

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ И НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ им. Н.С. КУРНАКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИОНХ РАН)

119991, г. Москва, Ленинский проспект, 31. Тел. (495) 952-0787, факс (495) 954-1279, E-mail: info@igic.ras.ru

№ _____

на № 6-219-219 от 11.10.2019

«Утверждаю»

Директор ИОНХ РАН

Чл.-корр. РАН. В.К. Иванов

«12» _____ 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Степушкина Михаила Владимировича

**«Технология создания квазиодномерных наноструктур с регулируемым
продольным потенциальным рельефом»**

по специальности 05.27.06 — «Технология и оборудование для
производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники»

Современная тенденция к повышению быстродействия и миниатюризации активных элементов полупроводниковых схем привела к тому, что их характерные размеры приближаются к нанометровому диапазону. При этом проявляются квантовые свойства электрона. С одной стороны это приводит к нарушению работоспособности классических элементов, использующих закономерности поведения электрона как частицы, а с другой - открывает перспективы создания полупроводниковых приборов, основанных на новых принципах. С этой целью проводятся исследования на основе специальных структур, в которых волновые свойства электронов наиболее выражены. Перспективным материалом для таких устройств являются полупроводниковые гетероструктуры, например GaAs/AlGaAs, обладающие высокой подвижностью носителей заряда и возможностью создания тонкопленочных подложек с последующим формированием на них микро- и наноразмерных структур с произвольной топологией. Исследования особенностей размерного квантования

осложняются необходимостью их проведения при сверхнизких температурах, что позволяет минимизировать погрешности, вызванные тепловым движением электронов.

Первой проблемой, с которой сталкивается исследователь при проведении подобных экспериментов, является потеря проводимости классическими омическими контактами, не адаптированными под конкретные параметры структуры. Вторая важная проблема — способ формирования топологии прибора. В настоящее время существует два наиболее распространенных метода: нанесение на поверхность полупроводника металлических затворов и литографическое создание изолирующих областей непосредственно в проводящем слое. Первый способ отличается простотой и относительно невысокими требованиями к точности, но вследствие большой площади затворов и их удаленности от проводящего канала, управление потенциальным профилем с достаточным пространственным разрешением затруднено. Второй способ предполагает создание затворов в том же проводящем слое, в котором создается канал, что значительно уменьшает расстояние между ними и емкость, но значительно сложнее в реализации.

Применение для создания наноструктуры типичной для интегральной схемотехники оптической литографии в лабораторных условиях оказывается неэффективным, поскольку она позволяет работать только с относительно большими пластинами, тогда как при проведении исследований более востребована возможность оперативного изменения топологии на отдельных образцах.

Таким образом, в технологии изготовления микро- и нанoeлектронных устройств существует ряд не решенных проблем, и проведение исследований в этой области является актуальным.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, списка аббревиатур и условных обозначений, обзора различных способов изготовления низкоразмерных структур, описания подготовки к нанолитографии, описания использованных методов литографии при помощи атомно-силового микроскопа, анализа характеристик полученных структур, описания физической модели пьезоэффекта и списка использованной литературы. Число страниц с диссертационной работой составляет 110, рисунков 45, ссылок в списке литературы 98.

Во введении обоснована актуальность темы проведенного исследования, определены основные цели, сформулированы конкретные задачи, отмечены научная новизна и практическая ценность, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются условия, при которых наблюдаются квантово-размерные эффекты, а также различные типы наноструктур, применяемые для этого. Для обеспечения возможности наблюдения волновых свойств электрона

необходимо, чтобы размер активной области образца был сравним с длиной свободного пробега электрона в материале, а также чтобы большая часть электронов находилась в одной подзоне проводимости, то есть тепловая энергия электронов должна быть меньше расстояния между подзонами, определяемого формой квантовой ямы. Этим требованиям удовлетворяют тонкие проволоки из металла или полупроводника, но лучшие результаты были получены на полупроводниковых подложках со сложной топологией, формируемой различными методами литографии. В качестве подложек могут быть использованы гетероструктуры, на границе слоев которых формируется квантовая яма, ограничивающая движение электронов в плоскости, то есть формирующая двумерный электронный газ.

Вторая глава посвящена особенностям применения традиционных методов создания омических контактов и проведения литографии на гетероструктурах GaAs/AlGaAs. Особое внимание уделяется тщательности выполнения каждой операции, будь то полное удаление фоторезиста после экспонирования, точность совмещения слоев при многослойном напылении или оптимальные длительности промежуточных операций. Рассмотрены механизмы формирования омических контактов Ni/Ge/Au, Ti/AuGe, Cr/AuGe и Au/AuGe, Pd/Ge/Au и In. Из данных систем автором была выбрана трехкомпонентная система Ni/Ge/Au, толщины слоев и режимы вжигания которой были адаптированы под параметры подложек.

Третья глава состоит из описания методов нанолитографии при помощи атомно-силового микроскопа, а также вольт-амперных характеристик полученных таким способом изолирующих областей. Первым рассмотренным методом является локальное анодное окисление, основанное на электрохимическом взаимодействии участка полупроводника с пленкой адсорбированной воды. Вторым - специально разработанный метод механического удаления материала при помощи иглы атомно-силового микроскопа, импульсная силовая нанолитография, заключающаяся в прокалывании ряда углублений, формирующих глубокую и узкую изолирующую канавку.

Четвертая глава, «Измерение характеристик образцов», включает методы измерения характеристик подложки, контактов и финальных транзистороподобных структур а также сами измеренные характеристики: концентрацию и подвижность носителей заряда, сопротивления контактов, зависимости проводимости от напряжений на затворах. В частности, измеренные вольт-амперные характеристики подтверждают применимость изготовленных контактов для работы при температурах до 10 К, даже несмотря на то, что в «мелкой» структуре измерение характеристик контактов методом передающей линии было невозможно вследствие наличия аномальной зависимости сопротивления полупроводника от расстояния между соседними контактами: при температуре ниже 100 К с увеличением расстояния сопротивление падало.

Пятая глава посвящена построению физической модели, объясняющей уменьшение сопротивления полупроводника при увеличении расстояния между соседними контактами при низких температурах. Ключевая роль в этой модели отводится пьезоэлектрическому эффекту, возникающему вследствие механических напряжений на границах контактов, обусловленных различием коэффициентов теплового расширения металла и полупроводника. Эта же модель объясняет анизотропию характеристик контактов по различным кристаллографическим направлениям, неоднократно описанную в литературе.

Основной целью работы была разработка технологии изготовления лабораторных наноструктур, обеспечивающая возможность изменения топологии на каждой в отдельности, а также исследование их характеристик при низких (до 1,5 К) температурах.

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие основные задачи: создание омических контактов, сохраняющих работоспособность во всем рабочем диапазоне температур; разработка метода нанолитографии, позволяющего создавать изолирующие области в двумерном электронном газе, расположенном на глубине более 60 нм; адаптация стандартной интегральной технологии к созданию заготовок для последующего проведения нанолитографии.

Научная новизна заключается в создании полупроводниковых наноструктур с секционными планарными затворами, разработке метода импульсной силовой нанолитографии и экспериментальном подтверждении его пригодности для формирования изолирующих областей в структурах GaAs/AlGaAs без внесения значительного количества дефектов. Также в процессе работы наблюдалась аномальная зависимость сопротивления полупроводника от расстояния между соседними контактами, слабо представленная в литературных источниках, и предложена физическая модель, ее объясняющая.

Практическая значимость заключается в разработке технологии изготовления лабораторных структур на основе GaAs/AlGaAs, разделенной на два этапа: создание заготовок и проведение нанолитографии. Такие результаты работы, как омические контакты, работоспособные при низких температурах, могут быть использованы в малошумящих охлаждаемых устройствах.

Достоверность и обоснованность основных положений и выводов диссертационной работы подтверждены использованием современных методов исследований. Большая часть полученных результатов хорошо согласуется с литературными данными.

Автором опубликовано 9 работ, из них 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья — Scopus, 2 — Web of Science.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат в достаточной мере отражает содержание работы и дает представление о достигнутых результатах.

Результаты работы могут быть использованы в АО «НПП «ИСТОК»», ООО «Нева-Феррит», АО «НИИ «Феррит-Домен», ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

Выводы можно было бы частично объединить, чтобы полнее передать выполненные цели данного исследования и в полной мере соответствовали бы уровню кандидатской диссертации. В представленном виде они являются перечислением отдельных полученных результатов.

Вскользь упомянуто, что толщина пленки контролировалась в процессе напыления, однако не указано, каким способом и при помощи какого оборудования.

Автором были рассмотрены омические контакты, основанные на металлизации Pd/Ge/Au, «не обладающие кардинальными преимуществами», из чего можно сделать предположение, что какие-то преимущества у них были. Чем обусловлен отказ от их использования?

Следует также отметить, что при рассмотрении процессов диффузии золота и никеля необходимо учитывать температурный фактор проведения процесса, т.к. коэффициенты диффузии в значительной мере зависят от температуры.

Данные замечания не снижают общую высокую оценку работы, которая выполнена на современном научно-техническом уровне, а ее результаты могут быть использованы в научном и прикладном плане.

Заключение

Диссертационное исследование Степушкина Михаила Владимировича представляет завершенную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему: «Технология создания квазиодномерных наноструктур с регулируемым продольным потенциальным рельефом».

Представленные в работе результаты исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы. Работа выполнена на высоком теоретическом, экспериментальном и аналитическом уровне.

Диссертационная работа «Технология создания квазиодномерных наноструктур с регулируемым продольным потенциальным рельефом», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете "МИСиС", а ее автор, Степушкин Михаил Владимирович, заслуживает присуждение ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 - «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники».

Содержание работы, автореферат и отзыв на диссертацию Степушкина М.В. рассмотрены и одобрены на заседании секции «Синтез и изучение новых неорганических веществ и материалов» Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук «10» ноября 2019 года, протокол №10.

Главный научный сотрудник, д.х.н.

член-корреспондент РАН



Изотов А.Д.

Зав. лабораторией полупроводниковых

и диэлектрических материалов



Васильев М.Г.

д.т.н., профессор

Подпись руки
УДОСТОВЕРЯЮ
Зав. протокольным
отд. ИОНХ РАН



Васильев д.т.н.