодатчиков нового поколения.

Указанные вопросы и замечания не снижают общей ценности диссертационной работы и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации.

Работа представляется актуальной, является законченной и выполнена автором самостоятельно на достаточном научном уровне. Представленные в работе исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы. Автореферат отражает все этапы исследования, содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, рисунки, графики.

По объему, научной новизне полученных результатов, практическому значению и достоверности диссертационная работа Шарова В.А. полностью отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней. Автор диссертации Шаров Владислав Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Отзыв, составленный на основании ознакомления с текстом диссертации, автореферата и печатных работ, а также доклада Шарова В.А., рассмотрен и одобрен на заседании кафедры Микро- наноэлектроники

Санкт-Петербургского Государственного Электротехнического Университета  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) 19 декабря 2022года.

Присутствовало на заседании 43 чел. Результаты голосования: «за» — 43 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел., протокол № 11/22 от 19.12.2022 г.

Зам. заведующего кафедрой МНЭ  
по научной работе, д.ф.-м.н., профессор

В.А. Мошников/

Секретарь

Доцент каф. микро- наноэлектроники  
к.ф.-м.н.

О.А. Александрова/

Наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Почтовый адрес: 197376, Россия, С.-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5

E-mail: [info@etu.ru](mailto:info@etu.ru)

Телефон: +7 812 346-44-87

[www.etu.ru](http://www.etu.ru)