

Суютин Дмитрий Борисович

**Электронный транспорт в
разветвленных нитевидных нанокристаллах InAs**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в отделе микроэлектроники НИИЯФ Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Солдатов Евгений Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Зайцев-Зотов Сергей Владимирович

доктор физико-математических наук
Цырлин Георгий Эрнстович

Ведущая организация: *Воронежский государственный
технический университет*

Защита состоится ___ октября 2009 года в _____ на заседании Диссертационного Совета Д 501.002.01 в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, дом 1, строение 2, физический факультет, ауд. _____

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан ___ сентября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.002.01

Лаптинская Т.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Настоящая работа посвящена исследованию электронного транспорта в разветвленных нитевидных нанокристаллах арсенида индия (**InAs**) и направлена на изучение актуальных вопросов физики твердотельных наноструктур, а также на решение прикладной задачи создания новых функциональных элементов наноэлектроники.

Получаемые в процессе сборки из атомов полупроводниковые нитевидные кристаллы с характерными размерами в нанометровом диапазоне являются уникальными твердотельными объектами, поскольку являются квазиодномерными наноструктурами и позволяют исследовать низкоразмерные системы с их уникальными свойствами [1, 2, 3]. Помимо этого, благодаря особенностям синтеза и близости в таком кристалле всех атомов к поверхности, число дефектов в нитевидных нанокристаллах намного меньше, чем в объемном материале, что определяет такие уникальные свойства нитевидных нанокристаллов, как, например, высокая удельная прочность [4] и возможность комбинации внутри одного нанокристалла материалов, несовместимых в объемных структурах [5]. Благодаря уже достигнутой высокой степени контроля над различными параметрами, нитевидные нанокристаллы рассматриваются сегодня как перспективные наноструктуры для реализации электронных схем нового поколения [6, 7, 8].

Нитевидные нанокристаллы InAs особенно привлекательны для изучения электронного транспорта в низкоразмерных структурах, поскольку малая эффективная масса электрона в InAs способствует проявлению квантовомеханических эффектов в транспорте электронов через такие нанокристаллы. Малая эффективная масса также может обеспечить высокую скорость переключения электронных элементов на основе нитевидных

нанокристаллов InAs, а малая ширина запрещенной зоны InAs может обеспечить их малое энергопотребление.

При исследовании электрофизических свойств твердотельных наноструктур, таких, как нитевидные нанокристаллы, особенности электронного транспорта зачастую определяются электрическими контактами [9], и только наличие стабильного и низкоомного контакта может позволить изучить электрофизические свойства самих наноструктур. Несмотря на ожидание, что свойства электрических контактов к твердотельным наноструктурным элементам в будущем будут определяющими для свойств наноэлектронных цепей, возможность создания электрических контактов к наноструктурам на сегодня недостаточно изучена, поэтому изучение возможности создания низкоомных, надежных и воспроизводимых электрических контактов к твердотельным наноструктурам является весьма актуальной задачей.

Недавно внимание научной общественности было привлечено демонстрацией синтеза разветвленных нитевидных нанокристаллов [10, 11, 12] и формированием соединений при помощи таких разветвлений [13]. Несмотря на проведенные к настоящему моменту обширные исследования различных твердотельных свойств нитевидных нанокристаллов, электрофизические свойства разветвленных нанокристаллов, обладающих огромным потенциалом для построения нового поколения электронных схем сверхвысокой степени плотности методом сборки из атомов, до сих пор были недостаточно исследованы [9]. Поэтому весьма актуальным представляется исследование электрофизических свойств разветвленных нитевидных нанокристаллов и особенностей транспорта электронов в таких наноструктурах.

Диссертационная работа выполнена в отделе микроэлектроники НИИЯФ МГУ в соответствии с госбюджетной тематикой, направление 8 «Исследование наноструктур: физика, технологии, применение», подраздел 8.2 «Исследование процессов в наноструктурах и устройствах на их основе», 01.9.80004276.

Цель работы – установление закономерностей электронного транспорта в разветвленных нитевидных нанокристаллах InAs, определение их структурных параметров и электрофизических свойств, а также демонстрация возможности реализации функциональных наноэлектронных элементов на базе разветвленных нанокристаллов.

В соответствии с поставленной целью исследования решались следующие основные задачи:

1. Разработка методики синтеза разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs с применением метода химической пучковой эпитаксии и изучение их кристаллической структуры.
2. Разработка метода прецизионного совмещения элементов тонкопленочных контактных проводов, формируемых с помощью электронной литографии, с точкой ветвления разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs (местом стыка основного нанокристалла и ответвления).
3. Разработка методики изготовления воспроизводимых омических контактов к индивидуальным нитевидным нанокристаллам InAs, изучение характеристик таких электрических контактов.
4. Изучение электрофизических свойств разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs и установление закономерностей электронного транспорта в них.
5. Исследование возможности использования разветвленных нитевидных нанокристаллов для реализации функциональных элементов наноэлектроники.

Объект исследования. Объектом исследования в данной работе являются одиночные обычные и разветвленные нитевидные нанокристаллы InAs, выращенные методом химической пучковой эпитаксии из золотой каталитической частицы на поверхности подложки InAs.

Предмет исследования. Предметом исследования являются характеристики контактных соединений к индивидуальным нитевидным нанокристаллам InAs, структурные и электрофизические свойства разветвленных нитевидных

нанокристаллов InAs, а также особенности электронного транспорта в таких нанокристаллах. Также исследуется возможность применения разветвленных нанокристаллов для построения нового поколения электронных схем сверхвысокой степени плотности.

Научная новизна работы определяется следующими, впервые полученными результатами:

- Разработана и научно обоснована методика и технологические приемы синтеза разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs с применением метода химической пучковой эпитаксии.
- Разработана лабораторная методика прецизионного совмещения элементов тонкопленочных контактных проводов с точкой ветвления разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs.
- Разработаны физико-химические основы технологических операций обработки поверхности нитевидных нанокристаллов InAs в водных растворах $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$, обеспечивающие изготовление воспроизводимых омических контактов к нитевидным нанокристаллам InAs при минимальном травлении полупроводникового материала таких нанокристаллов.
- Установлено, что соединения нитевидных нанокристаллов, в отличие от соединений макроскопических проводов, имеют перестраиваемые нелинейные электрические характеристики, обусловленные сочетанием режимов диффузионного и баллистического транспорта электронов, а также режимом самоблокировки.

Практическая значимость работы.

- Показана принципиальная возможность синтеза разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs методом химической пучковой эпитаксии и получены лабораторные образцы таких нанокристаллов.
- Предложен метод оценки длины свободного пробега электронов в нитевидных нанокристаллах.
- Выработаны рекомендации по применению разветвленных нитевидных

нанокристаллов InAs для изготовления функциональных наноэлектронных элементов, работающих в мегагерцовом диапазоне частот при комнатной температуре. На примере смесителя частот и детектора фаз продемонстрирована их работоспособность.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся:

1. Метод синтеза разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs посредством химической пучковой эпитаксии.
2. Метод изготовления воспроизводимых низкоомных электрических контактов к одиночным нитевидным нанокристаллам InAs.
3. Результаты, иллюстрирующие нелинейный характер электронного транспорта в разветвленных нитевидных нанокристаллах InAs, обусловленный различными режимами переноса электронов: диффузионным, баллистическим, а также режимом самоблокировки.
4. Рекомендации по применению разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs для изготовления функциональных наноэлектронных элементов, работающих в мегагерцовом диапазоне частот при комнатной температуре.

Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается комплексным использованием широко известных, часто применяемых и доказавших свою надежность и достоверность экспериментальных методов исследований. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций работы подтверждается согласием полученных экспериментальных данных с теоретически предсказанными характеристиками. Выводы, полученные в данной работе, согласуются с результатами работ других авторов

Личный вклад автора. В диссертации изложены результаты, полученные автором лично, либо при его непосредственном участии. Автор лично выдвигал идеи, предлагал пути решения поставленных задач, проводил основные эксперименты, обрабатывал и обобщал экспериментальные результаты. Автор лично разработал физико-химические основы технологических операций

обработки поверхности нитевидных нанокристаллов InAs в водных растворах $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ при минимальном травлении полупроводникового материала таких нанокристаллов. Автор лично разработал лабораторную методику прецизионного совмещения элементов тонкопленочных контактных проводов с точкой ветвления разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs. Автор лично установил, что соединения нитевидных нанокристаллов, в отличие от соединений макроскопических проводов, имеют перестраиваемые нелинейные электрические характеристики и разработал рекомендации по применению разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs для изготовления функциональных наноэлектронных элементов. Совместно с соавторами автор осуществлял постановку задач исследований, определял методы их решения, разрабатывал методики, разрабатывал и изготавливал измерительное оборудование для комплексных исследований электрофизических свойств разветвленных нитевидных нанокристаллов, проводил исследования, анализировал и обсуждал экспериментальные результаты, осуществлял написание статей. Вклад коллег отражен в совместных публикациях.

Публикации. Основные результаты проведенных исследований опубликованы в восьми печатных работах, список которых приведен в конце автореферата. В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателю принадлежит: постановка задачи исследования [1, 2, 4-7], проведение экспериментов [1-8], анализ экспериментальных результатов [1-8], разработка методик [1-8], обсуждение полученных результатов [1-8].

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы, ее положения и выводы доложены, обсуждены и вызвали положительную оценку на следующих научных конференциях и симпозиумах:

- Международная конференция по одномерным наноматериалам – 2007 (ICON), Мальмо, Швеция.
- Международная конференция по микро- и наноинженерии – 2007 (MNE), Копенгаген, Дания.

- Международная конференция по физике полупроводников – 2006 (ICPS), Вена, Австрия.
- Оресундский симпозиум по исследованиям наноструктур – 2006, Копенгаген, Дания.
- Международная конференция по физике и технологии наноструктур – 2006 (Nanostructures: physics and technology), Санкт-Петербург, Россия.
- Международная конференция по микро- и наноинженерии – 2005 (MNE), Вена, Австрия.
- Международная летняя школа и симпозиум – 2005 (Niels Bohr Summer Institute), Копенгаген, Дания.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы 159 страниц. Работа содержит 40 рисунков и список цитируемой литературы из 153 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и важность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, обозначены объект и предмет исследования, кратко описана структура диссертации, описана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, описан личный вклад автора, апробация работы, приведен список печатных работ, в которых отражено основное содержание диссертации.

Первая глава (Обзор литературы) состоит из четырех частей и содержит обзор литературы по теме диссертации.

Во введении кратко описано современное состояние исследований твердотельных структур, а также история развития твердотельных полупроводниковых структур.

В первой части рассмотрены общие особенности полупроводниковых наноструктур и некоторые размерные эффекты, которые могут наблюдаться в таких наноструктурах.

Во второй части первой главы проведен краткий обзор работ по синтезу нитевидных нанокристаллов, исследованиям свойств нитевидных нанокристаллов и наноэлектронным элементам на их основе. Приведены литературные данные о свойствах и характеристиках объемного InAs и нитевидных нанокристаллов InAs.

В третьей части описаны особенности мезоскопических соединений электрических проводов, приведен обзор исследований электронного транспорта в мезоскопических соединениях проводов и электронных элементов на их основе.

В конце первой главы, в четвертой части, на основании представленных литературных данных сформулирована цель работы и определены задачи исследования.

Во второй главе (Материалы и методы исследования) представлены материалы и методы исследования, включая некоторые оригинальные методики, разработанные в ходе данной работы, а также некоторые оригинальные результаты. Вторая глава состоит из четырех частей.

В первой части второй главы описана установка химической пучковой эпитаксии, а также метод синтеза нитевидных нанокристаллов InAs, использованных в данной работе. Суть метода синтеза разветвленных нанокристаллов состоит в том, что такие нитевидные нанокристаллы получаются в процессе синтеза вторичных нанокристаллов (ответвлений) на основных нанокристаллах (основаниях) [10]. В основе синтеза нитевидных кристаллов лежит кристаллизация преимущественно в одном направлении за счет использования катализаторов роста [14]. Диаметр оснований и ответвлений получаемых нанокристаллов определяется размером золотых частиц, используемых в качестве катализатора роста. В данной работе впервые разветвленные нитевидные нанокристаллы InAs были получены методом химической пучковой эпитаксии.

Также в этой части приведены результаты исследований структурных свойств нитевидных нанокристаллов InAs при помощи просвечивающего электронного микроскопа. Представленные результаты показывают, что полученные в данной работе разветвленные нитевидные нанокристаллы InAs имеют гексагональную (вюрцитную) кристаллическую структуру с дефектами упаковки, а ответвления этих нанокристаллов растут перпендикулярно основным нанокристаллам, ориентированным в направлении $[000-1]$, в кристаллографических направлениях $\langle -1100 \rangle$, эпитаксиально продолжая кристаллическую структуру своего основания и свидетельствуя о бездефектной природе механизма ветвления.

Во второй части второй главы описана лабораторная методика изготовления электрических контактов к нитевидным нанокристаллам. Суть данной методики состоит в том, что нанокристаллы InAs механически переносятся на непроводящую поверхность, после чего к ним при помощи электронной литографии и термического напыления изготавливаются электрические контакты. Перенесение нитевидных нанокристаллов InAs на подложку кремния со слоем оксида кремния толщиной 100 нм производилось с помощью безворсовой салфетки непосредственно с ростовой подложки. До переноса нанокристаллов на такой подложке кремния создавались макроскопические контактные провода, опорная координатная сетка, а также метки совмещения. Формирование электрических контактов между индивидуальными нитевидными нанокристаллами и макроскопическими контактными площадками производилось в процессе электронной литографии с учетом положения нитевидных нанокристаллов. Для определения положения нитевидных нанокристаллов сразу после их перенесения производилась инспекция образца либо при помощи растрового электронного микроскопа, либо при помощи оптического микроскопа. Положение нанокристаллов определялось по отношению к опорной координатной сетке на подложке. В качестве электронного резиста для электронной литографии использовался полиметилметакрилат (ПММА) с молекулярной массой 950000. После проявления электронного резиста перед напылением контактной

металлической пленки производилась обработка поверхности нитевидного нанокристалла в кислородной плазме и в теплом водном растворе полисульфида аммония, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$. Металлическая пленка никеля толщиной 25 нм и пленка золота толщиной 90 нм наносились на всю поверхность образца методом термического напыления. Удаление металлической пленки с неэкспонированных участков образца производилось в ацетоне.

При изготовлении электрических контактов к разветвленным нитевидным нанокристаллам особенно важным оказалось произвести прецизионное совмещение формируемой структуры тонкопленочных контактных проводов с точкой ветвления нитевидного нанокристалла. В данной работе определяющими для точности такого совмещения были два параметра: (1) точность определения положения нитевидного нанокристалла, (2) точность выравнивания электронного пучка по отношению к образцу в процессе электронной литографии. Разработанная лабораторная методика прецизионного совмещения элементов тонкопленочных контактных проводов, создаваемых с помощью электронной литографии, позволила совмещать контактные провода с точкой ветвления нитевидных нанокристаллов с точностью выше 20 нм. Такая методика позволяет проводить исследования электрофизических свойств сверхмалых объектов и, таким образом, создает основу для реализации новых наноэлектронных элементов.

В третьей части второй главы описана методика исследования электрофизических свойств нитевидных нанокристаллов InAs и электронного транспорта в разветвленных нитевидных нанокристаллах InAs. Исследование нитевидных нанокристаллов InAs в данной работе проводилось при помощи: (1) измерений вольт-амперных характеристик (**ВАХ**) между любыми двумя контактами, при этом потенциал третьего контакта оставался плавающим; (2) измерений проводимости между любыми двумя контактами, при этом потенциал третьего контакта оставался плавающим. Для исследования разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs дополнительно использовались: (3) измерения напряжения на контакте к ответвлению при антисимметричном

задании напряжения на контактах к левому и правому проводам относительно общей точки; (4) измерения напряжения на контакте к ответвлению при одностороннем задании напряжения на контакте к левому (правому) проводу и фиксации напряжения на контакте к правому (левому) проводу относительно общей точки. Разветвленный нитевидный нанокристалл InAs с изготовленными тонкопленочными контактными проводами, а также схема его подключения для измерения напряжения показаны на рис. 1. Измерения производились как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого гелия при различных напряжениях, подаваемых на общий затвор. В качестве общего затвора использовалась подложка кремния, отделенная от исследуемого образца слоем SiO₂ толщиной 100 нм.

В четвертой части второй главы, на основании представленных в данной главе оригинальных результатов и методик, сформулированы выводы.

Таким образом, во второй главе представлена методика создания разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs в процессе химической пучковой эпитаксии. Показано, что выращенные таким методом разветвленные нитевидные нанокристаллы имеют гексагональную кристаллическую структуру, а ответвления этих нанокристаллов растут перпендикулярно основным нанокристаллам в кристаллографических направлениях $\langle -1100 \rangle$, продолжая их кристаллическую структуру. Описана лабораторная методика изготовления электрических контактов к нитевидным нанокристаллам, а также лабораторная методика совмещения с точностью выше 20 нм тонкопленочных контактных проводов, формируемых с помощью электронной литографии, с наноструктурами. Также представлена методика исследования электрофизических свойств нитевидных нанокристаллов InAs и электронного транспорта в разветвленных нитевидных нанокристаллах InAs.

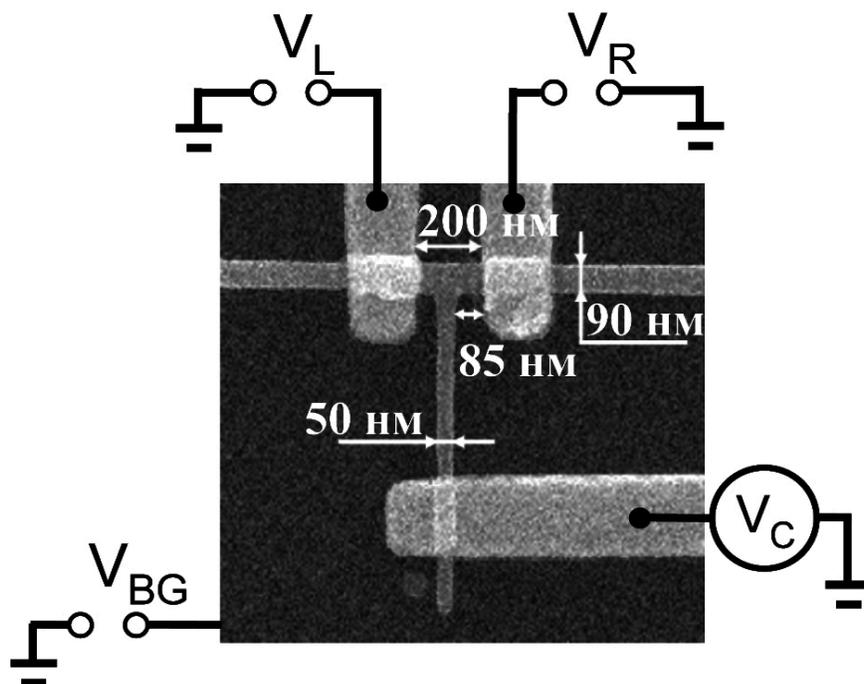


Рис. 1. Разветвленный нитевидный нанокристалл InAs с изготовленными тонкопленочными контактными проводами и схема его подключения для измерения напряжения.

В третьей главе (Электрические контакты к нитевидным нанокристаллам InAs), описаны исследования, проведенные для разработки методики изготовления воспроизводимых омических контактов к индивидуальным нитевидным нанокристаллам InAs с диаметром от 40 до 100 нм при минимальном травлении полупроводникового материала таких нанокристаллов. Также описаны характеристики полученных контактных соединений. Третья глава состоит из трех частей.

Как показали предыдущие исследования [15], уровень Ферми на поверхности нитевидных нанокристаллов InAs зафиксирован в зоне проводимости, поэтому теоретически любой металл может образовать с ними омический контакт. На практике слой естественного оксида на поверхности InAs не позволяет сформировать омический контакт без предварительного удаления слоя оксида с поверхности [15]. Обработка поверхности InAs в водном растворе $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$

(полисульфида аммония) одновременно обеспечивает удаление материала с поверхности и пассивацию обработанной поверхности атомами серы. При такой обработке происходит травление как естественных оксидов, образующихся на поверхности InAs на воздухе, так и полупроводникового материала [16]. Пассивация атомами серы предотвращает повторное окисление обработанной поверхности полупроводника [16]. Обработка нитевидных нанокристаллов InAs в растворе полисульфида аммония часто приводит к существенному уменьшению диаметра нитевидного нанокристалла, в то время как удаление даже очень тонкого слоя полупроводника, толщиной всего несколько нанометров, в этом случае может оказать существенное влияние на электрофизические свойства нитевидных нанокристаллов. Обработка поверхности нитевидных нанокристаллов в растворе полисульфида аммония оказалось одним из наиболее критичных процессов при изготовлении электрических контактов к нитевидным нанокристаллам InAs. При неверной обработке контактное сопротивление оказывается недопустимо большим либо из-за слоя диэлектрика, не удаленного с поверхности нитевидного нанокристалла, либо из-за уменьшения диаметра нитевидного нанокристалла.

В первой части третьей главы описана оптимизация процесса обработки поверхности нитевидных нанокристаллов InAs в водных растворах $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ с целью создания омических контактов. Показана принципиальная возможность изготовления надежных воспроизводимых омических контактов к индивидуальным нитевидным нанокристаллам InAs при минимальном травлении полупроводникового материала таких нанокристаллов. Описаны две методики изготовления электрических контактов, представлены результаты измерений сопротивлений нитевидных нанокристаллов, обработанных такими методами. Первая из представленных методик основана на использовании ограниченной по времени обработки поверхности нитевидного нанокристалла в водном растворе полисульфида аммония. Вторая методика, предложенная в данной работе, основана на самоостанавливающейся обработке поверхности в водном растворе полисульфида аммония.

Результаты экспериментов показывают, что оптимизированный процесс обработки в сильно разбавленном ($\leq 2\%$) водном растворе полисульфида аммония, насыщенного серой, при $65\text{ }^\circ\text{C}$ ведет к самоостанавливающейся обработке. Такая самоостанавливающаяся обработка позволяет контролируемым образом убирать тонкий слой материала с поверхности полупроводника с последующей пассивацией этой поверхности, что особенно важно при изготовлении омических контактов к нитевидным нанокристаллам InAs. Время обработки нитевидных нанокристаллов в ходе оптимизированной самоостанавливающейся обработки было установлено равным 30 мин. Это время меньше, но сравнимо со временем разложения сильно разбавленного раствора, 300 мин. По этой причине самоостановка процесса пассивации может быть вызвана, по крайней мере отчасти, процессом разложения раствора во время обработки. Наблюдения показали, что стабильность раствора, а по этой причине стабильность обработки нитевидных нанокристаллов, зависят от объема раствора и площади свободной поверхности раствора.

Во второй части третьей главы представлены результаты изучения характеристик полученных электрических контактов. В этой части показано, что улучшение свойств контактных соединений нанокристаллов с металлическими контактами достигается созданием условий, исключающих возникновение прослойки естественного оксида на границе между металлом и кристаллическим материалом: хранение нитевидных нанокристаллов со сформированными контактами в вакууме или инертной атмосфере не вызывает деградации контактов в отличие от хранения нитевидных нанокристаллов на воздухе. Показано, что небольшие изменения (флуктуации) сопротивления индивидуальных нитевидных нанокристаллов во времени, обнаруженные при хранении образцов в вакууме или инертной атмосфере, являются обратимыми. Обсуждается возможное происхождение таких флуктуаций. Оценка контактного сопротивления, приведенного к единице площади, показала, что для изготовленных таким образом омических контактов величина электросопротивления не превышает $10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{см}^2$,

что является типичным для электрических контактов к объемным образцам InAs [17].

Третья часть завершает третью главу формулировкой выводов, сделанных на основании результатов, представленных в данной главе. Обсуждаются возможные подходы к улучшению электрофизических свойств наноэлектронных элементов на основе нитевидных нанокристаллов InAs.

Таким образом, в третьей главе показана принципиальная возможность изготовления надежных воспроизводимых омических контактов к индивидуальным нитевидным нанокристаллам InAs при минимальном травлении полупроводникового материала таких нанокристаллов. Представлены две методики изготовления таких электрических контактов. Исследованы характеристики полученных электрических контактов. Установлено, что улучшение свойств контактных соединений нанокристаллов с металлическими контактами достигается созданием условий, исключающих возникновение прослойки естественного оксида на границе между металлом и кристаллическим материалом, а хранение нитевидных нанокристаллов со сформированными контактами в вакууме или инертной атмосфере не вызывает деградации контактов в отличие от хранения нитевидных нанокристаллов на воздухе. Показано, что небольшие изменения сопротивления, обнаруженные при хранении образцов в вакууме или инертной атмосфере, являются обратимыми. Установлено, что для изготовленных таким образом омических контактов величина электросопротивления, приведенная к единице площади контакта, не превышает 10^{-6} Ом·см².

В четвертой главе (Особенности электронного транспорта в разветвленных нитевидных нанокристаллах InAs) описаны исследования электрофизических свойств разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs, а также исследования закономерностей электронного транспорта в них. Также в этой главе описаны исследования возможностей применения разветвленных

нитевидных нанокристаллов для реализации функциональных элементов наноэлектроники. Четвертая глава состоит из четырех частей.

В первой части представлены исследования электрофизических свойств разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs. Эти исследования показали, что при условии омического электрического контакта и открытых каналах проводимости ВАХ, измеренные между любыми двумя контактами разветвленных нанокристаллов, являются металлическими как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого гелия. Основными носителями заряда в таких нанокристаллах являются электроны.

Во второй части четвертой главы представлены исследования электронного транспорта в разветвленных нитевидных нанокристаллах InAs. На рис. 2 показаны результаты измерения напряжения на ответвлении (V_C) при антисимметричном задании напряжения левого (V_L), и правого (V_R), проводов относительно общей точки (земли). Измерения выполнены при температуре 4,2 К для различных напряжений, приложенных на общий затвор (V_{BG}) разветвленного нитевидного нанокристалла показанного на рис. 1. Как можно видеть из рис. 2, при таких измерениях получают сложные перестраиваемые нелинейные характеристики.

Характеристики, полученные в ходе измерений напряжения на разветвленных нитевидных нанокристаллах InAs, объясняются транспортом электронов в трех различных режимах: (1) в диффузионном режиме, при котором длина свободного пробега электронов меньше характерного размера соединения; (2) в баллистическом режиме, при котором длина свободного пробега электронов сравнима с характерным размером соединения или превышает его; (3) в режиме самоблокировки, при котором электрическое поле металлических тонкопленочных контактных соединений оказывает затворный эффект на нитевидный нанокристалл. Характерным размером исследовавшихся соединений является расстояние между контактами на основном нанокристалле и точкой ветвления.

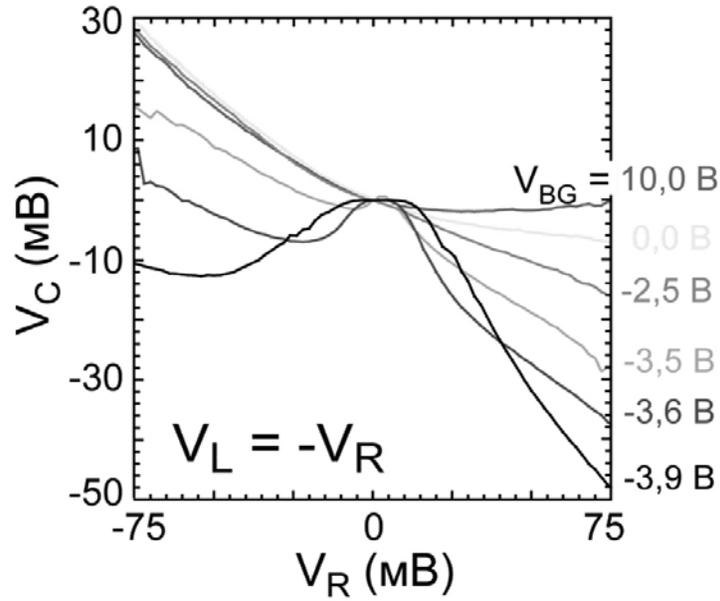


Рис. 2. Результаты измерения напряжения на контакте к ответвлению (V_C) при антисимметричном задании напряжения левого (V_L) и правого (V_R) контактов относительно общей точки (земли) при температуре 4,2 К. Представленные измерения были сделаны для различных напряжений, приложенных на общий затвор (V_{BG}) разветвленного нитевидного нанокристалла $InAs$, показанного на рис. 1.

В диффузионном режиме разветвленный нитевидный нанокристалл может быть описан тремя сопротивлениями, соединенными в одной точке. В этом случае центральный провод является зондом для измерения напряжения в месте соединения проводов и измеряемое напряжение на контакте к центральному проводу (V_C), согласно закону Ома и правилам Кирхгофа, зависит от напряжений, прикладываемых к левому (V_L) и правому (V_R) контактам, следующим образом:

$$V_C(V_L, V_R) = \frac{V_L R_R + V_R R_L}{R_R + R_L}, \quad (1)$$

где R_L и R_R соответственно – сопротивления левого и правого проводов. Таким образом, измеряемое напряжение V_C будет линейным образом зависеть от подаваемых напряжений V_L и V_R при условии неизменных сопротивлений R_L и R_R .

Для симметричных баллистических соединений проводов с адиабатическими стенками при антисимметричном задании входного напряжения ($V = V_L = -V_R$), нулевой температуре и малых прикладываемых напряжениях, напряжение, измеряемое на контакте к центральному проводу (V_C), может быть записано следующим образом:

$$V_C = -\frac{1}{2}\alpha V^2 + O(V^4), \quad (2)$$

где в случае электронной проводимости $\alpha > 0$ [18]. Таким образом, измеренное напряжение будет всегда отрицательным для симметричных соединений баллистических проводов с электронной проводимостью. При аналогичных измерениях на асимметричных соединениях баллистических проводов результатом измерения напряжения будут асимметричные относительно нуля изогнутые вниз кривые [18].

В режиме самоблокировки сопротивления левого и правого проводов не являются постоянными, а зависят от приложенных напряжений по причине затворного эффекта металлической контактной пленки. Такой затворный эффект, в случае электронной проводимости, приводит к локальному увеличению сопротивления нитевидного нанокристалла вблизи контакта с приложенным отрицательным напряжением и к локальному уменьшению сопротивления нанокристалла вблизи контакта с приложенным положительным напряжением. Таким образом, в режиме самоблокировки измеряемое напряжение всегда будет ближе к более высокому приложенному напряжению, что приводит к изгибу вверх кривой $V_C(V_L, V_R)$ как при измерениях с антисимметричным заданием напряжения, так и при измерениях с односторонним заданием напряжения (смотри формулу (1)).

Наличие баллистического режима транспорта электронов дает возможность оценки длины свободного пробега электронов в нитевидных нанокристаллах на основе сопоставления расстояния от электрических контактов до точки ветвления и наличием баллистического режима транспорта электронов. Установлено, что длина свободного пробега электронов в разветвленных нитевидных нанокристаллах InAs при 4,2 К составляет величину порядка 100 нм.

В третьей части четвертой главы на примере смесителя частот и детектора фазы продемонстрирована принципиальная возможность использования разветвленных нитевидных нанокристаллов для реализации функциональных наноэлектронных элементов. Суть такой функциональности разветвленных нанокристаллов состоит в то, что напряжение V_C , измеренное на ответвлении, в общем случае может быть представлено в виде ряда Тейлора:

$$V_C(V_L, V_R) = a_{00} + a_{10}V_L + a_{01}V_R + a_{20}V_L^2 + a_{11}V_LV_R + a_{02}V_R^2 + \dots \quad (3)$$

При входных сигналах $V_L = A_L \sin(2\pi f_L t)$ и $V_R = A_R \sin(2\pi f_R t + \Delta\phi_{LR})$ нелинейные члены в формуле (3) обеспечивают возможность смешения частот и измерения разности фаз. Показано, что смеситель частот и детектор фазы, реализованные на основе разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs, работоспособны при комнатной температуре в диапазоне до 100 МГц.

В четвертой части четвертой главы, на основании представленного в данной главе материала, сформулированы выводы.

Таким образом, в четвертой главе представлены результаты изучения электрофизических свойств разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs, а также результаты исследования закономерностей электронного транспорта в них. Продемонстрировано, что в отличие от соединений макроскопических проводов, разветвленные нитевидные нанокристаллы InAs имеют перестраиваемые нелинейные электрические характеристики, обусловленные сочетанием режимов диффузионного и баллистического транспорта электронов, а также режимом самоблокировки. Предложен метод оценки длины свободного пробега электронов в нитевидных нанокристаллах и установлено, что длина свободного пробега

электронов в разветвленных нитевидных нанокристаллах InAs при 4,2 К составляет величину порядка 100 нм. На примере смесителя частот и детектора фазы показана возможность использования разветвленных нитевидных нанокристаллов для реализации при комнатной температуре таких функциональных наноэлектронных элементов, как смеситель частот и детектор фазы.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Цитируемая литература

1. *Hiruma K., Yazawa M., Katsuyama T., Ogawa K., Haraguchi K., Koguchi M., and Kakibayashi H.* Growth and optical properties of nanometer-scale GaAs and InAs whiskers // *J. Appl. Phys.* – 1995. – Vol. 77. – P. 447-462.
2. *Yang P., Wu Y., and Fan R.* Inorganic semiconductor nanowires // *International J. Nanosci.* – 2002. – Vol. 1. – P. 1-39.
3. *Samuelson L.* Self-forming nanoscale devices // *Mater. Today.* – 2003. – Vol. 6. – P. 22-31.
4. *Wong E.W., Sheehan P.E., and Lieber C.M.* Nanobeam mechanics: Elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes // *Science.* – 1997. – Vol. 277. – P. 1971-1975.
5. *Björk M.T., Ohlsson B.J., Sass T., Persson A.I., Thelander C., Magnusson M.H., Deppert K., Wallenberg L.R., and Samuelson L.* One-dimensional heterostructures in semiconductor nanowhiskers // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 80. – P. 1058-1060.
6. *Lieber C.M.* Nanoscale science and technology: building a big future from small things // *MRS Bull.* – 2003. – Vol. 28. – P. 486-491.
7. *Thelander C., Agarwal P., Brongersma S., Eymery J., Feiner L.F., Forchel A., Scheffler M., Riess W., Ohlsson B.J., Gösele U., and Samuelson L.* Nanowire-based one-dimensional electronics // *Materials Today.* – 2006. – Vol. 9. – P. 28-35.
8. *Lu W., and Lieber C.M.* Nanoelectronics from the bottom up // *Nat. Mater.* – 2007. – Vol. 6. – P. 841-850.
9. *Cui Y., Banin U., Björk M.T., and Alivisatos A.P.* Electrical transport through a single nanoscale semiconductor branch point // *Nano Lett.* – 2005. – Vol. 5. – P. 1519-1523.

10. *Dick K.A., Deppert K., Larsson M.W., Mårtensson T., Seifert W., Wallenberg L.R., and Samuelson L.* Synthesis of branched “nanotrees” by controlled seeding of multiple branching events // *Nat. Mater.* – 2004. – Vol. 3. – P. 380-384.
11. *Wang D., Qian F., Yang C., Zhong Z., and Lieber C.M.* Rational Growth of Branched and Hyperbranched Nanowire Structures // *Nano Lett.* – 2004. – Vol. 4. – P. 871-874.
12. *Dick K.A., Geretovszky Z., Mikkelsen A., Karlsson L.S., Lundgren E., Malm J.-O., Andersen J.N., Samuelson L., Seifert W., Wacaser B.A., and Deppert K.* Improving InAs nanotree growth with composition-controlled Au–In nanoparticles // *Nanotechnology.* – 2006. – Vol. 17. – P. 1344-1350.
13. *Dick K.A., Deppert K., Karlsson L., Seifert W., Wallenberg L., and Samuelson L.* Position-controlled interconnected InAs nanowire networks // *Nano Lett.* – 2006. – Vol. 6. – P. 2842-2847.
14. *Гиваргузов Е.И.* Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара // М.: Наука, 1977. – 304 с.
15. *Thelander C., Björk M.T., Larsson M.W., Hansen A.E., Wallenberg L.R., and Samuelson L.* Electron transport in InAs nanowires and heterostructure nanowire devices // *Solid State Commun.* – 2004. – Vol. 131. – P. 573-579.
16. *Бессолов В.Н., Лебедев М.В.* Халькогенидная пассивация поверхности полупроводников $A^{III}B^V$ // *ФТП.* – 1998. – Т. 32. – С. 1281-1299.
17. *Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А.* Механизмы протекания тока в омических контактах металл-полупроводник // *Физика и Техника Полупроводников.* – 2007. – Т. 41. – С. 1281-1308.
18. *Xu H.Q.* Electrical properties of three-terminal ballistic junctions // *Appl. Phys. Lett.* – 2001. – Vol. 78. – P. 2064-2066.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения данной работы установлены закономерности электронного транспорта в разветвленных нитевидных нанокристаллах InAs, определены структурные параметры и электрофизические свойства таких нанокристаллов, продемонстрирована возможность реализации функциональных наноэлектронных элементов на базе разветвленных нанокристаллов InAs. Разработаны методики синтеза разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs и изготовления электрических контактов к индивидуальным нанокристаллам InAs. Получены следующие основные результаты:

1. Разработана методика синтеза разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs с применением метода химической пучковой эпитаксии. Получены образцы разветвленных нанокристаллов InAs микронной длины с диаметром оснований 70-100 нм и диаметром ответвлений 50-80 нм. Изучена кристаллическая структура полученных нанокристаллов. Установлено, что ответвления растут перпендикулярно основным нанокристаллам, ориентированным в направлении $[000-1]$, в кристаллографических направлениях $\langle -1100 \rangle$, эпитаксиально продолжая гексагональную кристаллическую структуру своего основания и свидетельствуя о бездефектной природе механизма ветвления.
2. Разработана лабораторная методика совмещения тонкопленочных контактных проводов с точкой ветвления нитевидных нанокристаллов с точностью выше 20 нм, что создает основу для формирования и исследования новой элементной базы устройств наноэлектроники на основе нитевидных нанокристаллов. Установлено, что точность совмещения зависит от возможностей электронно-литографической установки.
3. Разработана методика изготовления воспроизводимых омических контактов к индивидуальным нитевидным нанокристаллам InAs с диаметром от 40 до 100 нм при минимальном травлении полупроводникового материала таких

нанокристаллов. Изучены характеристики полученных электрических контактов. Установлено, что величина электросопротивления таких омических электрических контактов, приведенная к единице площади контакта, не превышает величину 10^{-6} Ом·см², что типично для контактов к объемным образцам InAs.

4. Изучены электрофизические свойства разветвленных нитевидных нанокристаллов InAs и установлены закономерности электронного транспорта. Впервые продемонстрировано, что соединения нанокристаллов InAs имеют перестраиваемые нелинейные электрические характеристики, обусловленные сочетанием режимов диффузионного и баллистического транспорта электронов, а также режимом самоблокировки. Предложен способ оценки длины свободного пробега электронов в нитевидных нанокристаллах. Установлено, что длина свободного пробега электронов в исследованных разветвленных нитевидных нанокристаллах InAs при 4,2 К и малых прикладываемых напряжениях составляет величину порядка 100 нм.
5. Полученные нелинейные характеристики дают возможность использовать разветвленные нитевидные нанокристаллы для реализации функциональных наноэлектронных элементов. Принципиальная возможность такого использования экспериментально продемонстрирована на примере смесителя частот и детектора фазы, работающих в диапазоне до 100 МГц при 300 К.

Список публикаций по теме диссертации

1. *Suyatin D.B., Sun J., Fuhrer A., Wallin D., Fröberg L.E., Karlsson L.S., Maximov I., Wallenberg L.R., Samuelson L., and Xu H.Q.* Electrical Properties of Self-Assembled Branched InAs Nanowire Junctions // *Nano Lett.* – 2008. – Vol. 8. – N. 4 – P. 1100-1104.
2. *Суятин Д.Б., Петерсон Х., Максимов И., Солдатов Е.С., Самуэлсон Л.* Свойства электрических контактов к нитевидным нанокристаллам // *Вестник Воронежского Государственного Технического Университета.* – 2007. – Т. 3. – № 11 – С. 67-70.
3. *Suyatin D.B., Thelander C., Björk M.T., Maximov I. and Samuelson L.* Sulfur passivation for ohmic contact formation to InAs nanowires // *Nanotechnology.* – 2007. – Vol. 18. – P.105307 (1-5).
4. *Suyatin D.B., Sun J., Fuhrer A., Wallin D., Fröberg L.E., Karlsson L.S., Maximov I., Wallenberg L.R., Samuelson L., and Xu H.Q.* Nanoelectronic devices with self-assembled branched InAs nanowires // *International Conference on One-dimensional Nanomaterials: Proceedings of Second International Conference.* – Malmö, Sweden, 2007. –P. 63.
5. *Suyatin D.B., Sun J., Fuhrer A., Wallin D., Fröberg L.E., Karlsson L.S., Maximov I., Wallenberg L.R., Samuelson L., and Xu H.Q.* Self-Assembled branched InAs nanowires for nanoelectronic applications // *Micro- and Nano- Engineering: Abstracts book of 33-rd International Conference.* – Copenhagen, Denmark, 2007. – 1C-2.
6. *Suyatin D.B., Wallin D., Fröberg L.E., Karlsson L.S., Maximov I., Wallenberg L.R., Xu H.Q., and Samuelson L.* Electrical Properties of three-terminal InAs nanowire junctions // *International Conference on the Physics of Semiconductors: Abstracts book of 28-th International Conference.* – Vienna, Austria, 2006. – P. 333.
7. *Suyatin D.B., Wallin D., Fröberg L.E., Karlsson L.S., Maximov I., Wallenberg L.R., Samuelson L., and Xu H.Q.* Fabrication and electron transport study of three-terminal InAs nanowire junctions // *Nanostructures: physics and technology: Proceedings of 14-th International Conference.* – Санкт-Петербург, Россия, 2006. – С. 228-229.
8. *Suyatin D.B., Björk M.T., Thelander C., Maximov I. and Samuelson L.* Sulfur passivation for formation of ohmic contacts to InAs nanowire devices // *Micro- and Nano- Engineering: Abstracts book of 31-st International Conference.* – Vienna, Austria, 2005. – 3-p_06.