

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук
Филатова Дмитрия Олеговича
на диссертационную работу Шарова Владислава Андреевича на тему:
«Оптические и электронные явления в нитевидных нанокристаллах $A^{III}B^V$ при
механической деформации»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.11 — «Физика полупроводников»

Актуальность темы. Диссертационная работа В.А. Шарова посвящена исследованию оптических и электронных явлений в нитевидных нанокристаллах (ННК) на основе полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$. Данная тема является актуальной. Уменьшение размеров полупроводниковых приборов является доминирующей тенденцией современной твердотельной микроэлектроники. Однако, ННК получили на сегодняшний день меньшее распространение сравнительно с другими типами полупроводниковых наногетероструктур (планарные гетероструктуры и др.). В ННК возможно проявление квантоворазмерных эффектов, связанных с формированием одномерного (1D) электронного газа при соответствующих поперечных размерах ННК. С другой стороны, ННК получают методом самоорганизации в процессе рота по механизму пар-жидкость-твёрдое тело (ПЖТ), что перспективно с технологической точки зрения. К настоящему времени опубликовано значительное количество работ, посвящённых созданию и исследованию ННК на базе различных полупроводниковых материалов – как соединений типа $A^{III}B^V$, так и Ge, Si и др. Тем не менее, автору удалось найти и обосновать сравнительно малоисследованную, но, в то же время, интересную с фундаментальной точки зрения и практически важную область для диссертационного исследования – а именно, влияние деформаций на оптические и электрические свойства ННК. Как известно, деформация кристаллической решётки приводит к существенным изменениям зонной структуры и, как следствие, оптических и электронных свойств полупроводников. С практической точки зрения, на основе данных эффектов в ННК можно создать различные микромеханические устройства – тензометры, датчики перемещений и т.п. Всё вышесказанное свидетельствует об актуальности темы диссертационной работы В.А. Шарова, целью которой являлось изучение электронных, электромеханических и оптомеханических эффектов в одиночных ННК $A^{III}B^V$ при упругих деформациях.

В работе В.А. Шарова поставлены и успешно решены следующие задачи:

1. Разработка методов создания контролируемых деформаций в отдельных ННК с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ);
2. Исследование пьезоэлектрической генерации и фотовольтаических свойств напряженных ННК GaAs. Исследование возможности увеличения эффективности фотопреобразования солнечных элементов на основе ННК GaAs с помощью упругих деформаций;
3. Исследование проводимости вюрцитных ННК InGaAs различного состава и путей управления проводимостью с помощью упругих деформаций;

3. Исследование проводимости вюрцитных ННК InGaAs различного состава и путей управления проводимостью с помощью упругих деформаций;
4. Количественное исследование локальной работы выхода в политипических ННК GaP и механизмов ее изменения;
5. Исследование эффектов упругой деформации в спектрах комбинационного рассеяния света в напряженных ННК GaP.

Основным методом исследования в работе являлся метод АСМ. Данный метод широко применяется для как для исследования морфологии и различных физических свойств разнообразных нанообъектов, так и для осуществления локального (с локализацией в области до единиц нанометров) воздействия на эти нанообъекты (механического, электрического и др.). Отличительной особенностью диссертационной работы В.А. Шарова является применение метода АСМ как для контролируемого деформирования индивидуальных ННК, так и для измерения их электрических параметров. Для измерения локального значения контактной разности потенциалов (КРП) между поверхностью ННК и материалом покрытия АМ зонда использовался метод сканирующей Кельвин-зонд микроскопии (СКЗМ). Также применялись методы растровой и просвечивающей электронной микроскопии, дифракции быстрых электронов на отражение и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Таким образом, комплекс применённых методов экспериментальных исследований адекватен поставленным задачам.

Краткая характеристика основного содержания диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы, включающего 197 наименований. Объём диссертации составляет 121 страницу, включая 61 рисунок, 4 таблицы.

Во **Введении** аргументируется актуальность рассматриваемой темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показаны научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту и личный вклад автора в получение научных результатов работы, приводятся сведения об апробации работы и публикациях автора по теме диссертации, а также о структуре и объёме диссертации.

Первая глава представляет собой обзор литературы. В ней приводятся сведения об основных методах синтеза ННК на основе полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$, рассматриваются их оптические и электрофизические свойства. Особое внимание уделяется способам создания и практическому применению механических деформаций в ННК.

Во **второй главе** описаны физические основы экспериментальных методов исследования, применяемых в работе – АСМ и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР). Рассмотрены методики АСМ в области создания контролируемых деформаций в ННК. Описаны режимы АСМ, позволяющие исследовать электропроводность и работу выхода материала образца. Приведено описание экспериментальных установок.

В **третьей главе** приведены результаты исследований пьезоэлектрических и фотовольтаических свойств деформированных вертикальных ННК GaAs. Описаны разработанные способы создания контролируемых деформаций латерального изгиба и одноосного сжатия отдельных ННК с помощью зонда АСМ. При латеральном изгибе ННК

зарегистрирована генерация тока, обусловленная пьезоэлектрическим и пьезофототронным эффектами. Во второй части **Главы 3** описаны результаты экспериментальных (путем измерения ВАХ) и теоретического (путем моделирования ВАХ) исследований влияния одноосного сжатия на эффективность фотопреобразования ННК различной структуры и типа легирования.

В **четвёртой главе** методом измерения ВАХ характеристик исследовано влияние упругих деформаций на проводимость вертикальных ННК InGaAs

различного состава. Обнаружена модуляция проводимости ННК $\text{In}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$ при его упругой деформации вследствие тензорезистивного эффекта.

В **пятой главе** представлены результаты исследования локальной работы выхода горизонтальных ННК GaP в зависимости от кристаллической структуры и плотности дефектов. Рассмотрено влияние покрытия поверхности оболочкой GaAsP на работу выхода. Экспериментальные результаты, полученные с помощью градиентной СКЗМ, подтверждены теоретическими расчетами, основанными на теории функционала плотности, а также на совместном решении уравнений Шредингера и Пуассона.

В **шестой главе** изложены результаты исследований влияния деформации на спектры КР горизонтальных ННК GaP. Приведены экспериментальные результаты пространственного картирования спектров КР изогнутых ННК с уровнем деформации до 5%. Рассмотрено влияние поляризации возбуждения, геометрии ННК и материала подложки на форму спектров КР. Обнаружены новые индуцированные деформацией спектральные эффекты, приведено их теоретическое объяснение.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы, среди которых, на мой взгляд, можно выделить следующие:

1. Развита методика исследования электрофизических свойств вертикальных одиночных ННК при контролируемой деформации с использованием метода АСМ. Показана возможность измерения ВАХ деформированных ННК, используя зонд АСМ и как наноманипулятор, индуцирующий деформацию, и как электрический контакт. Разработаны методики создания как осевой деформации сжатия, так и латерального изгиба ННК.

2. Установлено, что в вюрцитных ННК $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при $x > 0,85$ возникает поверхностный канал проводимости, вызванных закреплением уровня Ферми в зоне проводимости. Растяжение ННК вдоль оси роста приводит к понижению энергии дна зоны проводимости относительно

положения закрепления уровня Ферми и формированию канала проводимости при меньших значениях x , что выражается в увеличении проводимости на 4 порядка величины. Данный эффект может найти применение в тензорезисторах на основе ННК.

3. Впервые проведено количественное экспериментальное исследование локальной работы выхода ННК GaP. Определено значение работы выхода в сфалеритном (4,34 эВ) и вюрцитном (4,2 эВ) GaP и показано, что при наличии дефектов двойникования работа выхода принимает промежуточные значения. Предложены методы управления работой выхода в пределах 4,2-4,75 эВ путем комбинации кристаллических фаз и нанесения As-оболочки.

4. Впервые исследованы спектры КР упруго-напряжённых ННК GaP. обнаружены новые спектральные эффекты расщепления фононных мод, связанные с неоднородной

локализацией электрического поля внутри ННК. Показано, что характером локализации можно управлять, изменяя пространственное положение пятна возбуждения.

Результаты диссертационного исследования имеют высокую научную значимость и существенную практическую ценность для разработки в дальнейшем различных нано- и оптоэлектронных приборов на основе ННК из полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ (фотопреобразователей, тензометров и др.).

Обоснованность и достоверность положений и выводов. Все полученные в работе результаты являются достоверными, а выводы – обоснованными. Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечивается их повторяемостью и воспроизводимостью, применением современного высокоточного оборудования, а также согласованностью данных различных взаимодополняющих друг друга экспериментальных методов. Результаты находятся в соответствии с данными, полученными ранее другими авторами, а также с результатами математического моделирования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 14 международных и Российских научных конференциях, а также научных семинарах ФТИ им. А. Ф. Иоффе и СПБАУ им. Ж. И. Алферова.

При знакомстве с работой возникли следующие **вопросы и замечания**

1. В тексте диссертации говорится, что для измерения локальных значений работы выхода электрона из материала ННК использовался метод СКЗМ. Фактически, в данном методе измеряется КРП между материалами зонда и образца. В первом приближении, КРП, действительно, равна разности работ выхода электрона из материалов зонда и образца. Известно, однако, что на величину КРП влияют заряд поверхности образца (в частности, заряд на поверхностных состояниях), загрязнения поверхности, адсорбат, поверхностная фотоЭДС и пр., что может приводить к ошибкам при определении работы выхода методом СКЗМ. Поэтому, представляется более строгим в научном плане говорить об измерениях КРП, чем об измерениях работы выхода электрона из материала образца методом СКЗМ.
2. Значительная часть главы 2 посвящена описанию физических основ и общих принципов метода АСМ. Поскольку данный метод стал широко распространённым, вызывает сомнение целесообразность данного описания. На мой взгляд, было бы более уместным сосредоточиться на более подробном описании оригинальных методик исследования, развитых в рамках рассматриваемой диссертационной работе.
3. Как известно, при анализе данных АСМ весьма важную роль играет учёт эффекта конволюции, вызванного конечными размерами АСМ зонда. Из текста диссертации не ясно, как влиял эффект конволюции на измерения локальной КРП горизонтальных ННК и как он учитывался при обработке результатов измерений методом СКЗМ.
4. На с. 90 употребляется термин «вязкость разрушения». Из контекста, можно предположить, что автор имел в виду предельную упругую деформацию ННК до разрушения.
5. В тексте диссертации встречаются термины, не являющиеся общепринятыми в русскоязычной научной литературе, например: «надзонная засветка» (правильно – «межзонное фотовозбуждение»), «напряжение холостого хода» (правильно – «фотоЭДС холостого хода»); «уравнение Шредингера-Пуассона» (правильно «совместное решение

уравнений Шрёдингера и Пуассона)), «самокаталитический» (правильно – «автокаталитический») и др.

Высказанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общее положительное заключение по диссертации.

Общее заключение. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных экспериментальных методов, внутренней непротиворечивостью и логической стройностью изложения материала. Результаты находятся в соответствии с данными, полученными другими авторами и с результатами математического моделирования. Выводы диссертации являются обоснованными. Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в работах, опубликованных в научных изданиях, включённых в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» ВАК. Автореферат адекватно отражает основное содержание диссертации.

Диссертация соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой получены новые знания о влиянии упругих деформаций на электрофизические и оптические свойства нитевидных нанокристаллов на основе полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$. Представленные автором результаты вносят существенный вклад в развитие физики полупроводниковых наноструктур и, несомненно, будут востребованы при разработке новых нано- и оптоэлектронных приборов на основе полупроводниковых нитевидных нанокристаллов. Автор диссертации, Шаров Владислав Андреевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 — «Физика полупроводников».

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук, доцент
ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра
«Физика твердотельных наноструктур»
федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

(подпись)

Д. О. ФИЛАТОВ
(расшифровка подписи)

Подпись Филатова Д.О. заверяю
Учёный секретарь федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

Л.Ю. Черноморская

«19» января 2023 г.

Почтовый адрес: 603 950 г. Нижний Новгород,
Проспект Гагарина д. 23. Корп. 3
Тел.: +7 910 7797 9536
E-mail: dmitry_filatov@inbox.ru