Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»

Степушкин Михаил Владимирович

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ КВАЗИОДНОМЕРНЫХ НАНОСТРУКТУР С РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРОДОЛЬНЫМ ПОТЕНЦИАЛЬНЫМ РЕЛЬЕФОМ

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: Курочка Сергей Петрович

кандидат технических наук,
доцент кафедры Технологии Материалов Электроники НИТУ «МИСиС»

Костишин Владимир Григорьевич
доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент Академии Инженерных Наук РФ,
заведующий кафедрой Технологии Материалов Электроники НИТУ «МИСиС»

Москва — 2019

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Селективно-легированные полупроводниковые гетероструктуы AlGaAs/GaAs с двумерным электронным газом (ДЭГ) с высокой подвижностью электронов являются в настоящее время основой для создания современных транзисторов, в том числе полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor, HEMT), приборов для систем телекоммуникаций, СВЧ- и оптоэлектроники, высокочувствительных миниатюрных датчиков для систем управления и контроля. По мере увеличения плотности и быстродействия полупроводниковых приборов, размеры их активных областей уменьшаются до десятков и даже единиц нанометров. При этом корпускулярные свойства электрона, на которые опираются при разработке классических транзисторов, уступают место волновым. Это открывает возможности создания новых классов полупроводниковых приборов, но и требует более глубокого изучения квантовых эффектов. В связи с этим формирование и исследование структур, характерные размеры активных областей которых составляют десятки и единицы нанометров, в настоящее время является одним из важнейших направлений фундаментальных и прикладных исследований в физике и технологии твердого тела.

Несмотря на то что структуры с высокими параметрами, пригодными для проведения исследований квантово-размерных эффектов, выращиваются давно, они являются дорогим и дефицитным материалом. В связи с этим представляется актуальной разработка технологии, которая позволяла бы создавать наноструктуры произвольной топологии на отдельных кристаллах.

Степень разработанности темы исследования

Полупроводниковые структуры, применяемые для исследования квантово-размерных эффектов, известны давно.

Одной из проблем при их изготовлении является низкая рабочая температура и высокая чувствительность проводящего слоя к разнообразным внешним воздействиям. В первую очередь это сказывается на сложности изготовления омических контактов, хотя в настоящее время эта проблема хорошо освещена в литературе. Однако механизмы, влияющие на зависимость проводимости контакта от его кристаллографической ориентации и расстояния до других элементов структуры, до сих пор исследованы не до конца. Кроме того,

существуют чисто технологические особенности изготовления контактов, на которых в литературе обычно не делается акцента.

Другая существенная проблема — формирование на основе заготовки рабочей структуры с произвольной топологией. Существующие методы — фотолитография, локальное анодное окисление, «рисование» ионным пучком — обеспечивают возможность проведения нанолитографии, однако обладают рядом ограничений.

Цель работы

Разработка технологии изготовления экспериментальных наноструктур с боковыми затворами, их создание и измерение характеристик при низких температурах.

В качестве исходного материала были использованы гетероструктуры GaAs/AlGaAs с высокой подвижностью носителей заряда с двумерным электронным газом, расположенным на глубине 40 и 135 нм.

Для достижения цели работы решались следующие задачи:

- создание омических контактов к гетероструктурам GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом, работоспособных до субгелиевых температур.
- исследование влияния технологических операций (освежение[1], нанесение металлизации, вжигание) на характеристики образца
- разработка технологии нанолитографии, позволяющей обрабатывать структуры с глубоким (более 60 нм) залеганием двумерного электронного газа
- разработка технологии, допускающей изготовление в едином технологическом процессе большого числа заготовок, пригодных для дальнейшего проведения нанолитографии на каждой в отдельности
- изготовление образцов наноструктур с боковыми управляющими затворами
- разработка методик измерения и измерение характеристик образцов при температурах от 300 до 1.5 К

Научная новизна работы

- Впервые созданы полупроводниковые наноструктуры с секционными планарными затворами

1 Освежение — стандартная операция удаления оксидной пленки полупроводника перед напылением

• Показано, что изменение потенциалов боковых затворов позволяет менять продольный потенциальный профиль канала, влияющий на транспорт электронов

• Разработан и успешно применен метод импульсной силовой нанолитографии, позволяющий создавать изолирующие области в отдельных кристаллах с глубиной залегания двумерного электронного газа до 135 нм и не вносящий значительного количества дефектов

• Обнаружена аномальная зависимость сопротивления низкоразмерной структуры от расстояния между контактами и предложена ее физическая модель модель

Практическая значимость работы

• разработана и реализована технология создания структур, разделенная на два этапа: изготовление заготовки при помощи технологий, допускающих групповую обработку (в т.ч. методом классической оптической литографии) и последующее формирование на каждой из них наноструктур с произвольной топологией

• показано, что разработанная методика создания омических контактов с использованием установки термического испарения может быть с успехом применена в лабораторной практике

• разработанная технология создания наноструктур с секционированными боковыми затворами может быть использована при изготовлении высокочастотных нанотранзисторов

Основные научные положения, выносимые на защиту

• потенциальный профиль в квазиодномерной наноструктуре, управляемый при помощи планарных секционных затворов

• механизм формирования контактов и влияние на них параметров технологических операций (напыление, освежение)

• физическая модель пьезоэффекта, возникающего вследствие термических напряжений в селективно легированной структуре и оказывающего существенное влияние на электрические характеристики

Апробация работы

Основные теоретические выводы и практические результаты работы доложены на конференциях:

XXI международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» 13-16 марта 2017 г., Нижний Новгород.

XIII Всероссийской конференции молодых ученых 4 — 6 сентября 2018 г., Саратов.

Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019», 8 — 12 апреля 2019 г., Москва.

XIV Всероссийской конференции молодых ученых 17 — 19 сентября 2019 г., Саратов.

Публикации

По результатам исследований опубликовано 5 статей, входящих в список журналов, рекомендованных ВАК, из них 1 статья — Scopus, 2 — Web of Science.

Личный вклад автора

Автором работы осуществлена большая часть теоретических и практических исследований, проведены обобщение и систематизация полученных результатов, принято участие в написании публикаций. Был разработан и изготовлен ряд приборов, необходимых для проведения исследований (измеритель температуры и положения образца в напылительной установке, преобразователь интерфейса вольтметра Е24 в USB, блок реле для защиты образца при включении ЦАП LTR-34, блок делителей, ограничивающий ток утечки затворов и обеспечивающий возможность контроля напряжения на них).

Результаты работы были получены и опубликованы в печати в соавторстве с сотрудниками НИТУ «МИСиС», ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, АО НПП Исток им. Шокина.

Публикации

По результатам исследований опубликовано 5 статей, входящих в список журналов, рекомендованных ВАК, из них 1 статья — Scopus, 2 — Web of Science.

Структура и объем работы

Работа содержит список сокращений, введение, 5 глав, общие выводы, список литературы и 2 приложения. Работа изложена на 110 страницах машинописного текста, содержит 6 таблиц и 45 рисунков. Список использованной литературы содержит 98 наименований.

Основное содержание работы

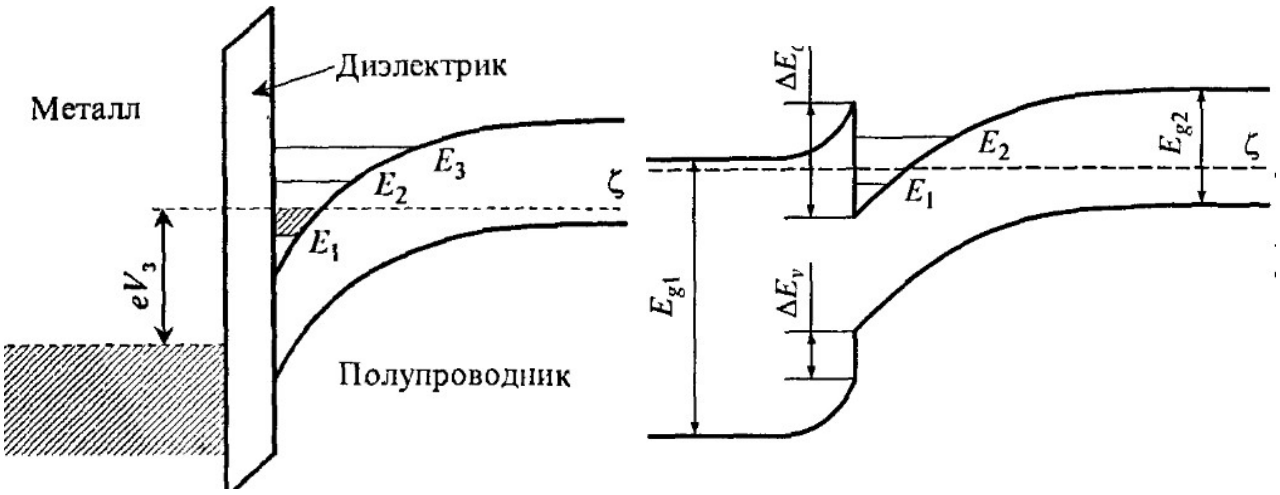
Во введении обоснована актуальность темы проведенного исследования, определены основные цели, сформулированы конкретные задачи, отмечены научная новизна и практическая ценность, а также основные научные положения, выносимые на защиту, показана апробация работы.

В главе 1 диссертации рассматривается условия, при которых наблюдаются квантово-размерные эффекты, а также различные типы наноструктур, применяемые для их наблюдения. 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.

Существуют способы формирования одномерных металлических и полупроводниковых нитей или тонких проводящих пленок, ограниченных диэлектриком, однако наиболее перспективными материалами для создания наноэлектронных приборов являются полупроводники. Благодаря отработанной технологии изготовления интегральных схем, в полупроводниках возможно получение достаточно гладких границ радела и даже управление формой потенциальной ямы путем приложения электростатического поля. На этом принципе основаны МДП-структуры: на поверхность полупроводника наносится изолирующий слой и слой металла. При приложении к металлу электрического поля в полупроводнике создается изгиб зоны проводимости, в котором и формируется двумерный электронный газ, как показано на рисунке 1а. Однако приложение электростатического поля не единственный способ создать изгиб зон. В случае использования гетероструктур этого можно достичь на границе двух слоев полупроводника с разными ширинами запрещенных зон как показано на рисунке 1б. В настоящее время наиболее часто для этого используются полупроводники $A^{III}B^{V}$, в частности, GaAs, рассматриваемый в настоящей работе. Его существенными преимуществами перед кремнием являются подвижность электронов, достигающая при рабочих температурах порядка 10 К величины 10^7 $см^2/(В \cdot с)$ в лучших структурах, а также существование соединений AlGaAs с близкой постоянной решетки, но

отличающейся шириной запрещенной зоны. Таким образом на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs возможно сформировать структуру с атомно гладкими границами раздела, высокой подвижностью и минимальными количеством дефектов.

Важной особенностью полупроводниковых структур с двумерным электронным газом является отсутствие примесей в проводящем слое, поскольку они значительно снижают подвижность электронов. Вместо этого для обеспечения достаточного количества свободных электронов легированную область отделяют от проводящей при помощи нелегированного слоя (спейсера). Сама легирующая примесь может быть распределена как по всему остальному объему (такой способ называется объемным легированием), так и в относительно тонком слое (δ-легирование). Помимо обеспечения достаточного количества свободных носителей заряда эти области также экранируют электрические потенциалы, образующиеся на поверхности образца.



а) б)

Рисунок 1 — Механизмы образования квантовой ямы в МДП- и гетероструктурах

В главе 2 перечислены основные технологические операции, используемые при изготовлении наноструктур на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs:

1. Химическая обработка исходных гетероструктур, включающая обработку в органических растворителях (по 3 минуты в ацетоне и изопропиловом спирте), промывку в деионизованной воде и сушку в потоке азота.

2. Формирование мезы путем травления с использованием фоторезистивной маски и травителя (например, $H_2O:H_2O_2:H_2SO_4 = 100 : 3 : 3$ или $H_2O_2:H_3PO_4:H_2O = 1:3:40$).

3. Удаление фоторезиста и подготовка поверхности к второй фотолитографии.

4. Создание фоторезистивной маски для последующего напыления металлизации контактов. Вследствие высокой чувствительности структур с ДЭГ к механическим повреждениям поверхности, применяется маска с обратным клином

5. Очистка поверхности гетероструктуры в окнах маски путем удаления остатков фоторезиста в кислородной плазме с последующими, непосредственно перед помещением образца в вакуумную камеру, снятием окисла в растворе HCl

6. Напыление слоев металлизации

7. Удаление фоторезиста и напыленного на него металла.

8. Вжигание контактов в атмосфере инертного или форминг газа.

9. Нанесение невжигаемой металлизации (в настоящей работе — Ti/Au)

10. Травление изолирующих канавок заготовок через фоторезистивную маску

11. Резка пластины на отдельные кристаллы

12. Установка кристаллов в корпус и приваривание контактов к контактным площадкам

13. Формирование изолирующих канавок на отдельных кристаллах при помощи атомно-силового микроскопа

14. Проверка изолирующих характеристик канавок

После этого готовая наноструктура устанавливается в криостат с целью проведения дальнейших исследований.

Полупроводниковые подложки были выращены А.И. Топоровым методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ИФП СО РАН в следующей последовательности: на подложке из полуизолирующего GaAs был выращен буферный слой GaAs, затем разделительный слой нелегированного AlGaAs, содержащий два δ-слоя, легированных кремнием. Для защиты химически активного AlGaAs был напылен еще один слой GaAs. Толщины слоев для двух используемых типов структур приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Толщины слоев структуры

	«глубокая» структура	«мелкая» структура
Буферный GaAs	1000 нм	500 нм
Слой AlGaAs	100 нм	35 нм
Расстояние от границы раздела GaAs/AlGaAs до первого δ-слоя	50 нм	20 нм
Расстояние между δ-слоями	20 нм	5 нм
Защитный слой GaAs	35 нм	5 нм
Расстояние от поверхности до слоя ДЭГ (глубина залегания)	135 нм	40 нм

Каждый из описанных этапов имеет свои особенности, специфичные именно для низкоразмерных структур. Несмотря на наличие δ-слоев и значительное расстояние от проводящего слоя до поверхности, наличие механических напряжений и зарядов на поверхности оказывает значительное влияние на поведение электронов. С целью минимизации повреждений напыляемых слоев металлизации используется литография с обратным клином. Данный метод основан на нанесении двух слоев фоторезиста, причем экспонирование проводится только на верхнем слое. Далее при помощи селективного травителя и кислородной плазмы через вскрытые окна удаляется часть нижнего слоя. Таким образом при последующем напылении металлизации, она не образует непрерывной пленки, которая бы создавала механические напряжения при удалении фоторезиста или отрывалась с образованием неровного края.

Несмотря на то, что использование фоторезиста с обратным клином является обычной технологией при изготовлении полупроводниковых приборов, применение ее к экспериментальным структурам требует максимального уменьшения толщин слоев фоторезиста и аккуратного удаления нижнего слоя, не допускающего повреждения поверхности. Это приводит к риску недостаточной очистки и попаданию остатков фоторезиста под металлизацию. Как показали исследования таких образцов при помощи атомно-силового микроскопа, удаление фоторезиста приводит к образованию высокого бортика на краях контакта. Этот бортик работает как затвор Шоттки, что препятствует формированию омического контакта. При промышленном изготовлении эта проблема

решается правильным подбором режима очистки, но в лабораторных условиях вместо этого можно использовать дополнительную очистку разогретым водородом. В настоящей работе для этого был использован электролитический источник, создающий давление $(2 — 3)\cdot10^{-5}$ мм.рт.ст. при работающем на полную мощность насосе. Далее водород попадает на разогретую до ~2000 °C вольфрамовую спираль. Как показали повторные исследования поверхности при помощи атомно-силового микроскопа, для удаления остатков фоторезиста в окнах достаточно 10 минут обработки.

Еще одной причиной появления нелинейности характеристик может являться слишком долгое освежение в растворе HCl перед помещением в напылительную установку. Несмотря на то, что HCl взаимодействует только с окисленным слоем и не взаимодействует с самим GaAs, слишком долгое нахождение в кислоте приводит к увеличению бокового подтрава. Точный механизм влияния ширины подтрава на характеристики контакта в настоящий момент требуют проведения дальнейших исследований.

Второй особенностью использования фоторезиста с обратным клином является то, что при напылении многослойной металлизации из нескольких неподвижных относительно образца испарительных ячеек, напыление идет под разными углами, что приводит к несовпадению слоев металлизации как показано на рисунке 2. В настоящей работе это несовпадение составило около 1 мкм, что привело к появлению нелинейных и несимметричных вольт-амперных характеристик.

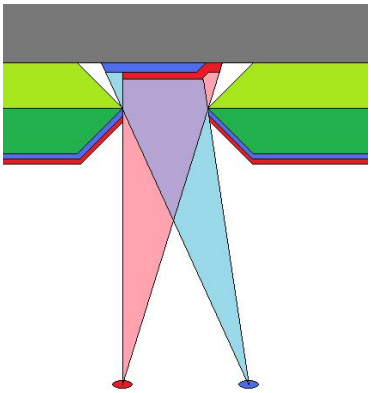


Рисунок 2 — Схема напыления двух слоев металла через фоторезист с обратным клином

Существует несколько способов устранения этого недостатка. Наиболее простой — ориентация образца таким образом чтобы ступеньки контакта располагались на боковых краях и не участвовали в прохождении тока. Однако такой способ ограничивает топологию создаваемого прибора, поэтому нами была проведена модификация напылительной

установки, включающая добавление механизма перемещения образца и точное позиционирование его над каждой ячейкой.

Использование однокомпонентного контакта также не приводит к образованию ступенек. Для получения такого контакта на поверхность образца наносится слой индия, который впоследствии вжигается с образованием соединения InGaAs, обладающего значительно меньшей шириной запрещенной зоны и, соответственно, меньшей высотой барьера, составляющей 0.03 эВ. Протекание тока в таком контакте осуществляется благодаря термоэлектронной эмиссии. Однако такой контакт не лишен существенных недостатков. Индий активно взаимодействует с напыляемыми на него металлами с образованием интерметаллидов, обладающих крайне низкой механической прочностью. Чтобы этого избежать используется напыление промежуточных слоев вольфрама или других тугоплавких металлов, однако данный процесс невозможен в простой установке термического испарения, применяемой в настоящем эксперименте. Вторым недостатком такого контакта является значительная боковая диффузия индия, что ограничивает степень интеграции прибора.

Несмотря на это, индиевый контакт нашел применение в настоящей работе. С его помощью методом Ван-дер-Пау измерялись характеристики исходных пластин, поскольку при этом не требуется ни высокая точность, ни надежность контакта.

Более распространенным составом металлизации контактов является Ni/Ge/Au. В отличие от индиевого контакта, уменьшающего ширину запрещенной зоны, при вжигании металлизации Ni/Ge/Au происходит легирование полупроводника германием, в то время как никель за счет химическогог взаимодействия с полупроводником ускоряет диффузию, а золото используется для уменьшения общего сопротивления. Для получения контакта с минимальным сопротивлением в литературе предлагается использование толщин никеля, германия и золота, равных 40, 52.8 и 107.2 нм соответственно. Для структур с глубиной залегания двумерного газа более 80 нм рекомендуется использовать масштабный коэффициент

$$s = \frac{D + 30\,нм}{110\,нм},$$

где D — глубина залегания двумерного электронного газа.

1. Режим вжигания подбирается экспериментально. В литературе рассматривается следующий механизм приблизительного расчета с учетом двух механизмов: диффузия германия вглубь полупроводника и диффузия золота вдоль поверхности зерен никеля.

Численное моделирование показало, что это время можно аппроксимировать следующей формулой: t = d / υ, где d — глубина залегания двумерного газа. Зависимость величины υ от температуры также была получена численным моделированием:

$$\upsilon(T)=\upsilon_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad ,$$

где E_a — энергия активации, принимаемая равной 0,6 эВ для обоих процессов, v_0 принималось равным $7{,}6\cdot10^{-5}$ м/с. Это достаточно грубая модель, но она способна дать приближенное значение времени вжигания, которое впоследствии может быть более точно определено экспериментально.

В настоящей работе применялись толщины слоев, приведенные в таблице 2. Оптимальным режимом вжигания для «глубоких» структур было выдерживание 3 минуты при температуре 370 °C, после чего 1 минуту при температуре 440 °C. Для «мелкой» структуры вжигание проходило в течение 1 минуты при температуре 400 °C.

Таблица 2 — Толщины слоев металлизации

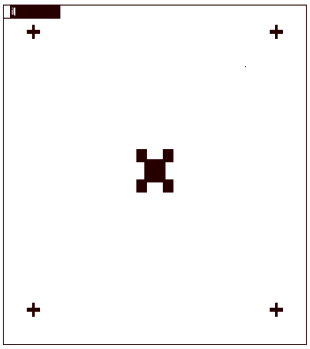
Материал	«глубокая» структура (D = 135 нм)		«мелкая» структура (D = 40 нм)	
	Толщина, нм	Скорость, нм/с	Толщина, нм	Скорость, нм/с
Ni	7	3	10	0,5
Ge	75	5	40	0,4
Au	154	6	80	0,4
Ni	20	2	15	0,2
Au	26	5	20	0,3

Еще одной интересной системой металлизации является Pd/Ge/Au. При использовании в структурах с сильным легированием защитного слоя GaAs и при неглубоком залегании двумерного газа, такая система позволяет получать омические контакты с низким сопротивлением при низких температурах за счет диффузии в твердой фазе. При этом контакт обладает значительно большей гладкостью края и поверхности, что свидетельствует и о большей однородности по сравнению с предыдущими. Однако к структурам, применяемых в настоящей работе, вследствие значительной глубины залегания двумерного

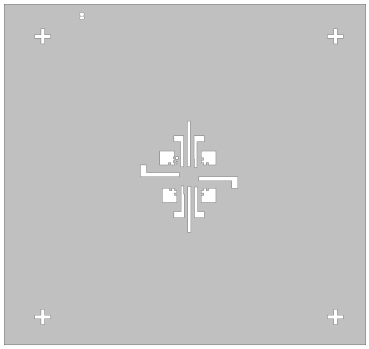
газа, такой способ неприменим. Эксперименты с такой системой металлизации, включающие диффузию при больших температурах, были проведены, однако не продемонстрировали существенно лучших характеристик по сравнению с контактами Ni/Ge/Au.

Поскольку нанолитографические способы формирования топологии на отдельных кристаллах как правило позволяют обрабатывать относительно небольшую область, причем обладают невысокой скоростью, было принято решение изготовить методом оптической литографии универсальные заготовки, топологию которых можно было бы впоследствии менять в широких пределах. При этом не требуется высокой разрешающей способности, зато оказывается полезной возможность оптической литографии работать одновременно с большим количеством кристаллов. Последовательность литографических операций приведена на рисунке 3. На первом этапе в полупроводнике по шаблону, приведенному на рисунке 3а, вытравливалась меза. Далее по шаблону, приведенному на рисунке 3б, наносилась металлизация омических контактов. После их вжигания наносился шаблон, показанный на рисунке 3в, по которому проходило напыление металлизации Ti/Au, используемой для соединения омических контактов с контактными площадками корпуса. Наконец, по шаблону 3г проходило травление изолирующих канавок.

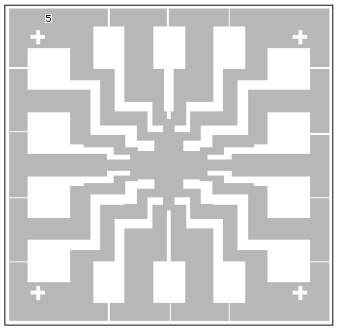
Далее, после резки пластины на отдельные кристаллы и установки их в корпус проводилась нанолитография. При этом заготовки изолирующих канавок соединялись изолирующими областями с целью формирования канала и затворов как показано на рисунке 4а. В работе использовались шестизатворные структуры, подобные изображенной на рисунке 4б. Области стока и истока обозначаются как D и S, затворы как G1.1 — G3.2, причем если на пару затворов подается одинаковое напряжение, они обозначаются просто как G1, G2 или G3.



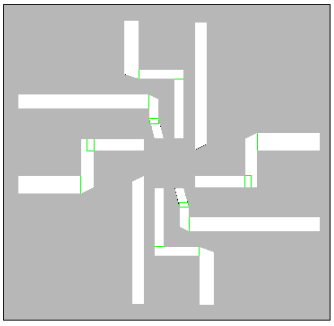
а)



б)



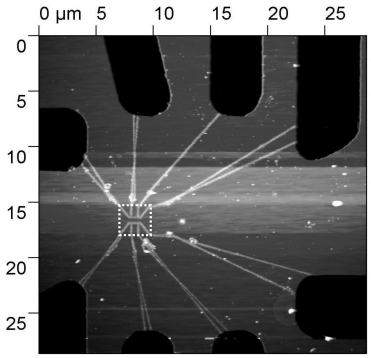
в)



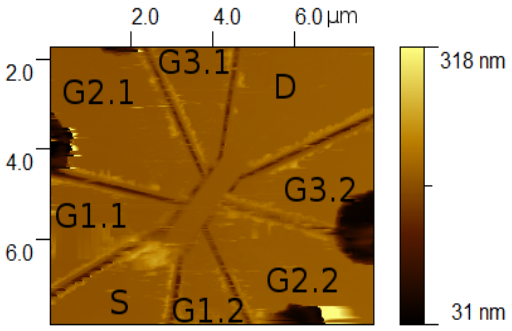
г)

Рисунок 3 — Этапы формирования наноструктуры. а) маска для травления мезы. б) маска для нанесения омических контактов. в) маска для нанесения металлизации. г) маска для травления канавок.

С



а)



б)

Рисунок 4 — Расположение области нанолитографии (а) и топология структуры (б)

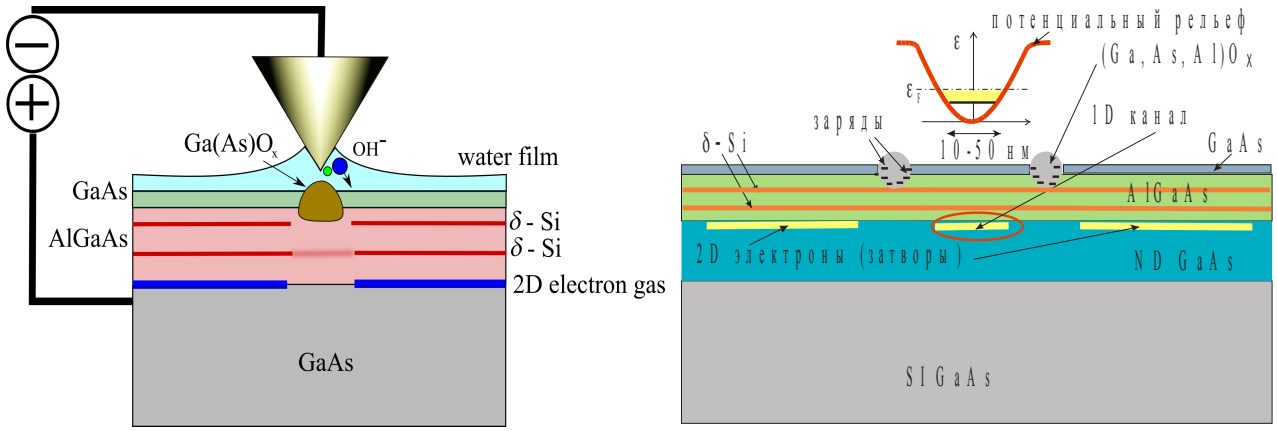
В главе 3 рассматриваются наиболее распространенные методы формирования наноструктуры. При изготовлении экспериментальных структур основными требованиями к этим методам являются возможность произвольного изменения топологии и возможность работы с отдельными кристаллами. Этим требованиям удовлетворяют методы, основанные на применении атомно-силового микроскопа а также метод рисования сфокусированным ионным пучком. Последний метод распространения не получил, вероятнее всего из-за сложности используемого оборудования и большого количества вносимых дефектов.

Наиболее известным методом нанолитографии при помощи атомно-силового микроскопа является метод локального анодного окисления (ЛАО). На рисунке 5 схематически изображен процесс окисления гетероструктуры GaAs/AlGaAs с двойным δ-легированным слоем, проходящий по следующей формуле:

$$2GaAs + 12h^{+} + 10H_2O \rightarrow Ga_2O_3 + As_2O_3 + 4H_2O + 12H^{+}$$, где

h+ — дырка проводимости в полупроводнике, H+ — ион водорода.

Ограничение движения электронов в плоскости двумерного газа осуществляется не за счет разрушения проводящего слоя или внесения в него значительного количества дефектов, как в случае химического травления, а созданием электростатического поля, обусловленного наличием заряда на границе окисленной области. Глубина ее проникновения в полупроводник ограничена величиной прикладываемого при литографии напряжения. Специфика проведения литографии наноразмерных окисленных областей заключается в том, что увеличение напряжения также приводит к значительному увеличению их ширины. Таким образом, максимальное расстояние от поверхности до слоя ДЭГ ограничено величиной около 50 нм. Данный метод был с успехом применен при формировании наноструктур с «мелким» залеганием двумерного электронного газа.



а) б)

Рисунок 5 — Схема проведения локального анодного окисления

Для формирования же структур с «глубоким» залеганием был разработан метод импульсной силовой нанолитографии (ИСНЛ). В отличие от других методов механической обработки материала, в методе ИСНЛ используются зонды с чрезвычайно тонкими и острыми (радиус кривизны острия порядка 10 нм) монокристаллическими алмазными иглами. Благодаря высокой твердости, такую иглу можно глубоко воткнуть практически в любой материал при приложении силы вдоль ее оси, однако латеральный сдвиг иглы, находящейся под нагрузкой, приведет к ее повреждению. Царапать поверхность таким инструментом неэффективно. Вместо этого применяется поточечная индентация (прокалывание) углублений с расстоянием между соседними 1 — 20 нм. Важным преимуществом данного метода является возможность получения канавок с отношением R глубины к ширине порядка 1 в отличие от R = 0,1 − 0,3, достижимых традиционными методами.

Первоначально проводится последовательное прокалывание ряда углублений на расстоянии 1 нм друг от друга с вертикальной амплитудой 50 нм (при измерении вертикальной амплитуды не учитывается упругость кантилевера, то есть реальная глубина проникновения иглы в полупроводник оказывается меньше). Полученная канавка, покрытая извлеченным из нее материалом показана на рисунке 6а. Далее этот материал удаляется горизонтальными движениями иглы. Изображение поверхности после этого этапа приведено на рисунке 6б. Как видно, глубина канавки после одного прохода составляет менее 20 нм. Для получения канавок большей глубины используется большее количество проходов. На рисунке 6в приведены СЗМ изображение канавок, полученных после 1, 20, 30 и 100

проходов. Как видно из профиля глубины, приведенного на рисунке 6г, глубина канавки после 100 проходов составляет порядка 100 нм при ширине около 35 нм, то есть отношении глубины к ширине R составляет около 3.

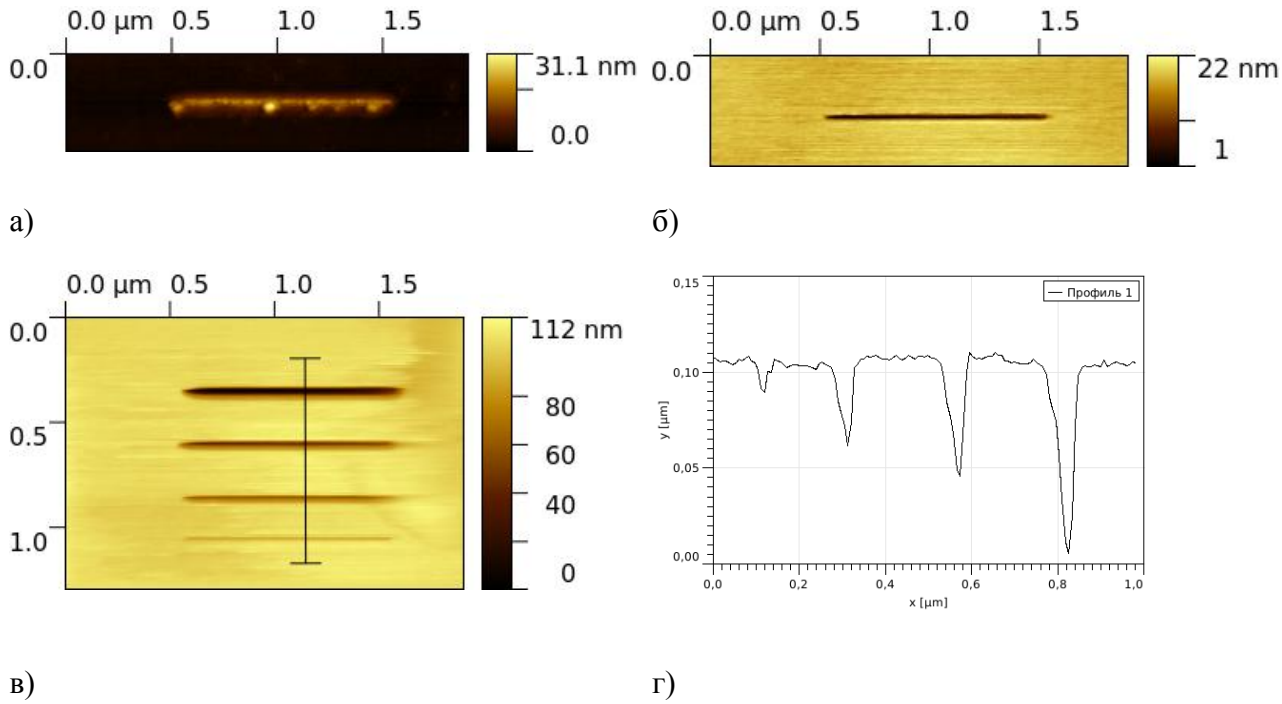


Рисунок 6 — Этапы формирования канавки методом ИСНЛ: прокалывание углублений (а), удаление выкрошенного полупроводника (б), изображение (в) и профили (г) канавок после 1, 10, 30 и 100 проходов

Измерения характеристик показали сопротивление изоляции затворов, выполненных при помощи ИСНЛ, составляющих при комнатной температуре примерно 6,7 МОм, а при охлаждении до 8 К — 8 ГОм. Поскольку для создания изолирующих областей в «мелких» структурах достаточно использования более простого метода ЛАО, данная технология применялась только на «глубоких» структурах.

В главе 4 рассмотрены способы измерения и полученные значения электрических характеристик образцов. Предварительные измерения проводились на заготовке гетероструктуры GaAs/AlGaAs для определения зависимости подвижности носителей заряда и их концентрации от температуры. Для этого использовалась разновидность метода Холла — метод Ван-дер-Пау. Его особенностью является низкая чувствительность к форме образца

и расположению контактов, что позволяет использовать простые индиевые контакты, нанесенные без проведения литографии. Как показали измерения, при температуре 40 К концентрация носителей составляла $1{,}2 \cdot 10^{11}$ $см^{-2}$, а подвижность — $1{,}4 \cdot 10^{5}$ $см^{3}/(В \cdot с)$. Стоит учесть, что любое воздействие на полупроводник, особенно нагрев при вжигании контактов и внесение дефектов при литографии, влияют на характеристики двумерного электронного газа.

При разработке технологии создания омических контактов измерение их характеристик проводилось при помощи метода передающей линии (transmission line method, TLM). Использование данного метода основано на создании специального образца, содержащего несколько одинаковых омических контактов, расположенных на различных расстояниях друг от друга. Поскольку сопротивления самих контактов и приконтактных областей не зависят от влияния соседних контактов, а сопротивление участка полупроводника между контактами зависит от его длины линейно, зависимость сопротивления зазора от его длины является прямой линией, пересекающей ось ординат в точке, равной удвоенному сопротивлению контакта, а наклон равен удельному сопротивлению проводящего слоя. Используемые в настоящей работе образцы содержали квадратные контакты размером 100х100 мкм, расположенными на расстояниях 20, 40, 60, 80 и 100 мкм друг от друга. Кроме того, оценивалась форма вольт-амперной характеристики.

Лучшие контакты к «глубоким» структурам обладали сопротивлением 51,3 Ом·мм при 300 К, 9.96 Ом·мм при 77 К и 7,1 Ом·мм при 10 К при линейных вольт-амперных характеристиках на всем диапазоне температур.

При измерении сопротивления контактов к «мелким» структурам было обнаружено, что при снижении температуры ниже 100 К сопротивление зазора 20 мкм становилось больше сопротивления зазора 100 мкм, достигая значения 2,7 кОм при температуре 10 К. Сопротивление зазора 100 мкм при этом составляло около 200 Ом. При этом вольт-амперные характеристики всех зазоров оставались линейными во всем диапазоне температур. Таким образом, предположение о независимости удельного сопротивления полупроводника по длине оказалось неверным. В литературе упоминаний такого эффекта почти не встречается, но, судя по всему, наиболее близким к нему является зависимость электрических характеристик полупроводниковых структур от кристаллографической ориентации. Возможные объяснения этой зависимости более подробно рассмотрены в следующей главе.

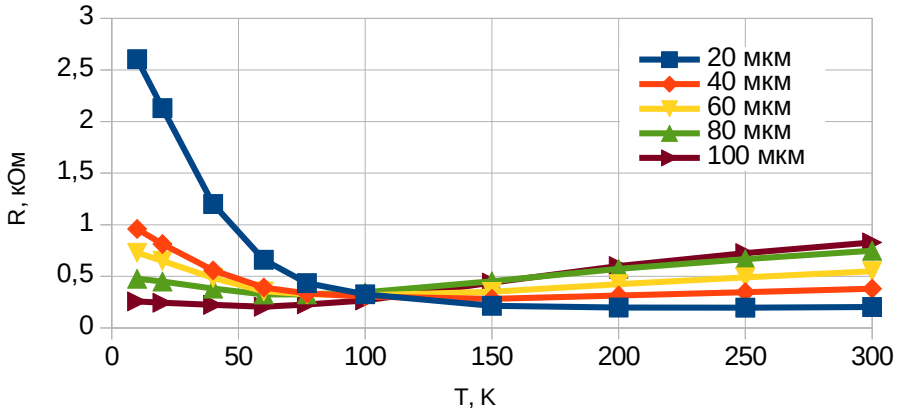


Рисунок 7 — Зависимость сопротивления «мелкой» структуры от ширины зазора при разных температурах

Несмотря на обнаружение существования такой зависимости, все контакты оставались омическими, а их сопротивление было достаточно низким для продолжения основных исследований с многозатворными структурами.

Если для оценки качества контактов достаточно температуры 10 К, достижимой в криостате замкнутого цикла, то для наблюдения квантования проводимости необходимы более низкие температуры. Для их достижения использовалась откачиваемая вставка, помещаемая в сосуд Дьюара с жидким гелием. Внутрь вставки устанавливался образец и угольный терморезистор, используемый для контроля температуры. Во время работы насоса температура снижалась до 1,5 К, чего оказалось достаточно для проведения экспериментов.

Для проведения измерений зависимости проводимости канала от напряжений на затворах была собрана автоматизированная измерительная установка. Часть приборов была разработана и изготовлена собственными силами. Для минимизации влияния помех, измерения проводимости осуществлялись методом синхронного детектирования на переменном сигнале частотой 133 Гц и амплитудой до 100 мкВ. При этом напряжения на затворах устанавливались в пределах от -1 до +1 В и контролировались при помощи отдельных АЦП, что позволило оценить токи утечки.

На рисунке 8 приведены результаты измерения зависимости проводимости «мелкой» структуры от напряжения на центральной паре затворов (G2) при фиксированных напряжениях на крайних затворах (G1 и G3). На кривых отчетливо видны плато

проводимости при $G=0,25G_0$, $0,5G_0$ и G_0, которые при определенных соотношениях потенциалов затворов имеют форму пологих максимумов.

Характеристики первых наноструктур с «глубоким» залеганием двумерного газа были подобны приведенным на рисунке 9. На графике видны перегибы, соответствующие «особенности 0.7» и первому плато проводимости, однако они выражены слабо. Это может быть связано со снижением подвижности носителей заряда вследствие вжигания контактов, проведения нанолитографии, наличия параллельного проводящего канала или других причин. Несмотря на это, наблюдение квантования проводимости возможно, из чего следует вывод о высоком качестве исходных пластин и том, что технологические операции по формированию омических контактов и наноструктуры не вносят значительного количества дефектов. Наиболее близкие к теоретическим характеристики, приведенные на рисунке 10, были получены на последнем образце. На исходной зависимости, обозначенной сплошной линией, хорошо видны две ступени квантования и «особенность 0,7». Различная высота ступеней и их несоответствие теоретическим значениям обусловлено наличием сопротивления полупроводника и контактов, составляющего приблизительно 3 кОм. График, построенный с учетом этого сопротивления, показан на рисунке штрих-пунктирной линией. Таким образом, проводимости ступеней составляют G = 75 и 156 мкСм, что близко к теоретическим значениям $G_0 = 77,5$ и $2G_0 = 155$ мкСм. Кроме того, для более точного определения положения ступеней на рисунке пунктирной линией приведена зависимость от напряжения на затворах производной dG / dU_G.

Важно отметить тот факт, что первые измеренные характеристики этого образца по форме были аналогичны характеристикам остальных образцов, и только в последних экспериментах проявились описанные свойства. Само ограниченное число исследований связано с ограниченным количеством жидкого гелия, и последние исследования проводились в условиях, когда откачиваемая вставка его уже не касалась. Это ограничило минимальную температуру величиной 4,5 К.

Причины столь сильного улучшения характеристик до конца не выяснены. Сравнение величин проводимости с более ранними исследованиями того же образца, а также с другими образцами показали меньшую суммарную проводимость и большее напряжение, необходимое для открытия канала. Вследствие этого было сделано предположение, что при создании структур в них помимо основного проводящего канала присутствует паразитный, вероятно, расположенный в разрыве зон на границе слоев AlGaAs и верхнего защитного слоя GaAs, то есть значительно ближе к поверхности. Это приводит к снижению в нем

подвижности электронов, что в свою очередь увеличивает рассеяние. Таким образом, в паразитном канале отсутствует квантование проводимости, что и делает ступени проводимости на характеристиках менее заметными. Предположение о наличии паразитного канала приводит также к необходимости уточнить сделанное ранее предположение о подвижности электронов в основном канале и вносимых технологическими процессами дефектах: их влияние на подвижность оказалось значительно меньше, чем предполагалось ранее. Улучшение же формы характеристики последней структуры в таком случае связано с разрушением паразитного канала, возможно, вследствие окисления поверхности жидким кислородом, растворенным в гелии.

С целью проверки этого предположения был проведен ряд опытов по обработке поверхности образцов в ксилородной плазме и разогретом водороде, однако значительного изменения проводимости или формы характеристик достичь не удалось.

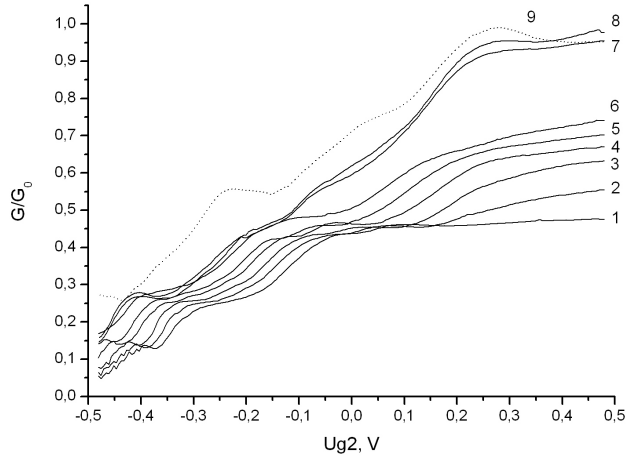


Рисунок 8 — Зависимость проводимости канала при напряжении UG1 = -280 мВ и напряжениях UG2 = -350 (1), -300 (2), -250 (3), -200 (4), -140 (5), -100 (6), 350 (7), 500 (8) мВ и при UG1 = UG3 = 0.

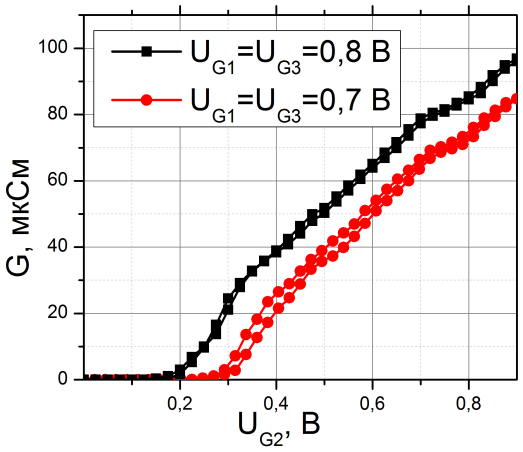


Рисунок 9 — Зависимость проводимости «глубокой» структуры от напряжения на затворах

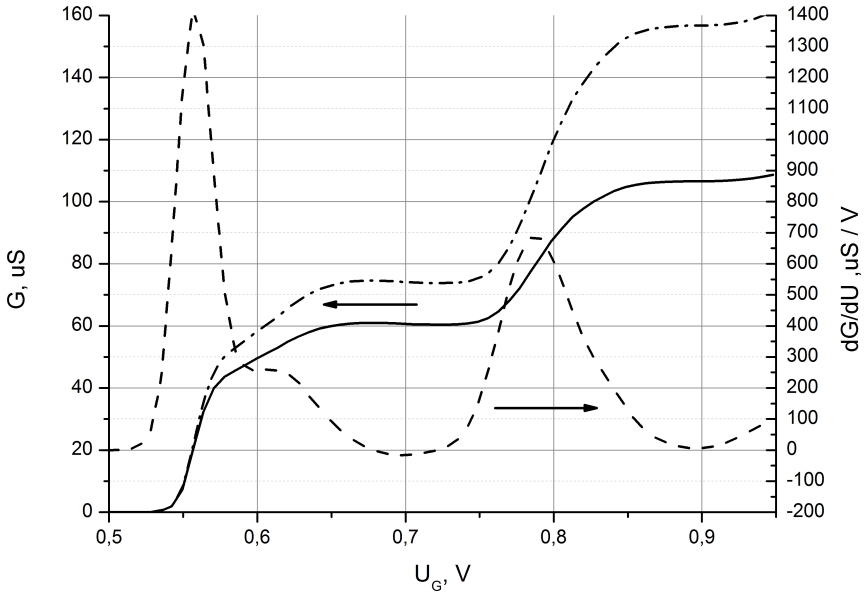


Рисунок 10 — Характеристика шестизатворной структуры с, вероятно, нарушенным параллельным каналом

В главе 5 рассматриваются возможные объяснения зависимости характеристик образца от расстояния между контактами, наблюдавшиеся при измерениях методом TLM, и от кристаллографического направления, неоднократно упоминающиеся в литературе.

Рассмотрим три наиболее вероятных явления, объясняющие эту зависимость: анизотропия диффузии, анизотропия роста кристаллов металлизации и пьезоэлектрический эффект. Как показали исследования, первые два эффекта, хотя и могут частично объяснить анизотропию характеристик по различным кристаллографическим направлениям качественно, не объясняют зависимости от расстояния до соседних контактов. Количественные оценки также не подтверждают их определяющего влияния. Таким образом наиболее вероятным явлением является пьезоэффект.

В литературе неоднократно встречаются модели, по которым проводились расчеты проводимости полевого транзистора с учетом пьезоэффекта, вызванного наличием диэлектрика на поверхности. Однако, применение этих моделей к рассматриваемым в настоящей работе структурам оказалось невозможным. Величина пьезоэлектрического заряда прямо пропорциональна величине механического напряжения и убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника напряжения. Таким образом максимальная величина пьезозаряда располагается от него на расстоянии порядка глубины залегания проводящего слоя. В случае описанных ранее «мелких» структур это расстояние составляет около 40 нм, что значительно меньше расстояния между соседними контактами, составляющего 20 — 100 мкм. Несмотря на это, небольшая область параметров структуры, при которых увеличение расстояния между соседними контактами приводит к уменьшению сопротивления, существует. Если концентрация свободных электронов лишь ненамного превышает концентрацию пьезозарядов, обусловленных наличием одного контакта, то даже небольшое влияния соседнего контакта может оказаться достаточным для значительного изменения концентрации электронов, а следовательно, и проводимости. Однако такая точная комбинация параметров, сохраняющаяся в диапазоне температур от 100 до 10 К при расстояниях между контактами от 20 до 100 мкм выглядит маловероятной.

В связи с этим модель была усложнена. Механическое напряжение, возникающее вследствие различия температурного коэффициента расширения металла и полупроводника, возникает не только в проводящем слое, но и во всем объеме полупроводника. В результате этого в полупроводнике возникает заряд, который за счет электростатического поля влияет на проводимость канала. Для проведения расчетов в соответствии с этой моделью была написана специальная программа, исходный код и бинарные файлы которой доступны по

адресу https://github.com/COKPOWEHEU/piezoeffect_GaAs. Схематически рассматриваемая структура изображена на рисунке 11.

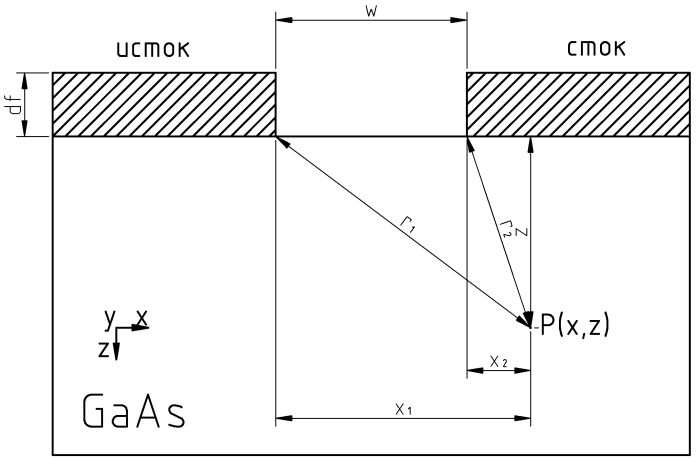


Рисунок 11 — Модель рассматриваемой структуры

Для расчета концентрации пьезозарядов в объеме полупроводника применялась следующая зависимость:

$$N_{pz} = \gamma_b \sigma_f d_f \left(\frac{x_1 z\left(x_1^2 - \beta z^2\right)}{r_1^6} - \frac{x_2 z\left(x_2^2 - \beta z^2\right)}{r_2^6} \right) ,$$

где $\gamma_b = 2\, d_{14}(4 - \nu)/\pi$

$\nu = 0{,}23$, коэффициент Пуассона для GaAs

$d_{14} = 2{,}69 \cdot 10^{-17}$ Кл/дин, пьезокоэффициент для GaAs

d_f — толщина диэлектрика

$\beta = (2 + \nu)/(4 - \nu) = 0{,}59$

σ_f — механическое напряжение.

Пьезоэлектрический коэффициент здесь записан для направления [011]. Для расчета матрицы коэффициентов для других направлений следует воспользоваться матрицами

поворота. При сравнении матриц для направлений [011] и [01$\bar{1}$] видно, что коэффициенты d'_{21} и d'_{23} для выбранных направлений отличаются только знаком, а коэффициенты d'_{15}, d'_{25} и d'_{35} равны нулю. Таким образом, для этих двух направлений пьезоэффект в одном случае приводит к увеличению концентрации носителей, а в другом — к уменьшению.

Разность потенциалов между произвольной точкой канала и истоком может быть вычислена по следующей формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{l_2}{l_1} \quad ,$$

где l_1, l_2 — расстояния до заданных точек.

В этой формуле $\tau = N_{PZ}\cdot dx\cdot dz$ — плотность заряда. Вследствие симметрии вдоль одного из направлений (этим направлением была выбрана ось OY), задача может быть рассчитана как двумерная с учетом того, что каждый заряд представляет собой бесконечно длинный провод.

Поскольку данная модель не предполагает определяющего вклада приконтактной области и примерного равенства концентрации электронов в канале с концентрацией пьезозарядов, более логичной выглядит модель полевого транзистора. В таком случае максимальный электрический потенциал оказывается сосредоточен в середине зазора, а при приближении к краям его величина плавно убывает. Численное моделирование, результаты которого приведены на рисунке 12 подтверждают, что существует область между -4,5 и -5 единицами, в которой потенциал более короткого зазора превышает потенциал более длинного, то есть поведение полностью аналогично приведенному ранее случаю расчета концентрации электронов в канале при длинах зазоров, сравнимых с глубиной залегания двумерного газа.

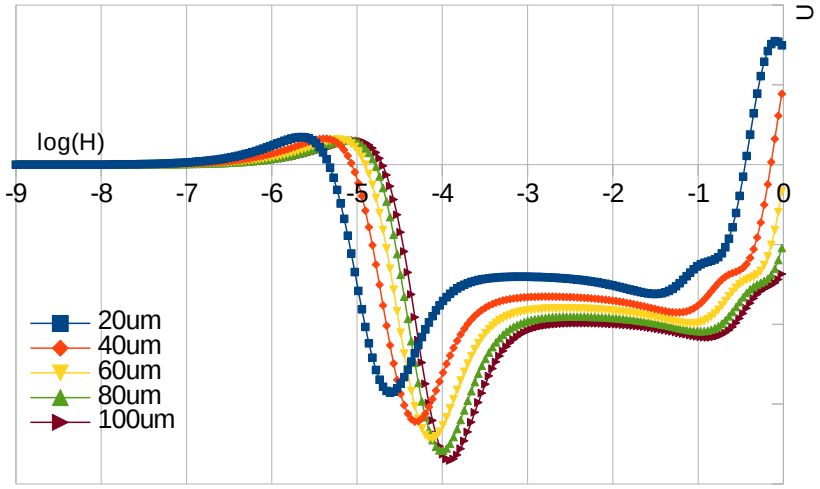


Рисунок 12 — Зависимость потенциала в середине канала от глубины интегрирования

В данных моделях параметры подбирались экспериментально с целью подтвердить возможность появления обратной зависимости проводимости зазора от его длины. При изготовлении реальных структур такое совпадение параметров выглядит маловероятным, однако не невозможным.

Основные результаты и выводы

1. Отработан режим создания омических контактов на основе Ni/Ge/Au, работоспособных при температурах до 1.5 К к структурам с «глубоким» (135 нм) и «мелким» (40 нм) залеганием двумерного электронного газа.

2. Проведен ряд экспериментов по созданию контактов на основе системы Pd/Ge/Au, не обнаруживший преимуществ данной системы перед традиционной Ni/Ge/Au в случае рассматриваемых в настоящей работе гетероструктур.

3. При совместном измерении электрических характеристик контактов и АСМ сканировании поверхности обнаружен эффект образования затвора Шоттки при несовпадении напыленных слоев металлизации порядка 0,1 мкм.

4. Обнаружен эффект потери контактом омических характеристик при слишком долгом освежении в растворе HCl перед напылением металлизации контактов.

5. Предложен метод дополнительной очистки окон в фоторезистивной маске при помощи разогретого водорода, что может быть актуально при экспериментах с толщиной фоторезиста и опасности повреждения поверхности полупроводника традиционными методами очистки.

6. Обнаружен эффект аномальной зависимости сопротивления зазора полупроводника от расстояния между соседними контактами. При низких температурах сопротивление зазора 20 мкм превышало сопротивление зазора 100 мкм.

7. Предложена модель, объясняющая влияние удаленных источников механических напряжений (в данном случае, контактов) и кристаллографической ориентации образца на проводимость слоя двумерного электронного газа при помощи пьезоэлектрического эффекта.

8. Разработана универсальная топология заготовок наноструктур, допускающая одновременную обработку большого количества образцов и последующую модификацию с целью изменения топологии в широких пределах при помощи атомно-силового микроскопа.

9. Разработана технология импульсной силовой нанолитографии и подтверждена ее эффективность при индивидуальной обработке кристаллов с глубиной залегания ДЭГ 135 нм. Данная технология обеспечивает ширину изолирующей канавки менее 50 нм, обеспечивая при этом пробивное напряжение более 1 В и токов утечки единицы наноампер при рабочей температуре 10 К и ниже.

10. При помощи локального анодного окисления были изготовлены «мелкие» наноструктуры, на которых наблюдается квантование проводимости и влияние на нее потенциального рельефа, создаваемого затворами.

11. При помощи импульсной силовой нанолитографии были изготовлены «глубокие» наноструктуры, на которых наблюдается размерное квантование проводимости.

12. В «глубоких» наноструктурах обнаружено наличие параллельного проводящего канала, вероятнее всего, расположенного на границе слоя AlGaAs и защитного слоя GaAs, однако попытки его разрушения при помощи кислородной плазмы и обработки в водороде эффекта не дали.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих публикациях

1. М.В. Степушкин, С.П. Курочка Аномальная зависимость сопротивления HEMT-подобной структуры от расстояния между контактами // Сборник трудов XIII Всероссийской конференции молодых ученых (2018) с. 304 — 305
2. М.В. Степушкин Особенности изготовления омических контактов к гетероструктурам GaAs/AlGaAs // Сборник трудов XIV Всероссийской конференции молодых ученых (2019), Саратов, с. 333 — 334
3. М.В. Степушкин Влияние пьезоэффекта на проводимость низкоразмерной структуры // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019»
4. М. В. Степушкин, В. Г. Костишин, В. Е. Сизов, А. Г. Темирязев Использование атомно-силового микроскопа для создания одномерной структуры на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2018. Т. 21, No 4 с. 248 — 253
5. С.П. Курочка, М.В. Степушкин, В.И. Борисов Особенности создания омических контактов к гетероструктурам GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2016. Т. 19, No 4 с. 271 — 278
   S.P. Kurochkaa, M.V. Stepushkin, and V.I. Borisov Features of Creating Ohmic Contacts for GaAs/AlGaAs Heterostructures with a Two-Dimensional Electron Gas // Russian Microelectronics, 2017, Vol. 46, No. 8, pp. 600–607
6. Степушкин М.В. Создание и исследование полупроводниковых наноструктур на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs с вдумерным электронным газом с высокой подвижностью электронов // 69-е дни науки студентов МИСиС — типография Издательского Дома МИСиС, 2014. - С.55.
7. Степушкин М.В. Создание и исследование омических контактов на основе Pd/Ge/Au к двумерному электронному газу в гетероструктуре GaAs/AlGaAs // 68-е дни науки студентов МИСиС — типография Издательского Дома МИСиС, 2013. - С.80.
8. В.И. Борисов, Н.А. Кувшинова, С.П. Курочка, В.Е. Сизов, М.В. Степушкин, А.Г. Темирязев Полупроводниковые структуры с одномерным квантовым каналом и планарными боковыми затворами, созданные методом импульсной силовой

нанолитографии // Физика и техника полупроводников, том 51, вып. 11 (2017) с. 1534 — 1537

V. I. Borisov, N. A. Kuvshinova, S. P. Kurochka, V. E. Sizov, M. V. Stepushkin, and A. G. Temiryazev Semiconductor Structures with a One-Dimensional Quantum Channel and In-Plane Side Gates Fabricated by Pulse Force Nanolithography // Semiconductors, Vol. 51, No. 11, (2017) pp. 1481–1484

9. В.И. Борисов, Н.А. Кувшинова, С.П. Курочка, В.Е. Сизов, М.В. Степушкин, А.Г. Создание полупроводниковых многозатворных структур с квантовым каналом методом импульсной силовой СЗМ-нанолитографии // Труды XXI международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника» том 1 (Нижний Новгород 13-16 марта, 2017) с. 273 — 274