

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Голубка Александра 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. Диссертация Шарова В.А. посвящена исследованию упруго-напряженных полупроводниковых нитевидных нанокристаллов (ННК) различных материалов группы АЗВ5. Актуальность темы исследования обусловлена тем, что ННК являются одними из базовых элементов наноэлектроники. Обладая высокой долей поверхностных атомов, по своим свойствам они выгодно отличаются от объемных материалов, что может быть использовано для создания нового поколения устройств оптоэлектроники, наноэлектроники, фотовольтаики и наномеханики. Проявление в ННК размерных эффектов, связанных с их квазиодномерной геометрией, позволит расширить полупроводниковую элементную базу. Известно, что упругая деформация полупроводникового материала вызывает изменение зонной структуры, а следовательно, и физических свойств. Этот эффект давно используется в ряде прикладных областей, например, в вертикально-излучающих лазерах. При этом максимальный уровень деформаций, доступный в объемных и тонкопленочных полупроводниках, ограничен их механической прочностью. Для ННК характерна повышенная прочность, что позволяет увеличить диапазон модуляции зонной структуры и открывает перспективы для создания различных микро – и наноэлектромеханических устройств на базе ННК.

Научная новизна. На сегодняшний день механизмы роста и свойства ННК большинства используемых в микро- и нанотехнологиях материалов АЗВ5 являются хорошо изученными. Однако, исследования деформационных явлений в ННК представляет собой новое развивающееся научное направление, получившее название «пьезотроника» и «стрейнтроника». Научная новизна работы подчеркивается тем, что в ней получены оригинальные результаты в рамках нового научного направления: изучены электронные, электромеханические и оптомеханические эффекты в одиночных ННК (из GaP и вюрцитных GaAs и InGaAs материалов) при упругих деформациях.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость представленных в диссертации результатов состоит в получении новых фундаментальных данных о физических явлениях, возникающих при упругой деформации ННК и создании адекватных физических моделей наблюдаемых явлений. Практическая значимость заключается в возможности применения этих явлений для развития полупроводниковых приборов на основе ННК.

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

Во **Введении** аргументируется актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы выносимые на защиту положения, указан личный вклад автора в

получение научных результатов, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора по теме диссертации.

Первая глава представляет собой литературный обзор, посвященный существующим методам синтеза нитевидных нанокристаллах АЗВ5. Рассматриваются механические, оптические и электронные свойства ННК, отдельно рассматриваются методы создания и практическое применение упругих деформаций в ННК.

Во **второй главе** описаны физические принципы, лежащие в основе применяемых автором экспериментальных методов исследования ННК: атомно-силовой микроскопии (АСМ) и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР), а также приведено описание экспериментальных установок. Метод АСМ является основным методом, используемым автором, причем он применяется как для контролируемой деформации ННК в различных геометриях, так и для измерения их топографии, вольтамперных характеристик и работы выхода. Разработаны методики создания как осевой деформации сжатия, так и латерального изгиба ННК. Рассмотрены электрические методики АСМ: АСМ с проводящим зондом для измерения пьезоотклика и ВАХ одиночных ННК, микроскопия зонда Кельвина (КЗМ) и градиентная Кельвин-зонд микроскопия (ГКЗМ) для измерения работы выхода на разных участках ННК.

В первой части **третьей главы** приведены результаты исследований пьезоэлектрических свойств вертикальных вюрцитных ННК GaAs и влияния латеральной деформации на фотовольтаические свойства. Предложен способ создания контролируемых деформаций латерального изгиба отдельных ННК с помощью зонда АСМ. При латеральном изгибе ННК зарегистрирована импульсная генерация тока, обусловленная пьезоэлектрическим и пьезофототронным эффектами.

Во второй части **третьей главы** исследуется влияние одноосного сжатия ННК на фотовольтаические свойства. Описаны результаты экспериментального и теоретического исследования вольтамперных характеристик ННК при различной степени деформации, а также проведено их численное моделирование. Показано уменьшение фотоЭДС холостого хода в вюрцитных ННК при деформации. Вместе с этим, путем моделирования предложена политипическая структура p-n GaAs ННК, сочетающая вюрцитные и сфалеритные сегменты, в которой деформация приводит к увеличению фотоЭДС.

В **четвёртой главе** путем измерения ВАХ с помощью АСМ исследовано влияние упругих деформаций на проводимость вертикальных вюрцитных ННК InGaAs различного состава. Установлено, что в случае высокого (>0.85) содержания индия в недеформированном ННК возникает поверхностный канал проводимости, вызванный закреплением поверхностного уровня Ферми в зоне проводимости. Обнаружен эффект увеличения проводимости ННК на 3-4 порядка при упругой деформации ННК с меньшим содержанием индия (<0.85). Эффект объясняется тем, что растяжение ННК вдоль оси роста приводит к понижению энергии дна зоны проводимости относительно положения закрепления уровня Ферми и формированию канала проводимости, что выражается в увеличении проводимости. Данный эффект может найти применение в тензорезисторах на основе ННК.

В **пятой главе** методом градиентной КЗМ исследована локальная работа выхода ННК GaP в зависимости от кристаллической структуры (сфалерит, вюрцит) и плотности дефектов двойникования. ННК перенесены на пиролитический графит для более точного

количественного анализа работы выхода. Рассмотрено влияние покрытия поверхности оболочкой GaAsP на работу выхода. Экспериментальные результаты, полученные с помощью градиентной ГКЗМ, подтверждены теоретическими расчетами. 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.

В **шестой главе** приведены результаты исследований влияния деформации на спектры КР горизонтальных ННК GaP, полученные путем пространственного картирования. С помощью зонда АСМ в отдельных ННК были получены деформации до 5%. Рассмотрено влияние поляризации возбуждения, геометрии ННК и материала подложки на форму спектров КР. Обнаружены новые спектральные эффекты расщепления фоновых мод, связанные с неоднородной локализацией оптической накачки внутри ННК.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы и предложены дальнейшие направления исследований в данной теме.

Обоснованность и достоверность положений и выводов. Полученные результаты являются достоверными, а выводы – обоснованными. Экспериментальные результаты получены на современном высокоточном оборудовании. Помимо АСМ в работе применяются различные взаимодополняющие экспериментальные методики, такие как сканирующая электронная и просвечивающая электронная микроскопия, дифракция быстрых электронов на отражение, энергодисперсионный рентгеновский микроанализ. Согласованность результатов, полученных разными методами, позволяет получить более полную информацию об образцах. Кроме того, экспериментальные результаты находятся в соответствии с данными, полученными методами численного моделирования. Результаты диссертационной работы были многократно апробированы на международных научных конференциях и семинарах. По результатам работы опубликовано 16 статей в рецензируемых журналах, в том числе 5 работ в журналах Q1.

Результаты диссертационного исследования представляют интерес с фундаментальной точки зрения, а также обладают практической ценностью для разработки различных наноэлектромеханических и оптоэлектронных устройств на основе напряженных ННК АЗВ5 (солнечных элементов, датчиков давления и т.п.)

Автореферат верно отражает основные положения диссертации и соответствует ее содержанию.

При знакомстве с работой возникли следующие вопросы и замечания:

1. Несмотря на то, что метод сканирующей силовой микроскопии является основным используемым в работе методом, автор, на наш взгляд, излишне поверхностно останавливается на его описании в Главе 2, допуская при этом неточности. В частности, на стр. 32 сказано, что на малых расстояниях зонд испытывает отталкивание от образца, описываемое потенциалом Леннарда-Джонсона, что, вообще говоря, правильно, но не для используемого в работе полуконтактного режима, в котором, как известно, основой вклад в силу отталкивания вносит упругое

взаимодействие, описываемое моделью Герца. Также вызывает сомнение приведенное на стр.31 выражение для смещения трубчатого пьезосканера в плоскости образца. Спорно и утверждение на стр.34 о том, что в режиме сканирования на постоянной высоте петля обратной связи (ОС) намеренно разомкнута. В литературе режимом постоянной высоты называют режим сканирования, в котором частота полезного сигнала выше частоты среза следящей системы, так что слежение за полезным сигналом, действительно, отсутствует, но при этом петля ОС не размыкается, а остается замкнутой для компенсации тепловых дрейфов и низкочастотных механических вибраций.

2. В работе на поверхность вертикально стоящих ННК GaAs наносилась пассивирующая оболочка $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ толщиной 7 нм. Хотелось бы узнать, как измерялась толщина этого слоя?

3. В обсуждении экспериментов по регистрации пьезоэлектрического тока от одиночных вертикальных ННК в режиме постоянной высоты с отключённой петлёй ОС утверждается, что зонд сталкивается с боковой поверхностью ННК и, изгибая его, проскальзывает на вершину ННК, что проиллюстрировано на рис.3-3. На чем основывается утверждение о проскальзывании?

4. При численном моделировании механической деформации ННК использовались справочные значения для модуля Юнга и коэффициента Пуассона. По-видимому, эти данные относились к объёмным материалам. Насколько они соответствуют материалу в форме ННК? Почему не определялся модуль Юнга для конкретного одиночного ННК? Это можно было бы сделать, например, путём измерения частоты резонансных колебаний ННК, наблюдая за ними в СЭМ.

5. При исследовании влияния упругой деформации на проводимость ННК петля ОС разрывалась, и перемещение зонда вдоль направлений Z измерялось косвенно через подаваемое на пьезосканер электрическое напряжение. При этом температурный дрейф мог приводить к неточности измерения перемещений в нанометровом диапазоне. На какое время отключалась петля ОС, и какой при этом была величина температурного дрейфа?

6. На стр. 93 сказано, что в соответствии с теорией деформационного потенциала одноосные деформации сжатия и растяжения приводят к красному и синему смещению рамановских мод в ННК соответственно, однако приведенные на рис.6-4д экспериментальные данные показывают, что сжатие приводит к синему, а растяжение к красному смещениям.

7. Не все используемые в диссертации сокращения внесены в список сокращений (например, ЭДС, СВМ, ВВМ), что затрудняет чтение текста, имеются опечатки и стилистические огрехи (стр. 10, 52, 67, 87, 88, 89, 100, 102)

Сделанные замечания имеют не принципиальный характер, не влияют на достоверность и значимость полученных в диссертации результатов. Поставленные в диссертации задачи решены, она является самостоятельной, законченной научно-исследовательской работой на актуальную тему и обладает научной новизной.

Общее заключение.

По значимости полученных результатов и научному уровню 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. Автор диссертации, Шаров Владислав Андреевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 — «Физика полупроводников».

Голубок Александр Олегович

д.ф-м.н., г.н.с.,

зав. отделом «Методы и приборы нанотехнологий»,

зав. лаб. «Сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии»,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт аналитического приборостроения Российской академии наук.

Санкт-Петербург, 198095, ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А.

Контактный телефон: +7(921) 964-27-10

E-mail: aogolubok@mail.ru

31. 01. 2023 г.