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

На правах рукописи

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»

Диссертация 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

Оглавление

Условные обозначения и аббревиатуры....4
Введение....5
1. Создание структур с двумерным электронным газом....10
1.1. Наиболее распространенные типы наноструктур....11
1.2. Устройство гетероструктуры с ДЭГ....14
2. Технологические операции при изготовлении образцов....17
2.1. Выращивание....18
2.2. Оптическая литография....19
2.3. Влияние освежения....22
2.4. Очистка водородом....24
2.5. Влияние совмещения слоев....25
2.6. Изготовление контактов к полупроводникам....28
2.6.1. Вплавляемый индиевый контакт....34
2.6.2. Механизм формирования контакта Ni/Ge/Au....36
2.6.3. Описание установки вакуум-термического напыления....41
2.6.4. Контакт Pd/Ge/Au....43
2.6.5. Изготовление контактов Ni/Ge/Au....45
2.6.6. Вжигание....46
2.7. Заключение....49
3. Нанолитография....51
3.1. Локальное анодное окисление....52
3.2. Импульсная силовая нанолитография....53
3.3. Заключение....58
4. Измерение характеристик образцов....60
4.1. Измерение параметров пластины....60
4.2. Измерения методом передающей линии....62
4.2.1. Измеренные характеристики....64
4.3. Измерение характеристик рабочих структур....67
4.3.1. Описание измерительной установки....67
4.3.2. Характеристики «мелких» структур....69
4.3.3. Характеристики «глубоких» структур....73

4.4. Заключение....78
5. Анизотропия контакта....80
5.1. Моделирование пьезоэффекта в полевом транзисторе....84
5.2. Моделирование пьезоэффекта в гетероструктуре....88
5.3. Заключение....95
Основные результаты и выводы....97
Список использованных источников....99
Приложение А — скрипт, используемый для анализа характеристик затворов....109
Приложение Б — Электрическая схема блока понижающего трансформатора....110

Условные обозначения и аббревиатуры

EDX — Energy Dispersive X-ray spectroscopy, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия

HEMT — high electron mobility transistor, транзистор с высокой подвижностью электронов

RTA — rapid thermal annealing, импульсное вжигание

TEM — Transmissin electron microscope, просвечивающий электронный микроскоп

TLM — transmission line method, метод передающей линии

СЛГС — селективно легированная гетероструктура

АСМ — атомно-силовой микроскоп

ДЭГ, 2DEG — двумерный электронный газ, two-dimensional electron gas

ИСНЛ — импульсная силовая нанолитография

ЛАО — локальное анодное окисление

МДП (структуры) — металл-диэлектрик-полупроводник

Введение

Актуальность темы исследования

Селективно-легированные полупроводниковые гетероструктуы (СЛГС) 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 [1, 2]. 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

1 Освежение — стандартная операция удаления оксидной пленки полупроводника перед напылением

• 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 K

Научная новизна работы

• Впервые созданы полупроводниковые наноструктуры с секционными планарными затворами

• 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.

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.

1. Создание структур с двумерным электронным газом

Низкоразмерными структурами называются такие структуры, в которых движение носителей заряда хотя бы в одном ограничено до величины порядка длины волны де Бройля. При этом, согласно [3, 4], энергия в данном направлении может принимать только дискретный набор значений, равный для простейшего случая прямоугольной ямы,

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ma^2} \quad ,$$

где m — эффективная масса электрона,

a — ширина ямы.

В том случае, если движение ограничено только в одном направлении, суммарная энергия складывается из квантованной составляющей по этому направлению и непрерывных по остальным:

$$E = E_n + \frac{P_X^2 + P_Y^2}{2m} \quad ,$$

где px, py — компоненты импульса в плоскости слоя.

Совокупность таких электронов называется двумерным электронным газом (ДЭГ). Электроны, принадлежащие одному и тому же уровню E_n, могут иметь любую энергию, не меньшую, чем E_n. Если энергии электронов недостаточно для перехода на уровень E_{n+1}, считается что они находятся в одной подзоне размерного квантования. Это значит, что они могут двигаться только в пределах одной плоскости, то есть вести себя как двумерные частицы. Совокупность таких электронов называется двумерным электронным газом. Если движение электронов ограничено не по одной оси, а по двум, он считается находящемся в одномерной квантовой нити. Ограничение одновременно по всем осям создает квантовую точку.

Для того, чтобы большая часть электронов находилась в одной подзоне, разность энергий между подзонами должна быть намного больше, чем тепловая энергия электронов:

$$E_{n+1} - E_n \gg kT \quad .$$

При постоянной форме квантовой ямы, ограниченной технологическими особенностями применяемого оборудования, данное условие может быть выполнено только при уменьшении температуры образца. При формировании одномерной квантовой нити из двумерного газа необходимо обеспечивать характерные размеры структуры, сравнимые с длиной свободного пробега электрона.

1.1. Наиболее распространенные типы наноструктур

Существует множество способов создания низкоразмерных структур. Наиболее очевидный — выращивание тонких пленок металла или полупроводника. Однако сложности получения пленок с достаточно гладкими поверхностями и малым количеством дефектов, играющих роль центров рассеяния, долгое время препятствовали наблюдению квантования. Первые удачные опыты были проведены с пленками Bi. В [5] описан простейший способ получения одномерных нанопроводов, то есть проволочек кремния, покрытых оксидной пленкой. Для этого авторы предлагают использовать смесь Si:Fe в пропорции 95:5, которой методом горячего прессования придается форма пластинки. Далее эту пластинку, после обезгаживания, выдерживали в кварцевом реакторе при температуре 1200 °C в течение 20 часов в потоке аргона. В результате на стенках реактора образовывалась губкообразная структура, представлявшая собой переплетенные нанопроволоки. Похожие способы описаны в [6, 7]. Менее хаотичной ориентации нанопроводов можно достичь при помощи механизма роста пар-жидкость-кристалл [8, 9]. Метод основан на адсорбции кремния из паров SiH_4 или Si_2H_6 на маленькой капле жидкого металла. В процессе эксперимента она

пересыщается кремнием, что приводит к его кристаллизации в виде длинных монокристаллических проводов, диаметр которых определяется диаметром капли.

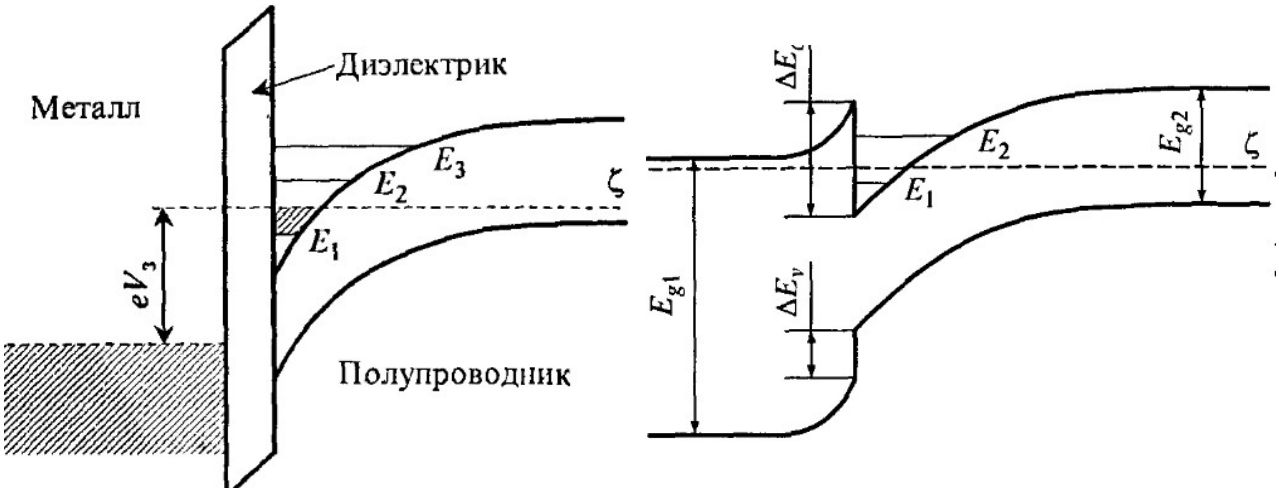
Первые попытки выращивать таким способом большое количество параллельных нитей окончились неудачей, поскольку металл капли слишком активно диффундировал по поверхности подложки. Решение было предложено в [10]: добавление в атмосферу незначительного количества кислорода блокировало диффузию металла. Для получения легированных проволок, согласно [11, 12], достаточно добавления к силану диборана (B_2H_6) для проводимости p-типа, либо фосфина (PH_3) или паров красного фосфора для проводимости n-типа.

Несмотря на то, что металлы плохо подходят для наблюдения квантово-размерных эффектов, формирование наноструктур на их основе возможно. Для этого необходимо, чтобы размеры проводящего канала были порядка атомных, однако такие структуры быстро окисляются в атмосфере. Например, в [13] квантование проводимости в золотой проволоке наблюдается в процессе ее электрохимического наращивания или растворения между тонким проводящим зондом и золотой подложкой. Созданные современными методами литографии металлические наноструктуры в основном представляют интерес в случае исследования одно- и многослойных магнитных структур, а также приборов типа одноэлектронного транзистора.

Использование полупроводника в качестве исходного материала открывает возможности ограничения движения электронов путем приложения электрического поля [14]. На этом принципе построены МДП-структуры: формирование двумерного электронного газа происходит на границе полупроводник-диэлектрик при приложении определенного напряжения, задающего ширину квантовой ямы, как показано на рисунке 1а. Наиболее подходящим полупроводником для таких структур является кремний, поскольку технологии работы с ним хорошо отработаны, а в качестве подзатворного диэлектрика может быть использован его собственный оксид SiO_2. Максимальная концентрация

электронов в таких структурах ограничена напряжением пробоя диэлектрика и составляет 10^{13}см$^{-3}$. Интересными особенностями являются возможность управлять концентрацией носителей и шириной квантовой ямы. Кремниевым МДП-структурам присущи также и существенные недостатки, такие как низкая подвижность электронов, составляющая порядка $5 \cdot 10^4$ см^2/(В·с).

Значительно большей подвижностью обладают полупроводники $A^{III}B^{V}$. Технология эпитаксиального выращивания и возможность плавного изменения химического состава по толщине позволяют создавать структуры с переменной шириной запрещенной зоны и энергией Ферми. Это дает возможность формирования квантовой ямы в разрыве зон, как показано на рисунке 1б. Основным преимуществом гетероструктуры по сравнению с МДП-структурой является высокое качество гетерограницы, обусловленное возможностью подбора материалов с близкими постоянными решетки. Таким образом, плотность поверхностных состояний в гетероструктурах может быть на несколько порядков ниже, чем в МДП-структурах. Кроме того, это дает возможность получить высокие значения подвижности электронов: в структурах GaAs/AlGaAs подвижность при низких температурах может достигать 10^7 см^2/(В·с).



а) б)

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

Эти особенности, а также наличие отработанной технологии выращивания и литографии, делают гетероструктуры наиболее оптимальным материалом для исследования низкоразмерных эффектов.

1.2. Устройство гетероструктуры с ДЭГ

Как было сказано ранее, основными требованиями к лабораторным образцам являются высокая подвижность носителей заряда, малое количество примесей и возможность формирования в них проводящих структур с характерными размерами менее единиц микрометров. Для выращивания таких структур требуется наличие высококачественного и дорогого оборудования и сырья, а также тщательная настройка, что приводит к увеличению стоимости выращивания таких структур по сравнению с серийно выпускаемыми структурами, используемыми, например, при производстве транзисторов. Кроме того, особенностью транзисторов является высокая концентрация электронов, даже в ущерб подвижности, которая при комнатной температуре в любом случае ограничивается в основном рассеянием электронов на тепловых колебаниях решетки. В то же время для лабораторных структур важна именно подвижность, а центрами рассеяния при рабочих температурах, составляющих десятки градусов Кельвина, выступают ионы примесей и дефекты кристаллической решетки. Это приводит к тому, что пластины, пригодные для исследования низкоразмерных эффектов, являются редкими и дорогими. Соответственно, лабораторные методы их обработки должны обеспечивать возможность изменения топологии на заготовке минимального размера, лучше всего — на отдельном кристалле.

Наиболее распространенным методом изготовления таких пластин является молекулярно-пучковая эпитаксия. Рассмотрим этот процесс на примере гетероструктуры GaAs / AlGaAs [15]. На полуизолирующую пластину GaAs наносится буферный слой нелегированного GaAs, нелегированный слой AlGaAs (спейсер), легированный слой AlGaAs и

защитный слой GaAs. Легирование слоя AlGaAs может быть или объемным, когда примесь распределена по всей толщине, или тонким (δ-легирование. Зонные диаграммы таких структур приведены на рисунке 2. Наличие спейсера обусловлено необходимостью сохранения высокой подвижности электронов в двумерном канале, которая могла быть снижена из-за наличия атомов легирующей примеси в проводящем канале. Защитный слой служит для защиты химически активного слоя AlGaAs от воздействия внешней среды.

Любопытно отметить, что легирование области полупроводника является не единственным способом получения достаточной концентрации свободных электронов в канале. В работах [16, 17], например, рассматривается применение для этой цели пьезоэффекта, возникающего вследствие механического напряжения на границе слоев GaN и AlGaN, обладающих различными постоянными решетки.

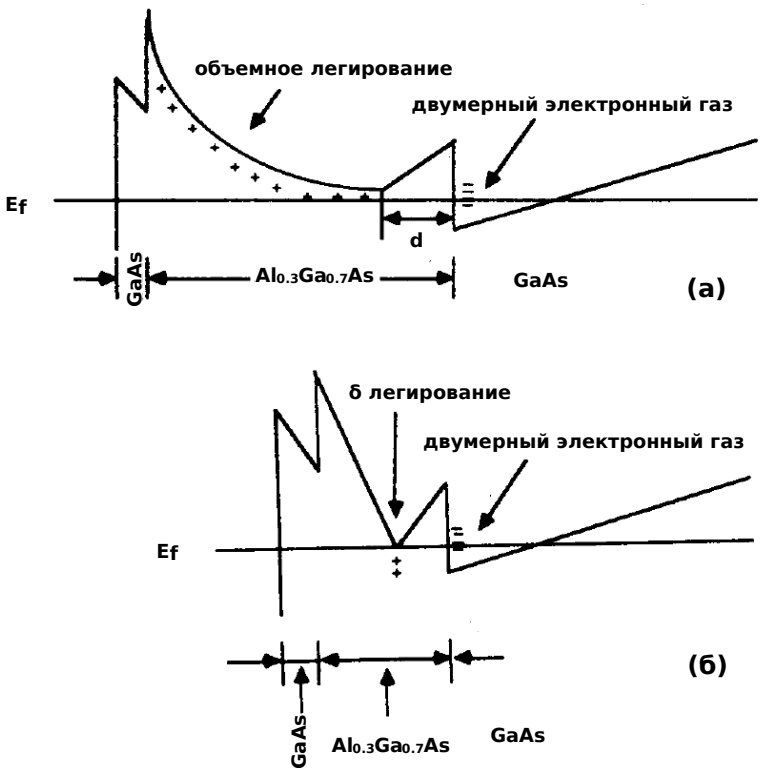


Рисунок 2 —Зонные диаграммы гетероструктур GaAs/AlGaAs с объемным (а) и δ-легированием (б)

Небольшая концентрация носителей заряда в канале приводит к высокой чувствительности к зарядам, вызванным дефектами или

примесями на поверхности структуры. Отчасти эти заряды экранируются легированным слоем с высокой концентрацией носителей заряда, но крайне низкой подвижностью. Однако для дополнительного уменьшения их влияния желательно увеличивать расстояние от поверхности до слоя ДЭГ. При этом возникает проблема проведения нанолиторгафии на достаточную глубину, что приводит к необходимости разработки новых методов литографии.

Возможность изменения топологии полупроводникового образца при помощи литографии позволяет создавать не просто одномерные провода, но и сложные многозатворные структуры, схожие с транзисторными. Изменение напряжения на затворах обеспечивает возможность изменения продольного потенциального рельефа в канале, длины его одномерной области и создания квазинульмерных областей. Наиболее простой в изготовлении затвор аналогичен применяемым в транзисторах и представляет собой слой металла, напыленный на поверхность полупроводника, при этом поздатворным диэлектриком служат нелегированные слои структуры [18]. Затворы такого типа называются расщепленными и отличаются простотой изготовления, но при этом обладают значительной емкостью, которая может экранировать межэлектронные взаимодействия в канале. Более перспективными на настоящий момент выглядят затворы, сформированные в слое ДЭГ путем создания тонких изолирующих областей, отделяющих затвор от канала или секции затвора друг от друга. Значительно меньшая площадь такого затвора снижает его емкость, а меньшее расстояние до канала позволяет формировать секционированные затворы с меньшим влиянием одной секции затвора на соседние. Существенным недостатком таких затворов является сложность изготовления: требуется обеспечить одновременно разрешающую способность до десятков нанометров, большую глубину обработки (для структур с небольшой глубиной залегания ДЭГ она составляет до 50 нм) и малую ширину.

В настоящей работе рассматриваются именно структуры с боковыми затворами, сформированными в слое ДЭГ.

2. Технологические операции при изготовлении образцов

Процесс изготовления образцов основан на стандартной технологии изготовления приборов микроэлектроники. Например, в [19] предложена следующая схема (в скобках приведены страницы, на которых более подробно рассматриваются особенности данного этапа, специфичные для рассматриваемых в настоящей работе структур):

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) (стр. 19)

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 [20, 21]. (стр. 19)

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 (авторы [22] рекомендуют травление в течение 5 секунд при концентрации 30%), промывкой в воде и сушкой в потоке азота. (стр. 22, 24)

6. Напыление слоев металлизации (стр. 25, 28)

7. Удаление фоторезиста и напыленного на него металла.

8. Вжигание контактов в атмосфере инертного или форминг газа (стр. 46)

При экспериментах с изготовлением контактов используется упрощенная технология, являющаяся развитием технологии создания контактов к объемному GaAs [15, 19, 23, 24]. Например, нет необходимости повторной литографии, зато вжигание проводится уже после резки пластины на отдельные кристаллы. Изготовление низкоразмерных структур, напротив, помимо оптической, требует проведения дополнительной нанолитографии.

2.1. Выращивание

Исходный материал для изготовления структур представляет собой пластину полуизолирующего GaAs с нанесенным слоем AlGaAs, на границе раздела которых формируется квантовая яма, содержащая двумерный электронный газ. Слой AlGaAs содержит легирующую примесь, отделенную от проводящего слоя слоем нелегированного AlGaAs, что минимизирует ее влияние на подвижность электронов при возможности получения достаточной концентрации. Для защиты от воздействия окружающей среды пластина покрыта слоем GaAs.

Проводимость лучших структур, описанных в литературе, может превышать 10^7 см^2/(В·с) при субгелиевых температурах. Применяемые в настоящей работе структуры обладают более низкой подвижностью, составляющей примерно $5 \cdot 10^5$ см^2/(В·с). Изготовлены они были следующим образом: на подложке из полуизолирующего GaAs последовательно были выращены: буферный слой нелегированного GaAs, слой AlGaAs, в котором расположены два сильнолегированных кремнием δ-слоя и защитный слой GaAs.

В настоящей работе исследовалось два типа структур: с «мелким» залеганием ДЭГ, для которых возможно проведение нанолитографии широко известным методом локального анодного окисления, и с

«глубоким», для которого традиционные методы неэффективны. Важность исследования «глубоких» структур основана на предположении о том, что при увеличении расстояния от поверхности полупроводника до проводящего слоя будет снижено влияние поверхностных зарядов. Толщины слоев для этих двух 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

Исходные гетероструктуры AlGaAs/GaAs на полуизолирующих подложках были выращены к.т.н. А.И. Топоровым методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ИФП СО РАН. Фотолитография была проведена Кувшиновой Н.А. в ОАО «НПП «Исток» им. Шокина».

2.2. Оптическая литография

Требование применения низких температур при измерении характеристик образца приводит к необходимости разработки структуры, пригодной для помещения в криостат. Это накладывает ограничения на количество контактов (в криостатах, применяемых в настоящей работе их 12), а также размеры корпуса и панельки. При этом заготовка структуры должна обеспечивать гибкость изменения конфигурации канала и

затворов. С этой целью были разработаны и изготовлены фотошаблоны, приведенные на рисунке 3.

При изготовлении образца первой операцией является удаление слоя полупроводника за пределами рабочей области — травление мезы. Таким образом исключаются утечки по площади кристалла. Данная операция проводилась по шаблону, приведенному на рисунке 3а. Размер рабочей области составляет 100х100 мкм.

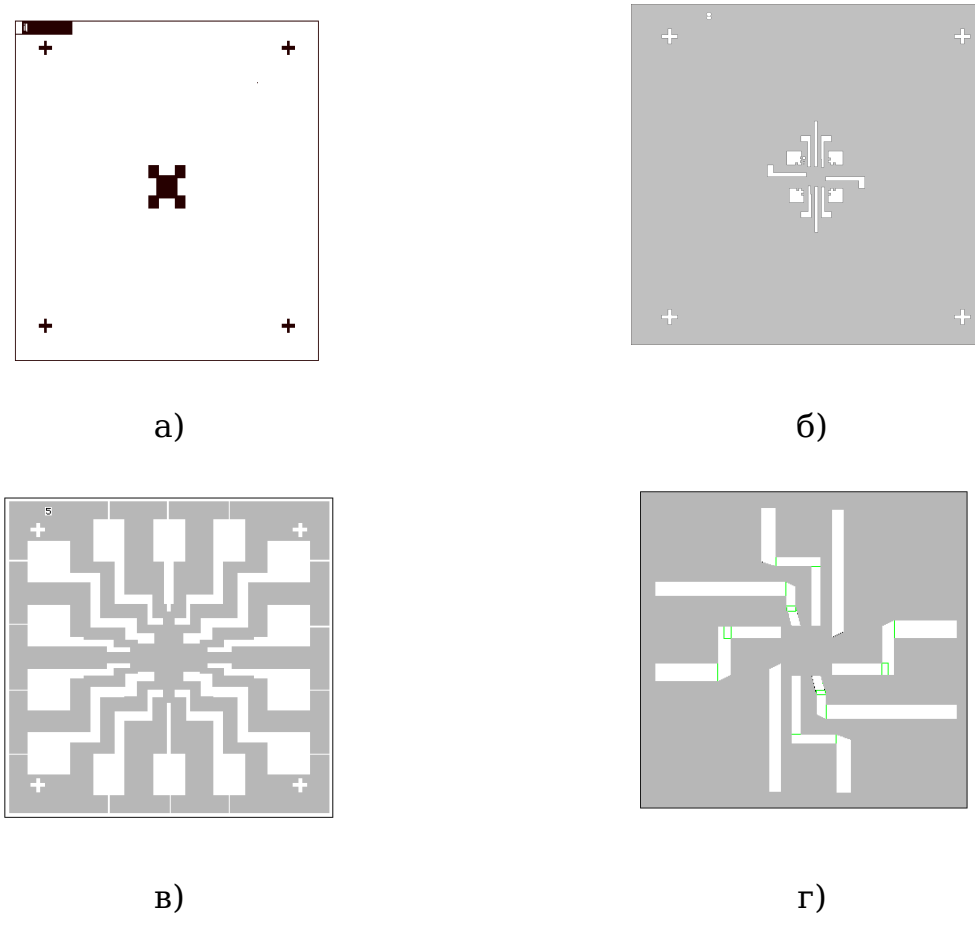
Далее на пластину наносится двухслойный фоторезист для образования обратного клина. Толщина нижнего слоя составляет 0,5 — 1 мкм. Далее в маске по шаблону, приведенному на рисунке 3б, вскрываются окна для напыления металлизации контактов. Метод фотолитографии с обратным клином основан на экспонировании верхнего слоя фоторезиста с последующим травлением нижнего слоя через вскрытые окна. В результате этого верхний слой как бы нависает над поверхностью полупроводника, и напыляемый на него металл не образует сплошной пленки. После напыления производится взрывное удаление фоторезиста, для чего образец помещается в ацетон или, как сделано в настоящей работе, диметилформамид. При этом нижний слой перед растворением значительно увеличивается в объеме, из-за чего метод и получил свое название. Отсутствие сплошной пленки металла обеспечивает отсутствие механических напряжений при удалении остальной части, что минимизирует риск смещения металлизации или ее отрыва от полупроводника. Как будет показано ниже, наличие промежутка между полупроводником и фоторезистивной маской может приводить к неожиданным эффектам.

Как видно из рисунка, площадь металлизации омических контактов слишком мала для надежного приваривания контактов корпуса, поэтому на полупроводник через маску, приведенную на рисунке 3в, наносится металлизация золота с подслоем титана, обладающая хорошей адгезией и достаточной площадью и толщиной.

Последним процессом оптической литографии является травление изолирующих канавок через маску, приведенную на рисунке 3г.

Необходимость данного этапа вызвана низкой скоростью применяемых способов нанолитографии и малой рабочей областью, составляющей 100x100 мкм. Травление проводилось в растворе H_2O: H_2O_2: H_2SO_4 в соотношении 400:10:10.

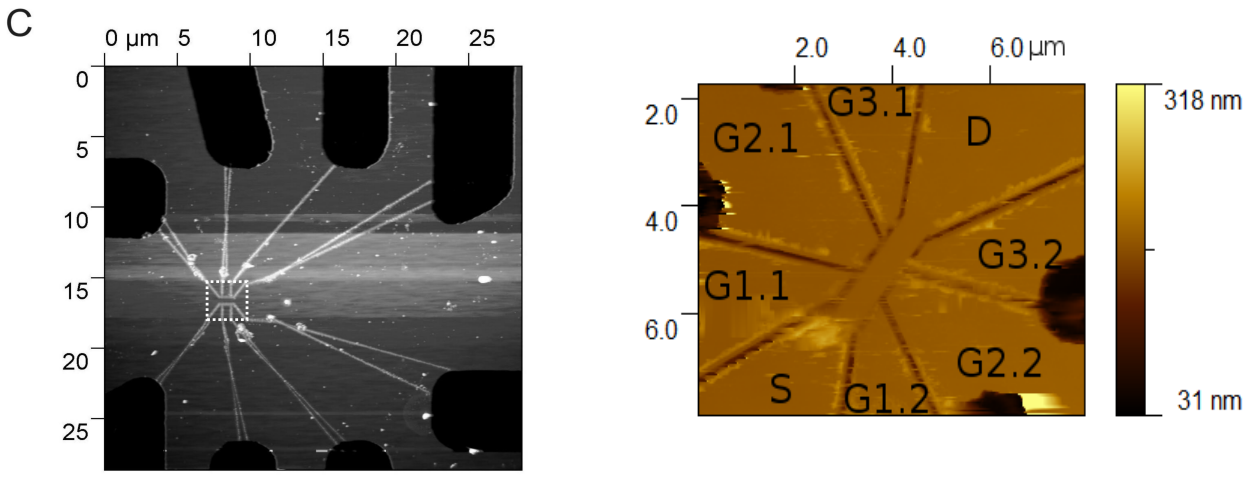
Далее пластина разрезалась на отдельные кристаллы, которые устанавливались в корпус. В процессе дальнейшей нанолитографии канавки соединялись изолирующими областями для формирования канала и затворов, как показано на рисунке 4а. На рисунке 4б показана типичная конфигурация этих областей. Буквами D и S обозначены соответственно сток и исток, буквами G1.1 — G3.2 — секционированные затворы. В тех случаях, когда на разные секции одного затвора подается одинаковое напряжение, он будет обозначаться просто 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 Ti/Au. г) маска для травления канавок.



а) б)

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

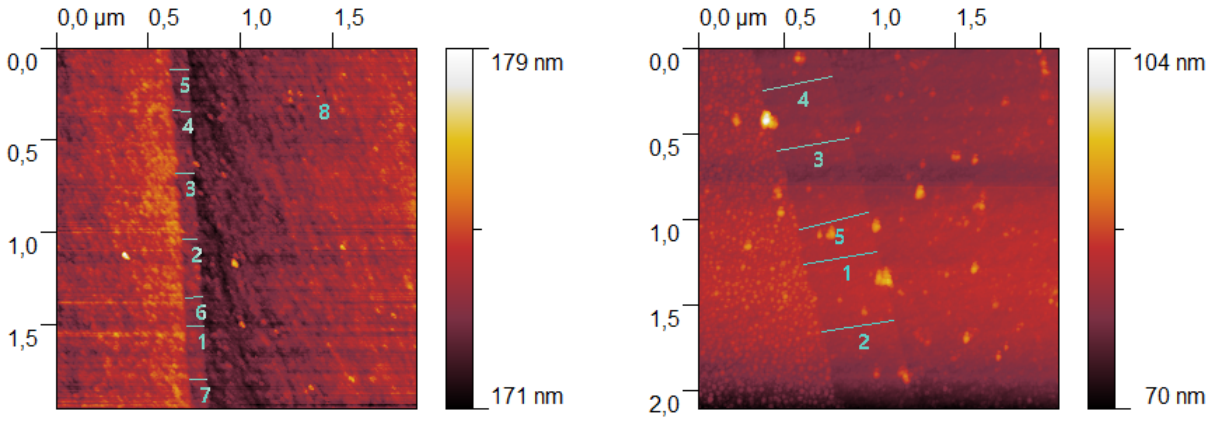
2.3. Влияние освежения

Как уже было сказано, перед помещением пластины в напылительную установку проводится ее освежение в растворе кислоты. Это необходимо для удаления с поверхности окисленного слоя, что улучшает адгезию и качество контактов. Обычно для этого используется раствор HCl в воде в соотношении 1:1 в течение нескольких секунд с последующим промыванием в дистиллированной воде и сушке в потоке азота. После успешного применения такого режима к структурам с «глубоким» залеганием ДЭГ, были предприняты попытки применения к структурам с «мелким» залеганием. Однако появление сильной нелинейности на их вольт-амперных характеристиках даже при комнатной температуре послужило причиной поиска более оптимального режима освежения. Было сделано предположение, что слишком долгое освежение каким-то образом влияет на поверхность полупроводника и, следовательно, ухудшает характеристики «мелких» структур, которые боле чувствительны к этому. Эксперименты с уменьшением концентрации

раствора подтвердили улучшение характеристик как при комнатной температуре, так и при охлаждении до гелиевой.

Исследования поверхности при помощи атомно-силового микроскопа, приведенные на рисунке 5, показали, что глубина травления не зависит от времени и концентрации кислоты и составляет около 1 нм. Таким образом, кислота быстро растворяет именно окисленный слой, практически не взаимодействуя с полупроводником. Эта особенность может быть использована для травления на заданную глубину [26]. При этом время нахождения в кислоте влияет на увеличение горизонтального размера вытравленной области по сравнению с размером маски, как показано в таблице 2.

Таким образом, для получения качественных контактов необходимо избегать слишком долгого освежения.



а) б)

Рисунок 5 — АСМ изображения областей, подтравленных кислотой в концентрации 1:2 в течение 5 секунд (а) и в концентрации 1:1 в течение 20 секунд (б)

Таблица 2 — зависимость ширины канавки от концентрации и времени травления

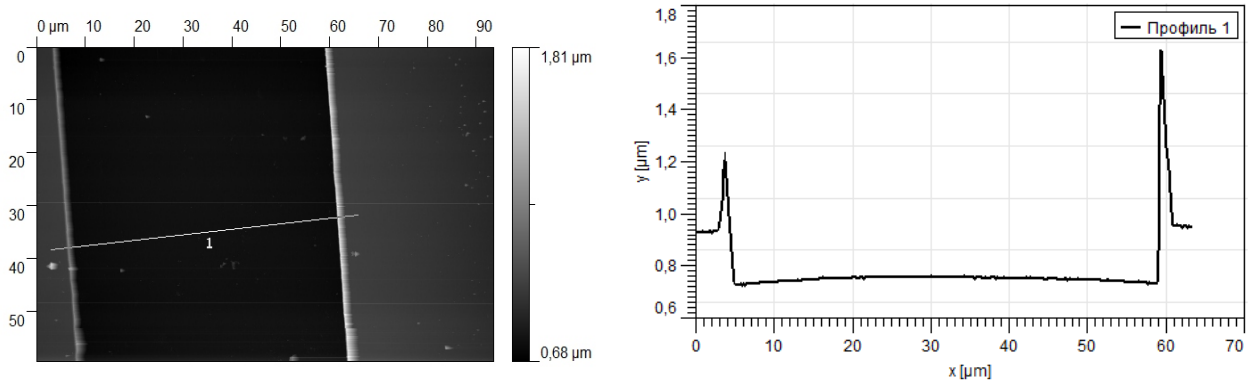
Соотношение $HCl:H_2O$	Время травления, с	Ширина канавки, нм
1:1	2	140
1:1	5	150
1:1	10	270
1:1	20	430
1:2	5	90
1:2	10	170
1:2	20	200

2.4. Очистка водородом

Данный этап не является обязательным при изготовлении контактов, однако в ряде случаев он бывает полезен. Иногда при сканировании образца на атомно-силовом микроскопе, на краях контактов могут быть обнаружены высокие бортики, подобные показанным на рисунке 6. Вероятнее всего, их появление обусловлено недостаточной очисткой поверхности полупроводника от фоторезиста в окнах, в результате чего металл напыляется не только на полупроводник, но и на фоторезист. Причем он может быть не соединен с металлом, напыленным на остальную часть фоторезиста, в результате чего во время взрывной фотолитографии не отрывается от металла, напыленного на арсенид галлия, а только изгибается. Эксперименты с дополнительной очисткой водородом, разогретым при помощи вольфрамовой спирали (видна на фотографии установки, приведенной в соответствующей главе на рисунке 12) до ~2000 °C, показали что обработки в течение 10 минут достаточно для полной очистки остатков фоторезиста. Источником водорода в рассматриваемой установке служил электролизер, катод которого представлял собой тонкостенную палладиевую трубку. При

работающем на полную мощность диффузионном насосе источник обеспечивал давление газа (2 — 3)·10^{-5} мм.рт.ст.

Данный способ предназначен скорее для исправления ошибок, вызванных недостаточно отработанной технологией нанесения и удаления фоторезиста. При ее развитии и уточнении режимов, необходимость в нем отпадает.



а) б)

Рисунок 6 — АСМ изображение (а) и профиль (б) краев контакта, напыленного без обработки водородом

2.5. Влияние совмещения слоев

Омические контакты к образцам изготавливались путем последовательного напыления слоев никеля, германия и золота с последующим вжиганием. Использование напылительной установки, не обеспечивающей точное позиционирование образца над испарительными ячейками, позволило обнаружить еще один фактор, влияющий на электрические характеристики контактов — совмещение слоев металлизации. Типичная вольт-амперная характеристика структуры, изготовленной без его учета, приведена на рисунке 7. Как видно, она обладает областями насыщения, не является линейной или хотя бы симметричной. Больше всего такая характеристика похожа на

характеристику двух встречно включенных диодов с различными параметрами. Стоит отметить, что такая форма была характерна не для одного зазора, что можно было бы объяснить случайным дефектом при изготовлении, а для всех. На разных образцах эта нелинейность и асимметрия были заметны в большей или меньшей степени, но, за исключением некоторых контактов, обладавших явными дефектами, форма характеристики была одинаковой для всех зазоров.

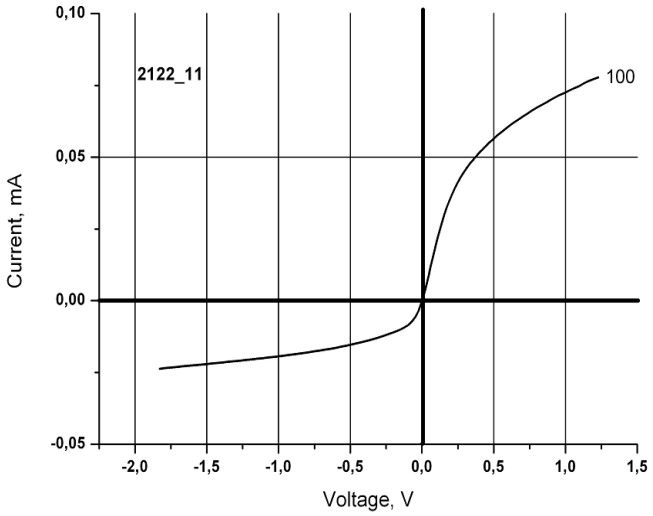


Рисунок 7 — Вольт-амперная характеристика контакта, напыленного со смещением слоев металлизации

Для определения причины этого явления был изготовлен образец с одним круглым контактом, и исследования его поверхности при помощи атомно-силового микроскопа обнаружили вероятную причину. Как показано на рисунке 8, края контакта ступенчатые, причем высота ступенек соответствует толщинам напыленных слоев металлизации. Как будет показано в разделе 2.6.2, омические свойства контакта обеспечиваются взаимодействием всех трех слоев, поэтому отсутствие хотя бы одного из них на краю не позволяло получить омические характеристики контакта с двумерным газом. В результате этого края контакта работали как затворы Шоттки, чем и объясняется форма вольт-амперных характеристик. Причиной такого рассогласования слоев

послужил способ напыления с использованием фоторезиста с обратным клином. Схема этого процесса изображена на рисунке 9. При напылении через вскрытое в фоторезисте окно, находящееся на некотором расстоянии от поверхности, слои металла, испаряемые из разных ячеек, оказываются несколько смещенными относительно друг друга. В применяемой напылительной установке расстояние от образца до лодочек составляет 15 см, расстояние между лодочками 1.5 см, а толщина нижнего слоя фоторезиста 1 мкм. Легко вычислить, что смещение края металлизации должно составлять около 0.1 мкм, что соответствует измеренной величине.

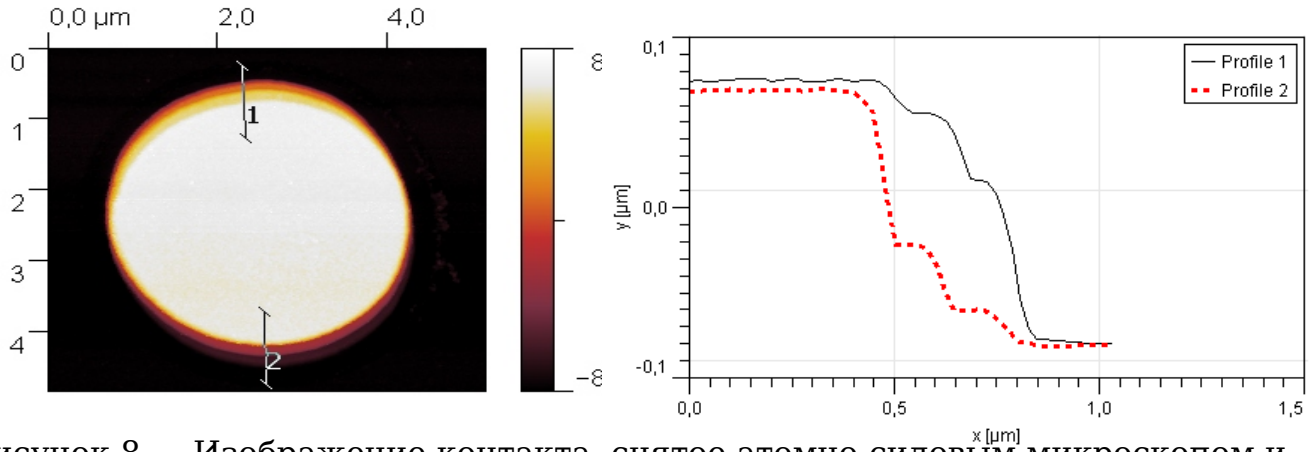


Рисунок 8 — Изображение контакта, снятое атомно-силовым микроскопом и профиль распределения толщины вдоль выбранных отрезков

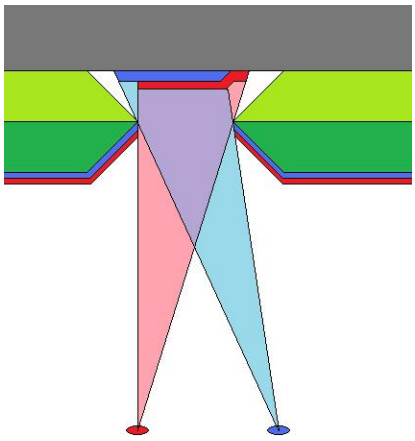


Рисунок 9 — Схема напыления двух слоев металла через фоторезист с обратным клином

Наиболее простым способом минимизации этого эффекта является ориентация образца таким образом, чтобы ступенчатый край располагался параллельно направлению протекания тока и не влиял на проводимость [27]. Однако применение этого способа невозможно в случае структур с развитой топологией. Более правильным же является примененный в настоящей работе способ модификации напылительной установки, при котором обеспечивалась возможность перемещения образца относительно лодочек.

Напыление контактов на модифицированной установке и измерение их характеристик подтвердили отсутствие рассогласования слоев и линейность вольт-амперных характеристик.

Стоит также отметить описанный в [28, 29] способ применения этого эффекта для изготовления металлических туннельных контактов, образующихся при частичном наложении слоев металлов, напыленных под разными углами.

2.6. Изготовление контактов к полупроводникам

При создании полупроводниковых приборов особенностям контактов уделяется большое внимание. Основные требования к ним в случае традиционных приборов, изготовленных из объемного полупроводника, следующие:

1. сопротивление, меньшее, чем сопротивление образца;
2. линейная и симметричная вольт-амперная характеристика;
3. отсутствие инжекции носителей.

В [30, 31] рассмотрены основные механизмы образования контактов металл-полупроводник. Обычно при соединении металла и полупроводника возникает энергетический барьер, вызванный разницей работ выхода электрона. Если работа выхода электрона из металла (Φ_M) больше сродства к электрону полупроводника (χ_S) n-типа, барьер

препятствует движению основных носителей заряда и образуется переход Шоттки. В случае же, когда $\Phi_M < \chi_S$, барьер не препятствует перемещению носителей заряда, и такой контакт является омическим. Этот эффект был обнаружен Шоттки более 60 лет назад для переходов Ni-CdS и Al-CdS соответственно.

Однако при исследовании полупроводников $A^{III}B^{V}$, было обнаружено, что высота потенциального барьера почти не зависит от работы выхода электронов из металла. Для примера в таблице 3 приведены высоты потенциальных барьеров для n-GaAs (χ_S = 4.12 эВ) и некоторых металлов.

Таблица 3 — Высота потенциального барьера металл-GaAs

Металл	Φ_M, эВ	Фм-χ_S, эВ	qφ, эВ (практ)
Pt	5.5	1.38	0.86
Au	5.2	1.08	0.9
Cu	4.59	0.47	0.82
Ag	4.42	0.3	0.88
Al	4.18	0.06	0.8

Согласно модели Бардина, это обусловлено наличием поверхностных состояний, существующих в полупроводнике еще до контакта с металлом. При достаточно большой концентрации поверхностных состояний (порядка 10^{12} $см^{-2}$), уровень Ферми практически не меняется при контакте с металлом. Во многих полупроводниках, таких как кремний, арсенид галлия или фосфид индия, поверхностные состояния расположены в нижней части запрещенной зоны, в других, таких как фосфид галлия, вблизи середины. Если же, как в арсениде индия n-типа, поверхностные состояния расположены в зоне проводимости или рядом с ней, потенциальный барьер отсутствует, и контакт с любым металлом является омическим.

В дальнейшем Спайсером было обнаружено, что при сколе полупроводников GaAs и InP в вакууме, поверхностные состояния отсутствуют, и уровень Ферми не закреплен в запрещенной зоне. Однако, при попадании на поверхность полупроводника атомов кислорода или металлов, появляются поверхностные состояния, закрепляющие уровень Ферми в его обычном месте. Для этого требуется менее одного монослоя атомов примеси, а их дополнительное количество не приводит к дальнейшему изменению положения. Выяснилось, что поверхностные состояния связаны с собственными дефектами полупроводника, а не примесями. При их образовании примесные атомы всего лишь обеспечивали энергию, необходимую для формирования дефектов.

При исследовании контакта GaAs и InAs выяснилось, что толщина слоя полупроводника, формирующего поверхностные состояния, составляет порядка одного монослоя. Также выяснилось, что таким свойством обладают атомы мышьяка на поверхности полупроводника. Таким образом, высота барьера определяется работой выхода электронов из мышьяка, составляющей 5.11 эВ. Учитывая, что χ_{GaAs} = 4.12 эВ, а χ_{InAs} = 5.07 эВ, высота потенциального барьера соответствует экспериментальным данным (0.9 эВ для GaAs и 0 для InAs).

Таким образом, омический контакт к полупроводнику можно получить следующими способами:

а) подбор металла, для которого $\Phi_M < \chi_S$;

б) внесение поверхностных дефектов, закрепляющих уровень Ферми вблизи зоны проводимости; в таком случае можно использовать любые металлы;

в) сильное легирование приповерхностного слоя полупроводника, что уменьшает ширину барьера и осуществляет возможность туннелирования электронов;

г) создание варизонного слоя полупроводника с меньшей шириной запрещенной зоны, что уменьшает высоту барьера.

Арсенид галлия в настоящее время широко используется в полупроводниковой электронике, детекторах и оптоэлектронике. Он обладает высокой плотностью поверхностных состояний, порядка 10^{14} $см^{-2}эВ^{-1}$, поэтому высота потенциального барьера почти не зависит от материала контакта. Для ее снижения применяют пассивацию растворами Na_2S или $(NH_4)_2S$, которые замещают химически адсорбированные атомы кислорода на атомы серы, удерживаемые физической адсорбцией. За счет того, что при физической адсорбции выделяется меньшая энергия (менее 40 кДж/моль), чем при химической (более 100 кДж/моль), для образования собственных дефектов, приводящих к закреплению уровня Ферми, энергии не хватает. Таким образом плотность поверхностных состояний может быть снижена до 10^{13} $см^{-2}эВ^{-1}$. Еще меньшей плотности состояний можно достичь путем выращивания на поверхности тонкого (толщиной 3.5 нм) слоя n-GaAs:Be ($n=5\cdot10^{16}$ $см^{-3}$), в результате чего уровень Ферми практически не закреплялся на поверхности полупроводника.

Разумеется, пассивация применима и для других полупроводников. Например, обработка GaN может снизить плотность поверхностных состояний от 10^{12} до $8.3\cdot10^{10}$ $см^{-2}эВ^{-1}$, при этом высота барьера Шоттки Ni/Cu-n-GaN составила 1.099 эВ.

Контакт, основанный на принципе сильного легирования поверхности полупроводника или варизонном переходе, может образовываться при плавлении металла с последующим растворением в нем полупроводника («вплавной» контакт) и при их химическом взаимодействии в твердой фазе («невплавной» контакт).

Составными частями контакта являются контактообразующее и легирующее вещества. Контактообразующее вещество представляет собой металл, которым осуществляются электрические соединения на поверхности кристалла, обычно это золото или алюминий. Для образования сильно легированного слоя применяют соответствующие доноры и акцепторы, а для варизонного — изовалентные примеси. В случае GaAs донорами обычно служат германий и кремний. В частности,

германий обладает хорошей растворимостью и может образовывать узкозонный слой, снижая высоту барьера металл-полупроводник до 0.5 эВ. К тому же барьер Ge-GaAs составляет всего 0.1 эВ. В качестве акцептора применяют цинк, благодаря его высокой растворимости. Для создания узкозонных слоев используется индий, образующий трехкомпонентные соединения InGaAs, ширина запрещенной зоны в которых меняется от 1.4 эВ до 0.4 эВ. К тому же, контакт металла с n-InAs является омическим.

Еще один способ сильного легирования приконтактной области — ионное легирование. Донорами для этого являются кремний и селен, а акцепторами — цинк, кадмий и бериллий. Таким способом можно достичь высоких концентраций примеси и сильной неравномерности ее распределения. Существенным недостатком такого метода является высокая концентрация радиационных дефектов, для отжига которых требуется температура около 1000 °C.

Интересным эффектом при образовании сплавного контакта является образование так называемых металлических шунтов. Они представляют собой атомы металла, диффундирующие по линиям несовершенств, например, дислокаций, и образующие проводящие иголки. На их краях возникает сильное электрическое поле, обеспечивающее протекание тока за счет полевой эмиссии. При изучении вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик диодов Шоттки на основе GaAs и GaP в процессе их непрерывного нагревания было установлено, что барьерные индиевые контакты становятся омическими при температурах существенно меньших, чем температуры плавления металла и полупроводника до образования каких либо рекристаллизационных слоев. Омический контакт сохранился и после охлаждения структур. Используя теорию образования шунтов, можно предположить, что в процессе нагрева происходит диффузия индия по дислокациям или другим несовершенствам, что и служит механизмом образования контакта. Если атомный радиус металла меньше постоянной

решетки полупроводника, сопротивление омического контакта можно рассчитать по следующей формуле:

$$R_C = \frac{(\rho_0 + \alpha T) W}{\pi r^2 P} \quad ,$$

где ρ_0 — удельное сопротивление металла при T → 0 K;

α — температурный коэффициент удельного сопротивления;

W — ширина объемного слоя заряда;

r — атомный радиус металла;

P — плотность дислокаций с других несовершенств.

В случае низких плотностей дислокаций (10^4 — 10^6 см$^{-2}$), характерных, например, для GaAs, вклад такого механизма незначителен, в то время как при высокой плотности дислокаций (10^8 — 10^{10} см$^{-2}$), характерной, например, для GaN, он может являться основным механизмом проводимости. Однако, даже в случае низкой плотности дислокаций самого полупроводника, при вплавлении металлического контакта, разность постоянных решетки может создать достаточное количество несовершенств. Из зависимости сопротивления такого контакта можно сделать вывод, что при повышении температуры его сопротивление увеличивается, что характерно для металлического типа проводимости.

Выше сказанное относится к созданию контактов к объемному полупроводнику. Контакты к исследовательским гетероструктурам, предназначенным для наблюдения квантово-размерных эффектов, обладают своими особенностями. Вследствие необходимости проведения измерений при субгелиевых температурах, контакт должен обладать термостабильностью. Малые размеры рабочих областей и предположение о дальнейшем серийном производстве приборов на основе таких структур требуют малой боковой диффузии контакта, долговечности и воспроизводимости. Кроме того, проводящий слой в таких структурах

зачастую отделен от поверхности толстым слоем нелегированного полупроводника, что вынуждает проводить легирование этого слоя при формировании контакта.

Традиционные контакты, применяемые к объемным полупроводникам и даже транзисторам с высокой подвижностью электронов (HEMT), не удовлетворяют этим требованиям. Это приводит к необходимости проведения дополнительных исследований контактов, специфичных именно для рассматриваемых структур.

2.6.1. Вплавляемый индиевый контакт

Наиболее простым способом создания омического контакта к объемному GaAs является вплавление нанесенной на поверхность полупроводника капли или проволоки индия. Для арсенида галлия индий не является легирующей примесью [32, 33], поэтому контакт формируется благодаря образованию соединения InAs, обладающего значительно меньшей шириной запрещенной зоны и, соответственно, высотой потенциального барьера. Согласно исследованиям [34], она составляет 0,03 эВ, а протекание тока в таком контакте происходит благодаря термоэлектронной эмиссии. В [35] предложена модификация данного метода, включающая ионную имплантацию индия.

Такой простейший способ создания контактов не отличается высокой точностью геометрии контакта, воспроизводимостью и надежностью, обладая при этом таким существенным преимуществом, как отсутствие необходимости проведения литографии. Снижение надежности контакта объясняется взаимодействием индия с большинством металлов с образованием интерметаллидов, обладающих низкой механической прочностью. В результате этого такая технология хорошо подходит для первоначальной оценки качества полупроводниковой пластины или экспериментальных образцов, не предполагающих значительного времени работы. Эта особенность была использована в настоящей работе при создании контактов к

полупроводниковой пластине с целью измерения ее свойств методом Ван-дер-Пау (разновидность холловских измерений). Для использования же в составе интегральных микросхем или серийно выпускаемых изделий такая технология неприменима. Использование литографии для получения контактов заданной геометрии также не позволяет достичь высокой степени интеграции вследствие значительной боковой диффузии индия и разрушения напыляемой на контакт металлизации.

Минимизировать взаимодействие индия с наносимыми поверх него металлами возможно путем напыления промежуточного слоя, не взаимодействующего с индием. В качестве такого слоя может выступать например вольфрам или карбид вольфрама. Недостаток такого метода заключается в невозможности его осуществления при помощи установки термического испарения. В [36] описано изготовление контакта к объемному n-GaAs на основе MoGeW, обладающего высокой температурной стабильностью. Напыление германия проводилось методом индукционного нагрева, либо, как и напыление вольфрама и молибдена, при помощи электронно-лучевого испарителя. Далее контакты вжигались при избыточном давлении испаряемого InAs при температуре 700 — 840 °C. Как показали исследования при помощи просвечивающей электронной микроскопии и вторичной ионной масс-спектроскопии, для получения омического контакта необходима диффузия индия из газовой фазы в приконтактную область. Сопротивление таких контактов при концентрации донорной примеси 10^{18} $см^{-3}$ составило 0,3 Ом·мм.

В следующем эксперименте [37] авторы целенаправленно меняли количество индия, участвующего в формировании контакта за счет включения его в состав напыляемой металлизации MoGeInW. Оптимальная толщина толщина слоя индия составляла при этом 1 — 2 нм. Далее, в работах [38 — 40], авторы исследовали влияние на электрические характеристики и температурную стабильность контактов при добавлении в состав металлизации никеля.

Однако, несмотря на эти модификации, низкое сопротивление и температурную стабильность, такие контакты не являются оптимальными для гетероструктур с двумерным электронным газом, применяемым в лабораторной практике. Высокая температура вжигания (порядка 800 °C) приводит к диффузии примесей различных слоев структуры, что сглаживает границу раздела а, следовательно, и форму квантовой ямы. Наличие слоя, ограничивающего диффузию индия, приводит к необходимости использования установки электронно-лучевого испарения, что значительно усложняет технологию изготовления контактов такого типа.

Таким образом, применение вплавляемых индиевых контактов, хотя и обладает определенными преимуществами в случае приборов на основе объемного GaAs, в настоящей работе было признано неэффективным. Вместо этого был применен метод формирования контактов, основанный на рекристаллизации из жидкой фазы с одновременным легированием приконтактной области без изменения ширины запрещенной зоны.

2.6.2. Механизм формирования контакта Ni/Ge/Au

Наиболее распространенным составом металлизации контактов является Ni/Ge/Au [41, 42]. Исследование таких контактов, а также контактов на основе Ti/AuGe и Cr/AuGe, не содержащих ферромагнитных металлов, подробно описаны в [43, 44]. Авторы сравнивали сопротивления и морфологию контактов с различными соотношениями компонентов и магнитные свойства, обусловленные наличием металлического никеля. Наиболее низкое сопротивление показали контакты с весовым соотношением Au:Ge в сплаве 88:12 и толщиной никеля, равной четверти толщины AuGe, однако они не оптимальны с точки зрения морфологии. Меньшей шероховатостью обладают структуры с меньшей концентрацией германия в сплаве AuGe, равной 97.3:2.7 и большим количеством никеля (30% толщины AuGe), однако они обладали высоким сопротивлением. Таким образом, соотношение толщин слоев выбирается исходя из

требуемой однородности контакта и его сопротивления. Контакты на основе систем Ti/AuGe, Cr/AuGe и Au/AuGe не обладали ни лучшей проводимостью, ни морфологией, чем традиционные.

Такие контакты к объемному n-GaAs обладают низким сопротивлением, высокой надежностью и воспроизводимостью [45 — 47]. Однако, применение технологии, разработанной для объемного GaAs, к наноструктурам требует внесения определенных модификаций. Рассматриваемые в настоящей работе гетероструктуры с двумерным электронным газом содержат достаточно толстый слой нелегированного полупроводника, отделяющий проводящий канал от поверхности, что вынуждает проводить легирование на значительную глубину. Наличие резких гетеропереходов и опасность взаимной диффузии различных слоев структуры ограничивает температуру и время вжигания контактов, а высокая чувствительность подвижности электронов к наличию дефектов требует как можно более строгого выдерживания временных и температурных интервалов.

В [15] предлагаются толщины слоев Ni, Ge, Au и Ni, равные соответственно 10, 60, 120, 10 нм. Кроме того, в работе показано, что допыление слоев Pt и Au толщинами 50 и 100 нм соответственно значительно снижает неровность поверхности и края контакта. Эти контакты были исследованы для структур с глубинами залегания ДЭГ от 20 до 145 нм. Вжигание проводилось в течение 1 минуты при температурах от 400 до 500 °C в зависимости от образца.

Авторы [22] на основании своего эмпирического опыта предлагают рассчитывать толщины слоев металлизации более точно, исходя из глубины залегания ДЭГ: при глубине менее 80 нм использовать толщины слоев Ni, Ge и Au равные 40, 52,8 и 107,2 нм соответственно. Для структур с большей глубиной рекомендуется использовать масштабный коэффициент

$$s = \frac{D + 30\,нм}{110\,нм} \quad ,$$

где D — глубина залегания двумерного электронного газа.

Механизм образования контактов к гетероструктурам подобен механизму образования контактов к объемному полупроводнику, однако обладает рядом особенностей. К примеру, согласно [15], для объемного GaAs предпочтительным является вжигание при минимальном времени и температуре не более 500 °C, тогда как для рассматриваемых гетероструктур время вжигания и температура зависят от параметров структуры и требуют более точного контроля. Это послужило причиной исследования внутренней структуры контактов при помощи просвечивающей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (Energy Dispersive X-ray spectroscopy, EDX) [48]. Авторы обнаружили, что при вжигании образуются области, преимущественно состоящие из никеля и области, преимущественно состоящие из золота, причем в первых оказывалась высокой концентрация германия. Эти области проникали в гетероструктуру не ровным фронтом, а отдельными зернами, причем для получения оптимального контакта они не должны достигать слоя ДЭГ. Германий, диффундируя за пределы никелевого зерна, легирует слой полупроводника между металлом и двумерным газом, как показано на рисунке 10. При этом даже увеличение времени вжигания, приводящее к значительному росту сопротивления контакта, не приводит к проникновению зерен металлизации через двумерный слой.

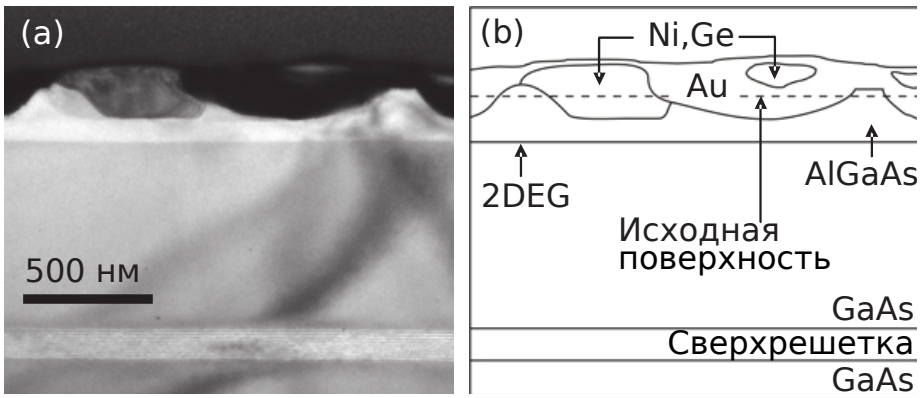


Рисунок 10 — TEM-изображение контакта,
вжигавшегося 5 минут при температуре 450 °C

Авторы провели математическое моделирование этого процесса, учитывая два механизма: диффузия германия вглубь полупроводника и

диффузия золота вдоль поверхности зерен никеля. Сопротивление слоя AlGaAs обратно пропорционально концентрации легирующей примеси, таким образом вклад первого процесса можно описать следующей формулой:

$$R_{Ge} \propto \int \frac{1}{C(z)/C_0} dz \quad ,$$

где $C(z)/C_0$ — концентрация германия на глубине z, а интеграл рассчитывается от глубины зерен никеля и золота до двумерного газа. Зависимость сопротивления полупроводника от времени изображена пунктирной линией на рисунке 11.

Увеличение сопротивления при дальнейшем вжигании может быть связано с боковой диффузией золота, уменьшающей площадь соприкосновения зерен никеля с легированным полупроводником. В качестве модели было выбрано квадратное зерно площадью $A_{Ni} = L_{Ni}^2$. Зависимость расстояния боковой диффузии от времени можно описать следующей формулой:

$$L_{Ni} = L_0 - 2\sqrt{4 D_{Au} t} \quad ,$$

где L_0 — исходный размер зерна, D_{Au} — коэффициент диффузии, равный $3 \cdot 10^{-7}$ м^2/с.

Таким образом, вклад этого процесса в общее сопротивление можно описать как

$$R_{if} \propto \frac{1}{\left(L_0 - 2\sqrt{4 D_{Au} t}\right)^2} \quad .$$

В широком диапазоне значений эта составляющая сопротивления растет линейно от времени, как показано черной линией на рисунке 11.

Складывая эти две составляющие, можно получить зависимость удельного сопротивления контакта от времени вжигания. Эта зависимость изображена на рисунке 11 серой линией. Из нее следует, что для каждой структуры существует оптимальное время вжигания, при котором сопротивление контакта оказывается минимальным.

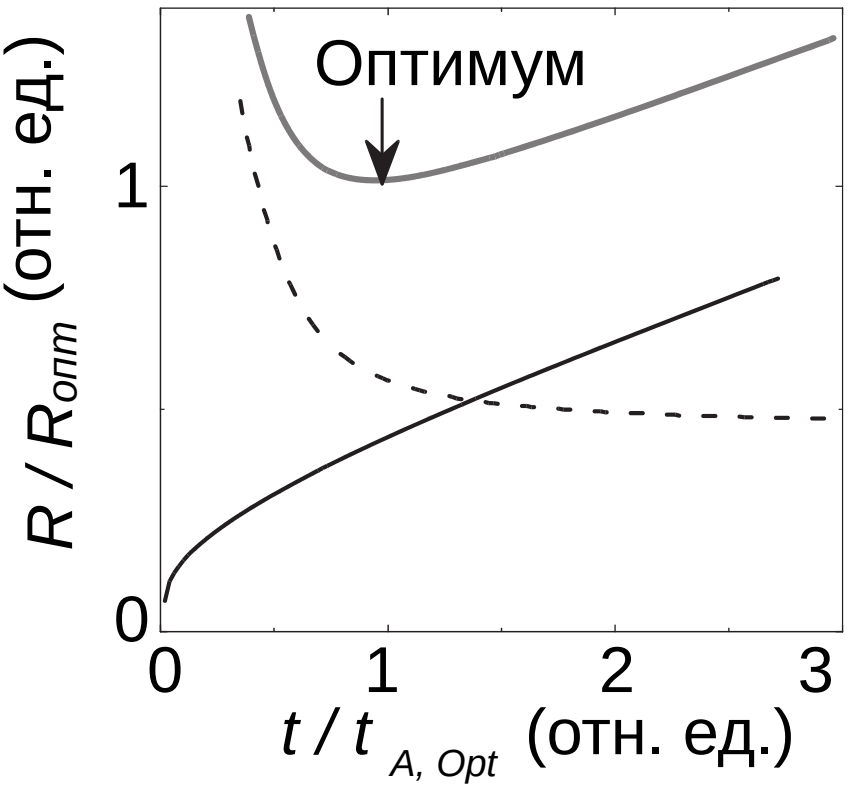


Рисунок 11 — Зависимость сопротивления слоя полупроводника от времени вжигания. Черная линия - вклад боковой диффузии золота, пунктирная - диффузии германия, серая - полное сопротивление

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:

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

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. Дальнейшие исследования [49] показали, что при использовании установки импульсного вжигания (rapid thermal annealing, RTA) требования к точности выдерживания временных интервалов могут быть значительно снижены: при изменении времени от 20 до 350 секунд, удельное сопротивление контактов менялось от 0,08 до 0,5 Ом·мм соответственно. Однако, причина такого сильного влияния скорости изменения температуры на чувствительность к времени вжигания пока не выяснена.

2.6.3. Описание установки вакуум-термического напыления

В процессе эксперимента контакты Ni/Ge/Au наносились методом вакуум-термического напыления. Первоначальная конструкция вакуумной камеры предполагала жесткое крепление образца, датчика толщины и трех испарительных ячеек. После обнаружения описанных ранее эффектов влияния совмещения слоев металлизации и водородной чистки, она была модифицирована. Держатель образца был сделан подвижным, были добавлены датчик его положения, система подогрева образца и измеритель его температуры, как показано на рисунке 12.

Испарительные ячейки представляют из себя полоски вольфрама или молибдена длиной около 5 см и шириной около 1 см, в середине которых было сформировано углубление для помещения испаряемого материала, а концы загнуты. Геометрические размеры испарительных ячеек («лодочек») и материал зависят от типа напыляемого материала и его количества. Для напыления никеля использовались специальные лодочки — набор из 5 — 9 вольфрамовых проволочек диаметром 0.5 мм, концы которых были запрессованы в отрезки медной трубки. Необходимость этого обусловлена высокой химической активностью никеля, взаимодействующего при нагревании как с вольфрамом, так и с

молибденом. Обычная лодочка, в отличие от проволочной, не обладает достаточной толщиной и разрушается прежде, чем будет напылено нужное количество никеля.

Величина тока через каждую лодочку контролируется для поддержания постоянной скорости напыления 0.1 — 0.5 нм/с, измеряемой при помощи кварцевого измерителя толщины и составляет для применяемых лодочек 50 — 100 А.

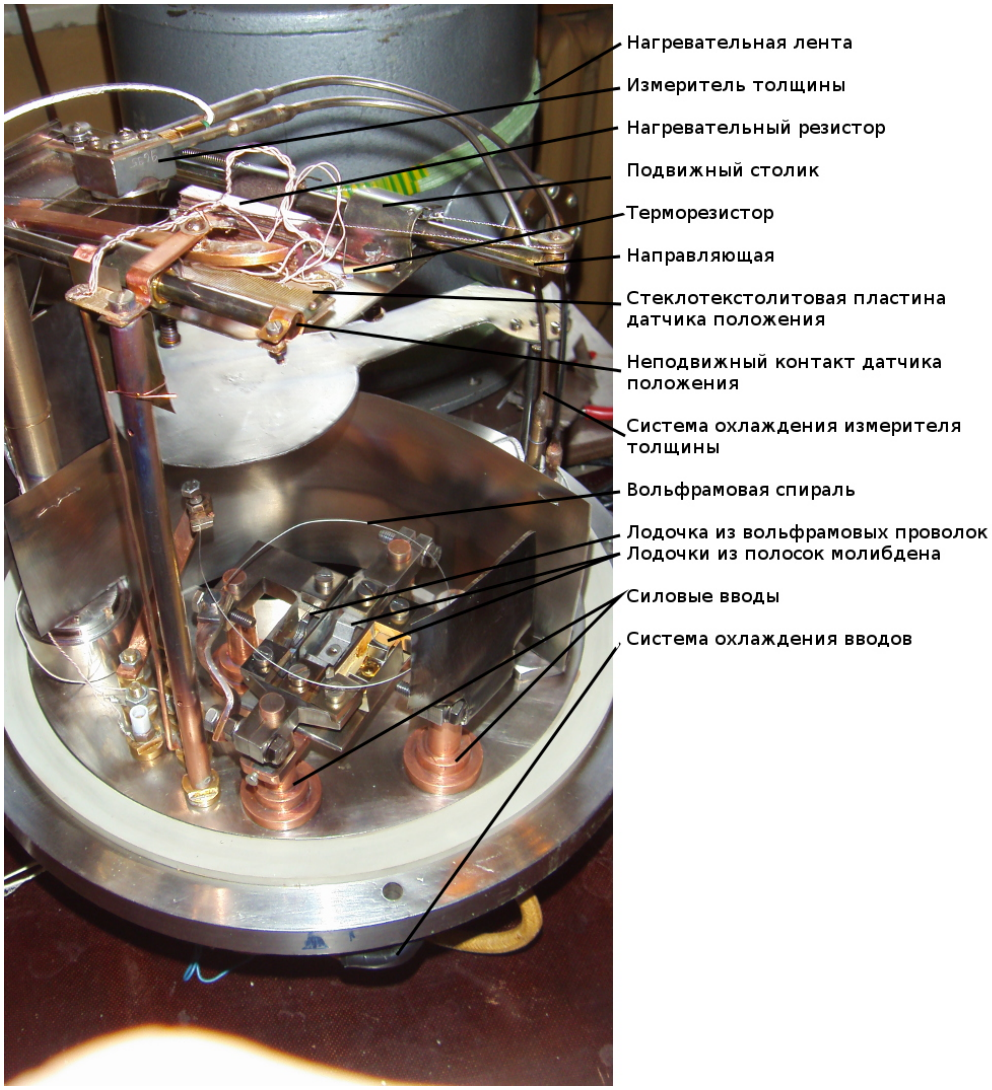


Рисунок 12 — Внешний вид установки вакуум-термического напыления

Устройство позиционирования образца представляет собой полоску стеклотекстолита с вытравленными полосками медной фольги на расстоянии 1 мм друг от друга, закрепленную на том же столике, на котором устанавливается образец. По этой полоске скользит контакт,

неподвижный относительно лодочек и соединенный с корпусом. Таким образом, определяя, какая из полосок фольги оказывается соединенной с корпусом, можно определить положение образца относительно лодочек с точностью 1 мм.

Для лучшей адгезии некоторых веществ образец рекомендуется подогревать до температуры 90 — 120 °C. Также это способствует очистке поверхности от адсорбированных газов и воды. В качестве нагревательного элемента был применен мощный резистор, через который подавался регулируемый ток. Температура измерялась при помощи платинового терморезистора, закрепленного на столике. Для определения положения образца и его температуры было изготовлено устройство индикации на основе микроконтроллера ATmega8.

2.6.4. Контакт Pd/Ge/Au

Интересной альтернативой распространенной системе металлизации Ni/Ge/Au является система Pd/Ge/Au, которая при соответствующем режиме вжигания обеспечивает значительно большую однородность контакта и температурную стабильность, а также меньшую шероховатость поверхности.

Достаточно подробно механизм образования такого контакта рассматриваеся в работах [50 — 52]. Схема его формирования показана на рисунке 13: при реакции палладия с GaAs образуется соединение Pd_4GaAs, которое при взаимодействии с германием переходит в PdGe и GaAs, легированный германием. При этом поверхности, фронт рекристаллизации и край контакта остаются гладкими, а более низкая температура формирования снижает термические напряжения в структуре.

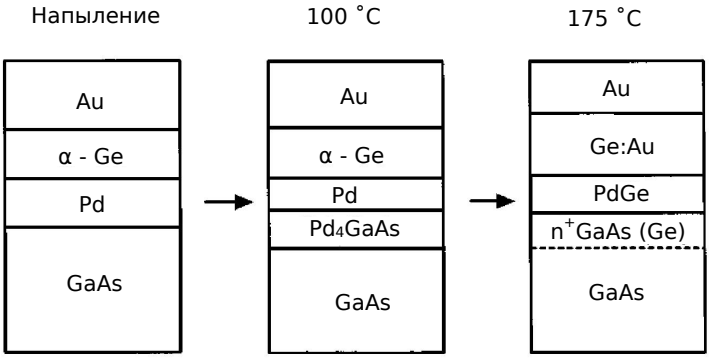


Рисунок 13 — Механизм образования контакта Au/Ge/Pd

Как показали TEM-исследования (transmission electron microscopy, просвечивающая электронная микроскопия), толщина рекристаллизованной области составила 10 — 20 нм, что меньше глубины залегания проводящего слоя в гетероструктуре. Более подробно механизм проводимости такого контакта рассмотрен в [52]. Авторы исследовали следующую структуру: полуизолирующая подложка; слой AlGaAs толщиной 250 нм; буферный слой GaAs толщиной 800 нм; слой InGaAs толщиной 11 нм; спейсер AlGaAs толщиной 4,5 нм; слой AlGaAs толщиной 37 нм с концентрацией легирующей примеси $2 \cdot 10^{18}$см$^{-3}$; защитный слой GaAs толщиной 55 нм с концентрацией примеси $3{,}7 \cdot 10^{18}$см$^{-3}$, на которую были последовательно нанесены слои Pd, Ge и Au толщинами 50, 125 и 300 нм соответственно. После нанесения, контакты вжигались при температуре 320 ^{o}C в течение 1 минуты. Таким образом, глубины диффузии металлов оказалось недостаточно для обеспечения контакта непосредственно со слоем двумерного газа. Вместо этого контакт образуется с защитным слоем GaAs, а дальнейшее прохождение тока обеспечивается большой площадью контакта, высокой концентрацией носителей заряда в полупроводнике и туннелированием электронов через барьеры гетероструктуры. Таким образом, область применения контактов такого типа ограничена структурами с сильным легированием и малой толщиной спейсера, применяемыми, к примеру, в малошумящих и охлаждаемых HEMT.

К рассматриваемым в настоящей работе структурам, содержащим толстый слой нелегированного AlGaAs такой низкотемпературный

контакт неприменим. Вместо этого были проведены опыты [53] по созданию контакта, вжигаемого при температуре ~440 °C и состоящего из последовательно нанесенных слоев палладия, германия и золота толщинами 35, 70 и 200 нм соответственно. Получившиеся структуры обладали линейными вольт-амперными характеристиками и малым контактным сопротивлением. Однако кардинальными преимуществами перед традиционными контактами Ni/Ge/Au они не обладали, в результате чего в рабочих структурах было решено применить именно Ni/Ge/Au.

2.6.5. Изготовление контактов Ni/Ge/Au

В соответствии с рекомендациями, описанными в разделе «2.6.2. Механизм формирования контакта Ni/Ge/Au», были выбраны толщины слоев металла, приведенные в таблице 4. Как видно из таблицы, золото и никель напылялись по два слоя. Это связано с тем, что лучшей адгезией к полупроводнику обладает никель, а не германий. При этом такой подслой никеля не должен мешать диффузии германия, что ограничивает его толщину. В то же время, наличие в напылительной установке всего трех лодочек и опасность повторного разогрева никелевой привели к необходимости проведения напыления в два этапа. На первом носился тонкой подслой никеля и расчетные толщины германия и золота, после чего вакуумная камера открывалась и проводилась замена лодочки с никелем. На втором этапе проводилось напыление оставшейся толщины никеля и защитного слоя золота. В некоторых образцах, предназначенных для отработки технологии изготовления контактов, применялось напыление дополнительного слоя палладия, улучшающего морфологию поверхности и повышающего механическую прочность контакта. Использование этого слоя только в тестовых структурах обусловлено применением характериографа с острыми вольфрамовыми зондами либо применением электропроводного клея вместо приваривания золотых проволок, которое применялось в рабочих структурах. Такие методы

отличаются применением значительных механических напряжений, которые могут повредить контакт.

В процессе напыления контролировались: температура образца, не превышавшая 40 °C (в некоторых опытах применялся предварительных нагрев до 100 °C, а также напыление на подогреваемый образец, однако существенных преимуществ таких методов обнаружено не было), толщина напыляемой пленки, скорость роста и положение образца относительно лодочек. Толщина и скорость измерялись при помощи кварцевого измерителя.

Таблица 4 — 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

2.6.6. Вжигание

Вжигание напыленных слоев проводилось в кварцевой трубе, заполненной аргоном с примесью 4% водорода после резки пластины на кристаллики, для каждого кристаллика по отдельности. Это дало возможность оценить влияние режима вжигания на характеристики омических контактов и их воспроизводимость. Нагрев осуществляется излучением двух ламп накаливания. Для более равномерного нагрева и защиты от коротковолнового светового излучения, образец расположен между двумя пластинами кремния. Рядом с образцом располагается

платиновый терморезистор, применяемый для контроля температуры. Он механически прижат к одной из кремниевых пластин, закрепленной на кварцевом держателе. Другая пластина устанавливается на закрепленные там же никелевые опоры. Сам держатель помещается между двумя лампами. Внешний вид установки показан на рисунке 14.

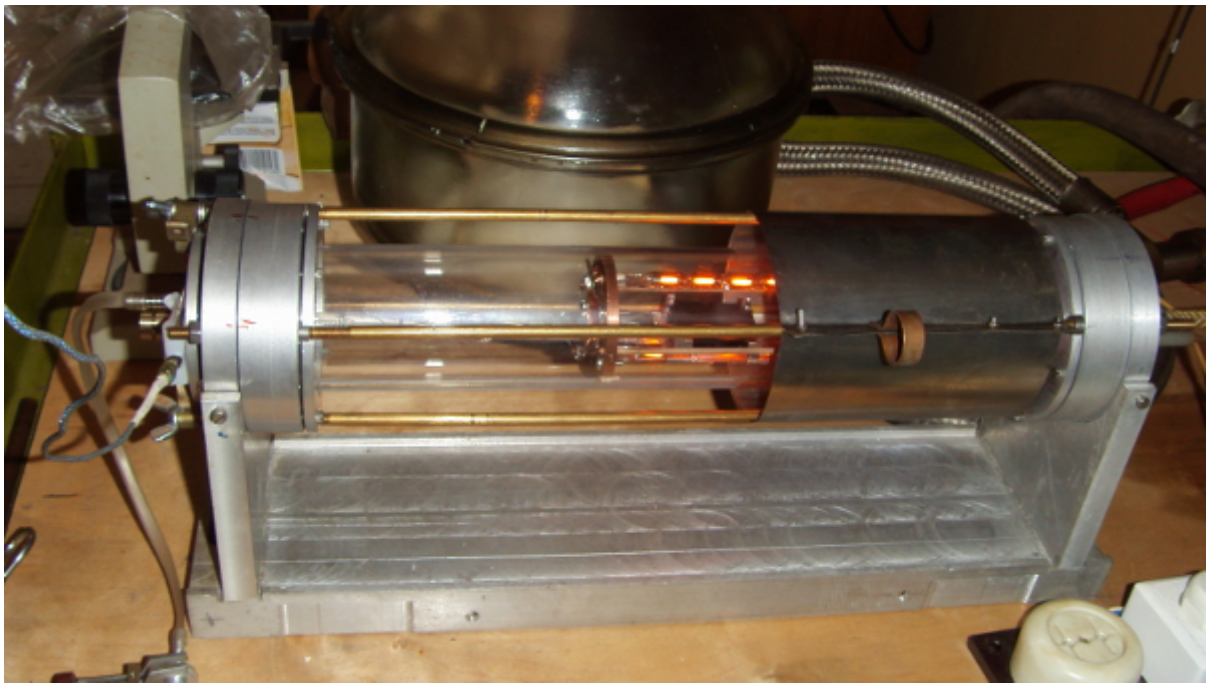


Рисунок 14 — Внешний вид камеры для вжигания

Перед началом вжигания из камеры откачивается воздух, затем следует продувка аргоном для удаления остатков кислорода. Режимы вжигания подбирались экспериментально. Для «глубоких» они приведены в таблице 5, а для «мелких» — таблице 6.

Таблица 5 — Характеристики «глубоких» образцов при различных режимах вжигания

№ образца	Первый интервал		Второй интервал		Контактное сопротивление, Ом·мм	Удельное сопротивление ДЭГ, Ом/□
	Температура, °C	время, с	Температура, °C	время, с		
70	370	120	440	60	121,2	2702
71	370	120	440	120	208,2	2208
72	370	180	440	60	14,8	3302
73	370	180	440	60	35,1	3734
74	370	120	470	60	66,1	2072
75	370	180	470	60	105,8	2376
76	370	240	440	60	51,3	2510
77	370	180	420	60	33,9	3342
78	370	180	420	120	23,3	3072
79	370	180	420	180	45,9	3590

Таблица 6 — Характеристики «мелких» образцов при различных режимах вжигания

№ образца	Температура, °C	время, с	Контактное сопротивление, Ом·мм	Удельное сопротивление ДЭГ, Ом/□
60	442	60	63,79	142,4
61	432	60	154,91	243,8
62	420	60	55,3	156,3
63	410	60	48,33	145,3
64	400	60	20,66	7,5

2.7. Заключение

Особенностями гетероструктур с двумерным электронным газом при создании омических контактов являются наличие толстого слоя нелегированного полупроводника, низкая концентрация носителей заряда, высокая чувствительность к вносимым дефектам.

При нанесении металлизации необходимо проводить полное удаление остатков фоторезиста в окнах во избежание отрывания краев металлизации, образующих затвор Шоттки. В процессе выбора оптимального режима для дополнительной чистки рекомендуется применение разогретого водорода.

Несмотря на химическую устойчивость GaAs к соляной кислоте, время освежения должно быть минимальным, как и время между освежением и помещением пластины в напылительную установку.

При напылении металлизации необходимо избегать рассогласования слоев металлов. Лучшим решением является использование системы позиционирования образца точно над активной испарительной ячейкой. В случае недоступности такого оборудования, при соответствующей топологии допускается ориентация образца таким

образом, чтобы направление смещения слоев оказалось перпендикулярным направлению протекания тока.

Приведена методика предварительного расчета времени вжигания контакта к структуре заданной глубины и даны значения, использованные в настоящей работе. Изготовленные таким образом контакты обладают линейными вольт-амперными характеристиками и малым сопротивлением.

3. Нанолитография

Наиболее сложным этапом изготовления наноструктур является создание в полупроводнике изолирующих областей. Важными параметрами при этом являются длина канала, много меньшая длины свободного пробега электрона, ширина изолирующей области, ее глубина и пробивные характеристики. Создание таких структур требует применения литографии с характерными размерами элементов ~ 0.1 мкм. Это возможно с использованием традиционных технологий оптической или электронной литографии высокого разрешения с последующим травлением (химическим, ионно-плазменным, плазмо-химическим) канавок, как это делалось, например, в [54 — 57]. Такие методы широко применяются при массовом производстве полупроводниковых приборов, однако их основная особенность, групповая обработка кристаллов на пластине, в лабораторной практике оказывается недостатком. Это связано с необходимостью изменения топологии структуры в процессе исследований и использования исходных пластин исключительно высокого качества. Авторами [58] был предложен метод рисования изолирующих областей сфокусированным ионным пучком диаметром 100 нм, позволяющий формировать наноструктуру на отдельном кристалле, однако широкого распространения он не получил, по-видимому, из-за большого количества вносимых дефектов и сложности применяемого оборудования.

Существует ряд методов, лишенный большинства этих недостатков. Они основаны на применении атомно-силового микроскопа [59 — 60] — локальное анодное окисление (ЛАО), процарапывание канавок и импульсная силовая нанолитография (ИСНЛ). Их особенностями является возможность индивидуальной обработки кристаллов, установленных в корпус и малое количество вносимых дефектов. В то же время отсутствие возможности одновременно нескольких образцов делает эти методы неэффективными при серийном производстве.

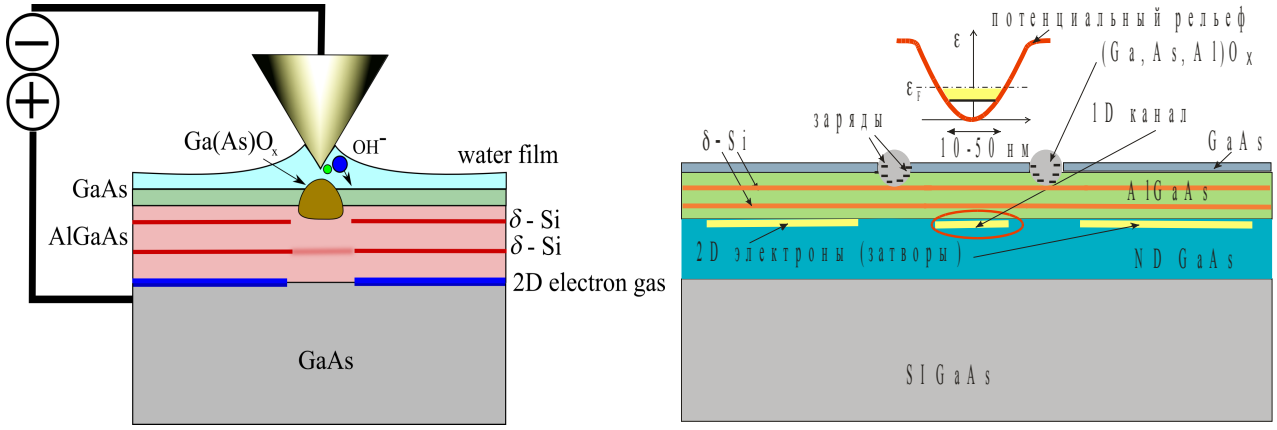
3.1. Локальное анодное окисление

Данный метод основан на электрохимическом окислении полупроводника в присутствии на поверхности адсорбированного слоя воды [21, 62 — 65]. На рисунке 15 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. В работе [66] предложено использование полуконтактного режима работы и импульсной подачи напряжения, что позволило обрабатывать структуры с глубиной залегания до 80 нм.



а) б)

Рисунок 15 — Схема проведения локального анодного окисления

Поскольку данная технология достаточно широко известна, не требует редкого оборудования и показывает хорошие результаты при работе с «мелкими» образцами (глубина залегания ДЭГ в которых не превышает 50 нм), именно она была использована в настоящей работе при формировании наноструктуры в «мелких» образцах.

3.2. Импульсная силовая нанолитография

Способов создания изолирующих областей в «глубоких» структурах (расстояние от поверхности до слоя ДЭГ более 80 нм) существует немного, и все они обладают существенными недостатками, не позволившими применить их в настоящей работе. Вместо этого был разработан метод импульсной силовой нанолитографии [60, 61, 67, 68].

Данный метод относится к методам механического воздействия на материал. Его изобретению предшествовал метод царапанья материала иглой силового зондового микроскопа, прижатой под углом. В случае твердых материалов применяется стальной кантилевер с алмазной пирамидой, имеющей относительно большой (30−50 нм) радиус кривизны острия. В ряде работ также применялись кремниевые зонды с

алмазоподобным покрытием. Наличие покрытия уменьшает остроту иглы, что ухудшает пространственное разрешение литографии.

В отличие от них, в методе ИСНЛ используются зонды с чрезвычайно тонкими и острыми (радиус кривизны острия порядка 10 нм) монокристаллическими алмазными иглами. Изображение такой иглы, полученное при помощи электронного микроскопа, приведено на рисунке 16. 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. Первые эксперименты по применению данного метода, проводившиеся не на полупроводнике, а на металлических пленках [69, 70], показали его применимость для нанолитографии.

Проблемой при применении данного метода к литографии на полупроводнике могла оказаться хрупкость арсенида галлия и сильная зависимость подвижности электронов от наличия дефектов кристаллической решетки. Таким образом, одной из целей настоящей работы являлась проверка качества наноструктур, полученных в результате ИСНЛ и определение применимости данной технологии при изготовлении полупроводниковых наноструктур.

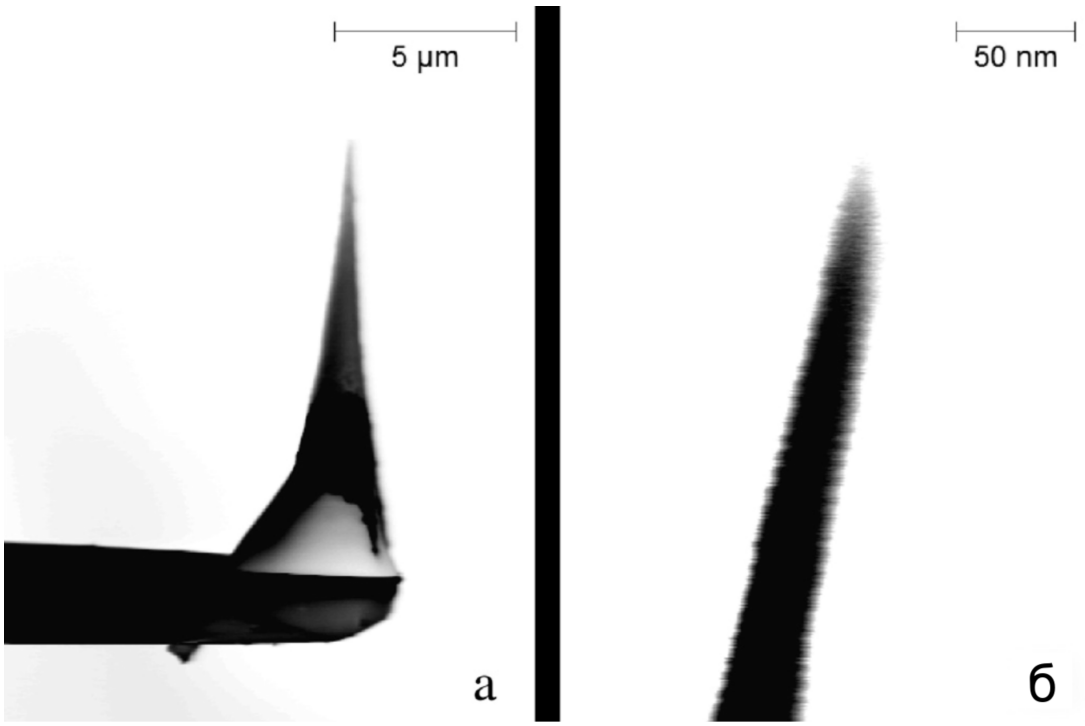


Рисунок 16 — СЭМ-изображения кантилевера с монокристаллической алмазной иглой (a) и ее острия (b)

Продемонстрировать принцип работы ИСНЛ можно на следующем примере формирования в полупроводнике четырех канавок с использованием разного числа проходов. СЗМ изображение такой структуры приведено на рисунке 17, а последовательность работы — на рисунке 18. 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 18а. Далее этот материал удаляется горизонтальными движениями иглы. Изображение поверхности после этого этапа приведено на рисунке 18б. Как видно, глубина канавки после одного прохода составляет менее 20 нм. Для получения канавок большей глубины используется большее количество проходов. На рисунке 18в приведены СЗМ изображение канавок, полученных после 1, 20, 30 и 100 проходов. Как видно из профиля глубины, приведенного на рисунке 18г,

глубина канавки после 100 проходов составляет около 100 нм при ширине около 35 нм, то есть отношении глубины к ширине R составляет около 3.

Измерения изолирующих свойств таких канавок на «глубоких» рабочих структурах с глубиной залегания 135 нм, содержащих канал и затворы, показывают, что механическое прорезание слоя ДЭГ не является обязательным. Электростатическое поле поверхностных зарядов в канавке также ограничивает движение электронов. Это позволяет использовать канавки меньшей глубины, составляющей около 90 нм для «глубоких» структур.

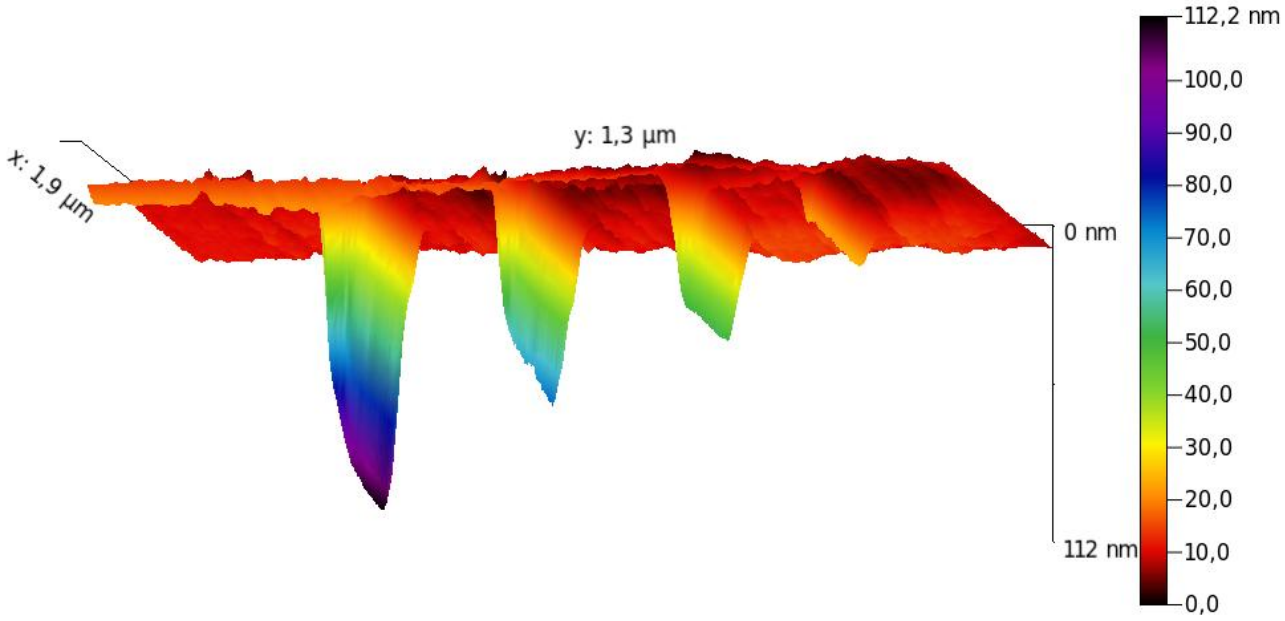


Рисунок 17 — СЗМ изображение канавок

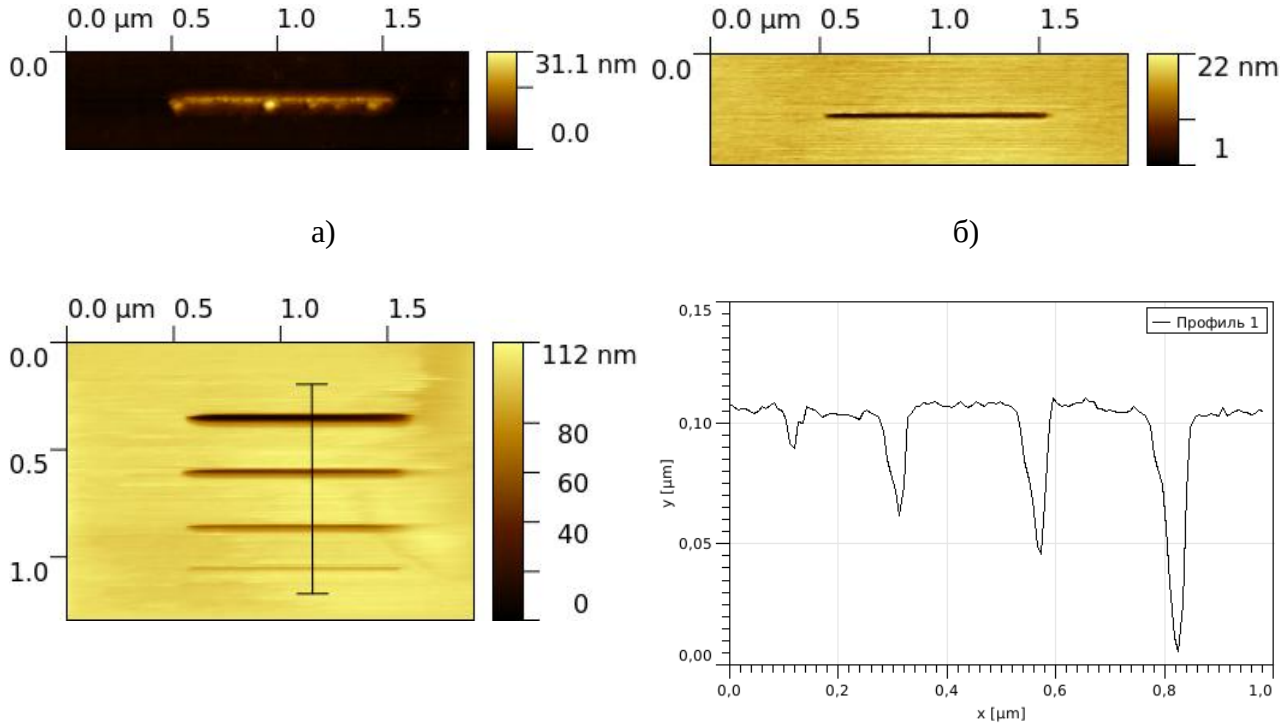
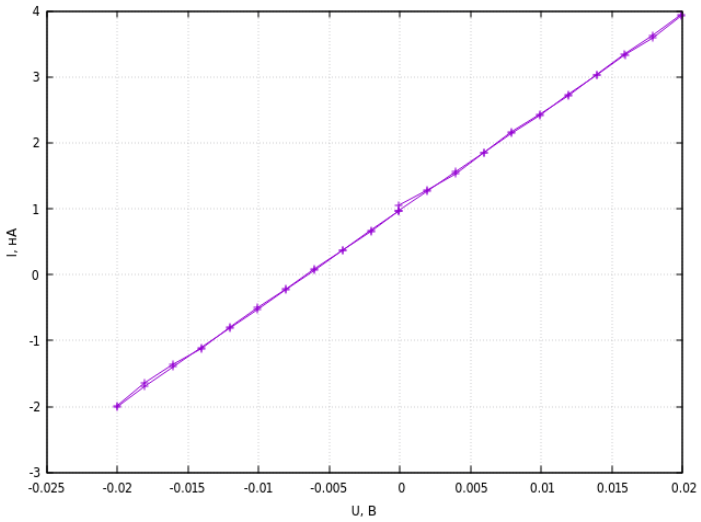
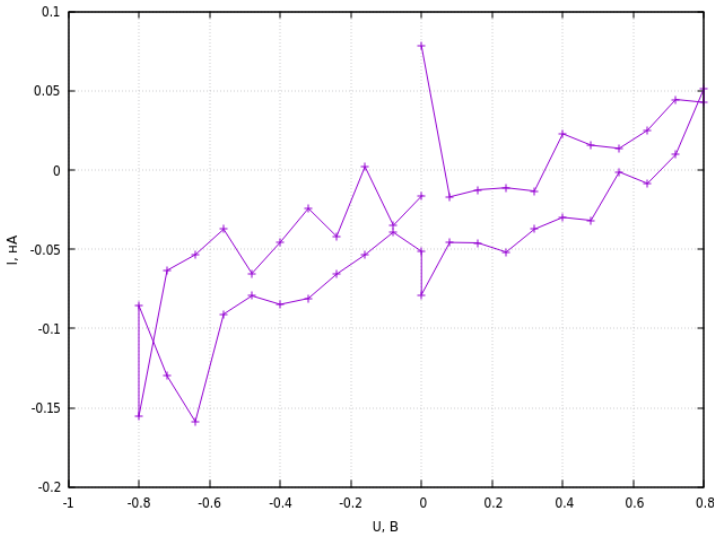


Рисунок 18 — Этапы формирования канавки методом ИСНЛ: прокалывание углублений (а), удаление выкрошенного полупроводника (б), изображение (в) и профили (г) канавок после 1, 10, 30 и 100 проходов

Измерения этих характеристик проводились при помощи той же установки, которая использовалась при измерении характеристик контактов. На рисунке 19 приведена вольт-амперная характеристика затвора G1.1 рабочей структуры, снятая при комнатной температуре и при охлаждении до 8 К. Данная характеристика является типичной для всех изолирующих канавок. Как видно из рисунка, сопротивление при комнатной температуре составляет примерно 6,7 МОм, при охлаждении — 8 ГОм, Пробивное напряжение при комнатной температуре измерить не представляется возможным, поскольку ток утечки составляет 2 нА даже при напряжении 20 мВ, что не является безопасным для структуры. При температуре 8 К пробивные напряжения превышают 0,8 В, причем точное измерение тока невозможно вследствие недостаточной точности амперметра и наличия помех.



а)



б)

Рисунок 19 — Вольт-амперные характеристики затвора G1.1 при 300 K (а) и 8 K (б)

3.3. Заключение

Технология создания на поверхности полупроводника наноразмерных структур хорошо отработана как для кремния, так и для гетероструктур. Однако структуры, применяемые для исследований квантово-размерных эффектов, обладают рядом особенностей, делающих эти технологии неэффективными. В первую очередь, высокая стоимость исходных пластин и необходимость гибкого изменения топологии, ограничивают применение технологий групповой обработки. Значительно лучшие результаты показывают технологии, основанные на применении силового зондового микроскопа, такие как локальное анодное окисление, процарапывание канавок и импульсная силовая нанолитография. Каждый из этих методов обладает своей областью применения. ЛАО относительно прост в реализации, но плохо применим к структурам с глубиной залегания двумерного электронного газа более 50 нм. Для процарапывания полупроводника необходимо применение специальных зондов, обладающих высокой твердостью, однако такие зонды не позволяют получить высокое отношение глубины канавки к ширине и

снижают разрешение литографии. Наконец, в методе ИСНЛ используются еще более редкие зонды, представляющие собой монокристаллические алмазные иглы. Их применение позволяет добиться недостижимых другими способами отношения глубины канавки к ширине и возможности обработки структур с глубиной залегания двумерного электронного газа 135 нм и более.

4. Измерение характеристик образцов

4.1. Измерение параметров пластины

Одними из важнейших параметров пластин полупроводника, применяемых для исследования низкоразмерных эффектов, являются концентрация носителей заряда и их подвижность. Для их определения часто применяется эффект Холла [71, 72], заключающийся в возникновении в полупроводнике поперечной разности потенциалов при пропускании тока и приложении магнитного поля. Для обеспечения точности измерения необходимо изготовление структуры определенной формы (т. н. холловский крест), что требует применения нескольких процессов литографии. Этого недостатка лишена одна из модификаций метода Холла, метод Ван-дер-Пау. Данный метод позволяет проводить измерения на пластине произвольной формы. Пример такой пластины и условные обозначения контактов показаны на рисунке 20а.

По периферии образца наносят четыре контакта A, B, C, D и измеряют отношения $R_{ABCD}=U_{CD}/I_{AB}$ и $R_{BCDA}=U_{DA}/I_{BC}$.

Удельное сопротивление образца конечной толщины d может быть найдено из следующей формулы:

$$\rho=\frac{\pi d}{\ln 2}\frac{R_{ABCD}-R_{BCDA}}{2}f\left(\frac{R_{ABCD}}{R_{BCDA}}\right) ,$$

где f — поправочная характеристика, график которой изображен на рисунке 20б.

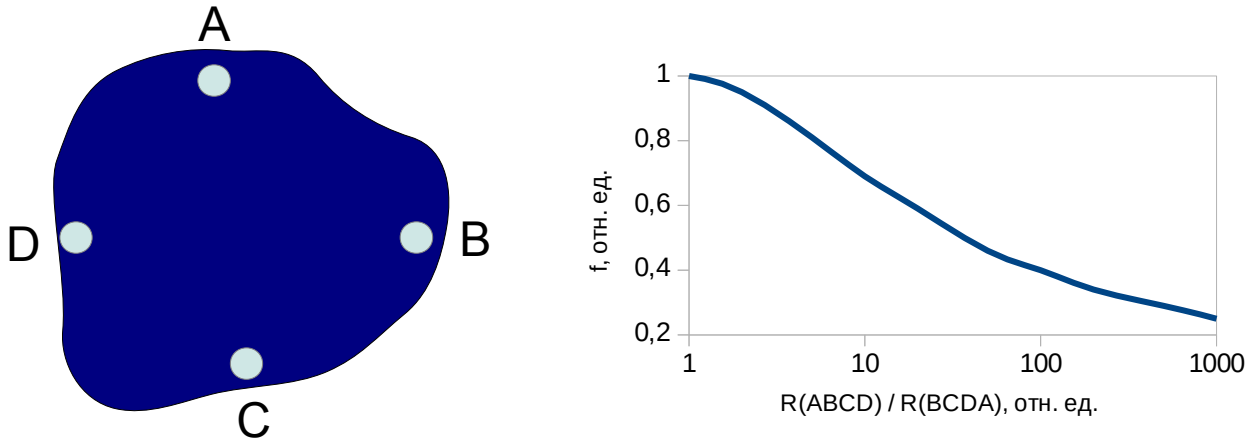
Для определения холловской подвижности помимо определения удельного сопротивления, нужно измерить также величину $R_{BDAC}=U_{AC}/I_{BD}$. Подвижность может быть найдена из следующей формулы:

$$\mu_H=(d/B)(\Delta R_{BDAC}/\rho) ,$$

где ΔR_{BDAC} – изменение сопротивления R_{BDAC} при изменении магнитного поля. Из этих двух величин вычисляется концентрация свободных носителей заряда:

$$N = (\mu_H / \mu) / e \mu_H \rho$$

Наиболее точные результаты данный метод дает при круглой форме образца и точечных контактах на его периферии, расположенных под углом 90° друг к другу, для других случаев вводятся специальные поправочные коэффициенты.



а) б)

Рисунок 20 — Схема расположения контактов при измерении методом Ван-дер-Пау (а) и функция поправок (б)

Поскольку эти измерения проводились раньше отработки технологии изготовления трехкомпонентных контактов, а также вследствие отсутствия требования долговечности, для этого использовались вплавляемые индиевые контакты. Как показано на рисунке 21, при снижении температуры до 40 К, концентрация носителей снижается до $1{,}2 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$, а подвижность возрастает до $1{,}4 \cdot 10^{5}$ см^{3}/(В·с).

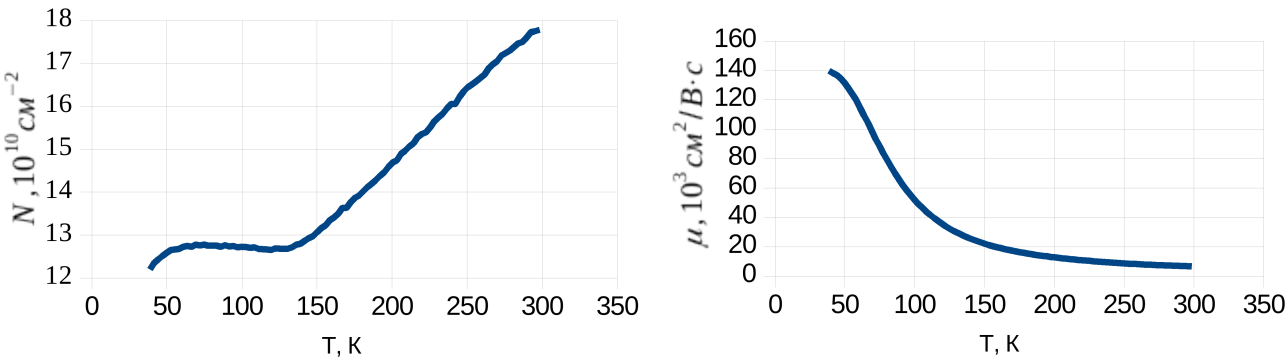


Рисунок 21 — Характеристики слоя двумерного электронного газа: зависимость концентрации и подвижности носителей заряда от температуры

4.2. Измерения методом передающей линии

Сопротивления контактов к ДЭГ традиционно измеряются при помощи метода передающей линии (Transmission Line Method, TLM) [73, 74], который был разработан для исследования планарных тонкопленочных структур. Применение этого метода основано на предположении о том, что контакты не меняют характеристик полупроводника или меняют их на расстоянии, много меньшем расстояния между контактами. Как будет показано далее, это предположение не всегда верно. В случае же достаточного соответствия образца модели, сопротивление каждого зазора может быть записано в виде следующей формулы:

$$R = \rho \cdot l + 2 R_0 \quad ,$$

где R — измеренное сопротивление;

ρ — удельное сопротивление полупроводника;

l — ширина зазора;

R_0 — сопротивление контакта.

Легко видеть, что график зависимости сопротивления зазора от его длины представляет собой прямую линию, причем наклон определяется удельным сопротивлением полупроводника ρ, а точка пересечения с осью ординат (сопротивление зазора нулевой длины) составляет удвоенное сопротивление одного контакта, $2R_0$. Таким образом, путем аппроксимации графика можно найти контактное сопротивление.

Структура, применяемая в настоящей работе для исследования характеристик контактов, содержит ряд контактов размерами 400x400 мкм, расположенными на расстояниях 20, 40, 60, 80 и 100 мкм друг от друга. Первоначальная оценка линейности характеристик проводилась на аналоговом характериографе, зонды которого механически прижимались к контактным площадкам. На этом этапе отбирались структуры, обладающие линейными вольт-амперными характеристиками и минимальной чувствительностью к свету. Далее они наклеивались на медный или алюминиевый столик, предназначенный для закрепления в держателе криостата для последующих измерений при пониженных температурах. К контактам образца электропроводным клеем были приклеены тонкие медные проволочки, закрепленные на столике. Далее каждая из них соединялась с двумя выводами криостата для минимизации влияния сопротивления подводящих проводов. Внешний вид такого образца приведен на рисунке 22.

Измерения при пониженных температурах проводились при помощи автоматизированной установки на основе вольтметров KEITHLEY 2000, В7-78 и ЦАП LTR-34. Измерения велись по четырехпроводной схеме по всему диапазону температур от 300 К до минимальной температуры 10 К, обеспечиваемой применяемым криостатом. Результатом измерений являлись таблицы зависимости тока через каждый зазор от напряжения на нем. По этим данным появилась возможность оценить как линейность характеристик образца, в том числе, отсутствие перегрева, так и сопротивление зазора.

Ручная обработка такого большого объема данных заняла бы значительное время, поэтому была написана утилита для аппроксимации

набора точек полиномом произвольной степени. Впоследствии эта же утилита была применена для анализа сопротивлений и пробивных напряжений затворов. Исходный код доступен по адресу https://github.com/COKPOWEHEU/Approx. Применение текстовых интерфейсов позволило использовать ее в составе скрипта, автоматически обрабатывающего все файлы исходных данных. Пример такого скрипта, применяемого для анализа характеристик затворов, приведен в приложении А.

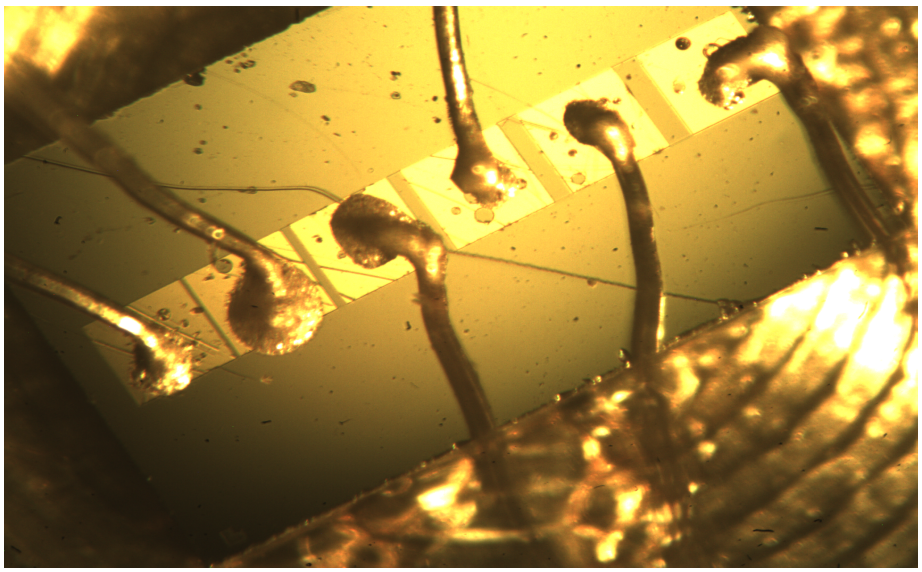
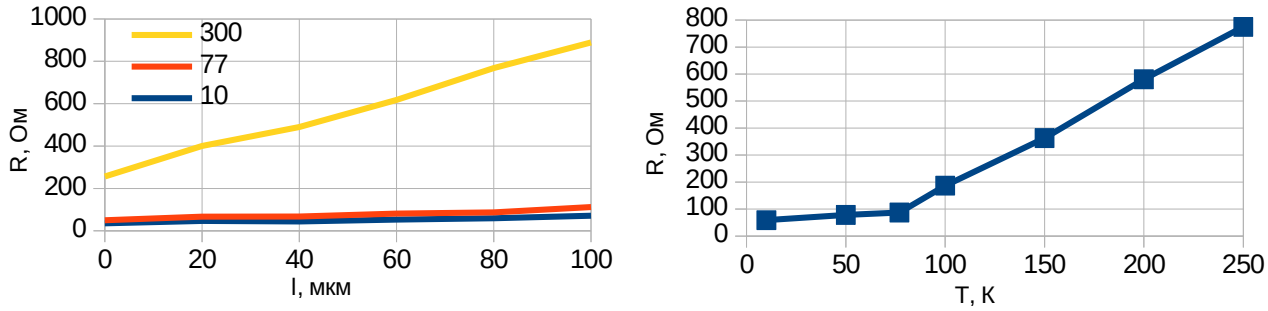


Рисунок 22 — Структура для измерения характеристик контактов

4.2.1. Измеренные характеристики

В результате измерения методом передающей линии были получены сопротивления контактов при комнатной температуре для различных режимов вжигания. Эти значения приведены ранее, в главе 2.6.6 в таблицах 5 и 6. В результате этого были выбраны режимы вжигания, обеспечивающие наилучшие характеристики. Структуры, изготовленные в соответствии с этими режимами, были исследованы при низких температурах.

Сопротивления контактов к «глубокой» структуре, показанные на рисунке 23а, составили 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. Более подробно была снята зависимость сопротивления зазора 80 мкм, показанная на рисунке 23б. Из графиков видно, что при снижении температуры сопротивление падает, то есть контакты остаются работоспособными при пониженной температуре, и при их изготовлении не было внесено значительного количества дефектов.



а) б)

Рисунок 23 — Зависимость сопротивления всей структуры (а) и зазора 80 мкм (б) от температуры

При измерении сопротивлений зазоров «мелкой» структуры было обнаружено, что расчет сопротивления контакта методом передающей линии невозможен. Как показано на рисунке 24, при низких температурах сопротивление зазора 20 мкм становится больше, чем сопротивление зазора 100 мкм. При этом все вольт-амперные характеристики остаются линейными, как показано на рисунке 25 на примере зазора 20 мкм. Повторные измерения, а также сравнение со значениями при других температурах подтверждают, что данный эффект не является ошибкой измерения, а скорее особенностью структуры или контактов. Наиболее близким явлением, описанным в литературе, является различие характеристик контактов при различных кристаллографических ориентациях. Более подробно эти эффекты и

возможные модели, объясняющие наблюдаемое поведение контактов, будут рассмотрены ниже.

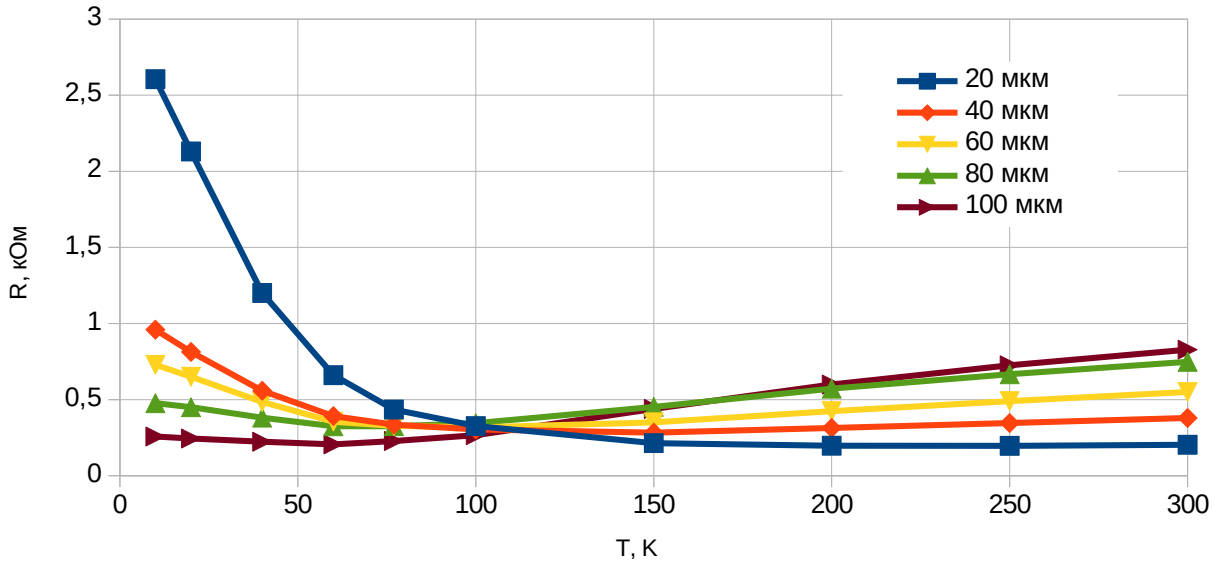


Рисунок 24 — Зависимость сопротивления «мелкой» структуры от ширины зазора при разных температурах

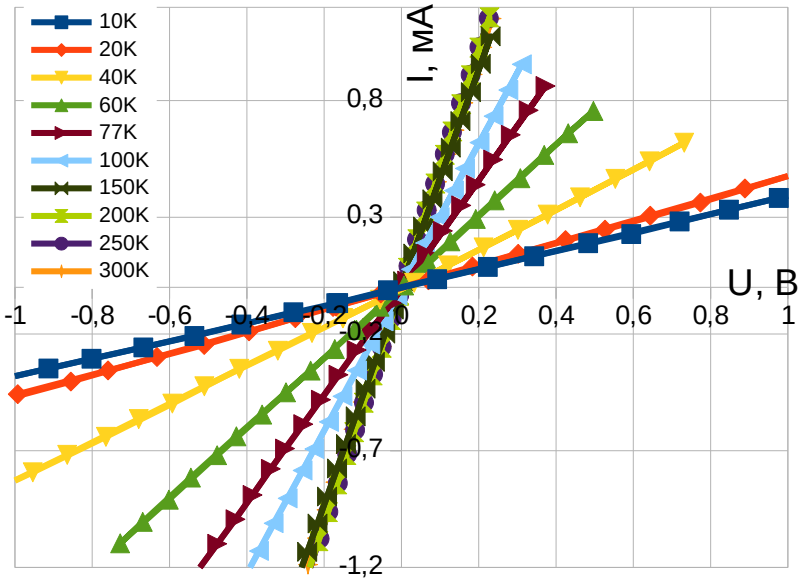


Рисунок 25 — Вольт-амперные характеристики зазора 20 мкм при различных температурах

4.3. Измерение характеристик рабочих структур

Одной из целей настоящей работы являлось измерение характеристик полупроводниковых структур с одномерным каналом и несколькими боковыми затворами. Поскольку наблюдение квантово-размерных эффектов возможно только при низкой температуре, измерения проводились в криостате. Температуры 10 К, достижимой в криостате замкнутого цикла, применяемом при измерении сопротивлений контактов, недостаточно для данных экспериментов, поэтому была применена откачиваемая вставка, помещаемая в сосуд Дьюара с жидким гелием. Образец закреплялся внутри вставки, а угольный терморезистор ТСУ-2, закрепленный рядом с ним, позволял контролировать температуру. При этом обеспечивалась возможность проведения измерений при температурах до 1,5 К.

Стоит отметить, что температура, на которой начинают проявляться низкоразмерные эффекты, зависит от подвижности электронов, размеров канала и формы потенциальной ямы. К примеру, в [56] наблюдалось квантование проводимости до температуры 50 К.

4.3.1. Описание измерительной установки

Измерения транспортных характеристик образцов проводились при помощи автоматизированной установки, схематически изображенной на рисунке 26. При этом подаваемый на канал ток не превышал 1 нА с целью минимизации нагрева, а напряжения на затворах не превышали 1 В.

При таких измерениях особое внимание должно уделяться борьбе с разнообразными помехами, которая включает использование экранированных проводов, правильной разводки земли и метода синхронного детектирования. В рассматриваемой установке оно было реализовано следующим образом. Синусоидальный сигнал частотой 133 Гц с прибора SR830 подается на самодельный блок, содержащий

понижающий трансформатор и систему подачи постоянного напряжения смещения (не показана на данной схеме, но присутствует на электрической схеме, приведенной в приложении Б), а оттуда на исток образца. В результате напряжение, подаваемое на образец, равно входному напряжению, умноженному на некий коэффициент, составляющий в описанном случае $3{,}212 \cdot 10^{-5}$, что обеспечивает использование всего диапазона SR830 для подачи на образец напряжения порядка сотен микровольт. Электрическая схема данного блока приведена в приложении Б. Сток образца подключен к преобразователю ток-напряжение SR570, напряжение с которого подается на синхронный вольтметр, входящий в состав SR830. Также напряжение на канале образца контролируется синхронным вольтметром 5105 через предусилитель 10:1 SR550. Синхронизирующий сигнал снимается с соответствующего выхода SR830. Напряжения на затворах задается восьмиканальным источником LTR34. Согласно его описанию, при включении на выходах могут появиться выбросы до половины максимального напряжения, то есть до 5 В, что может привести к пробою канала образца. Для защиты был изготовлен блок реле, управляющийся по USB и позволяющий отключать все каналы LTR34 от выходов и переключать между их парами (особенность LTR34: каждый канал представляет собой пару выводов, диапазон напряжений на одном из которых ±1 В, а на втором ±10 В). Кроме того, для дополнительной защиты и расширения диапазона, был изготовлен блок делителей, ограничивающих максимальный ток через затворы и позволяющий использовать диапазон ±10 В для подачи на образец до 2,5 В (на практике напряжения более 1 В почти не использовались). Для повышения точности и контроля утечек затворов напряжение на каждом из них измерялось вольтметрами E24 и NI9234, по три канала на каждый. Вольтметр E24 предназначен для подключения по собственному протоколу, основанному на RS232, однако его использование оказалось неудобным, поэтому был изготовлен преобразователь этого протокола в USB, описанный в [75].

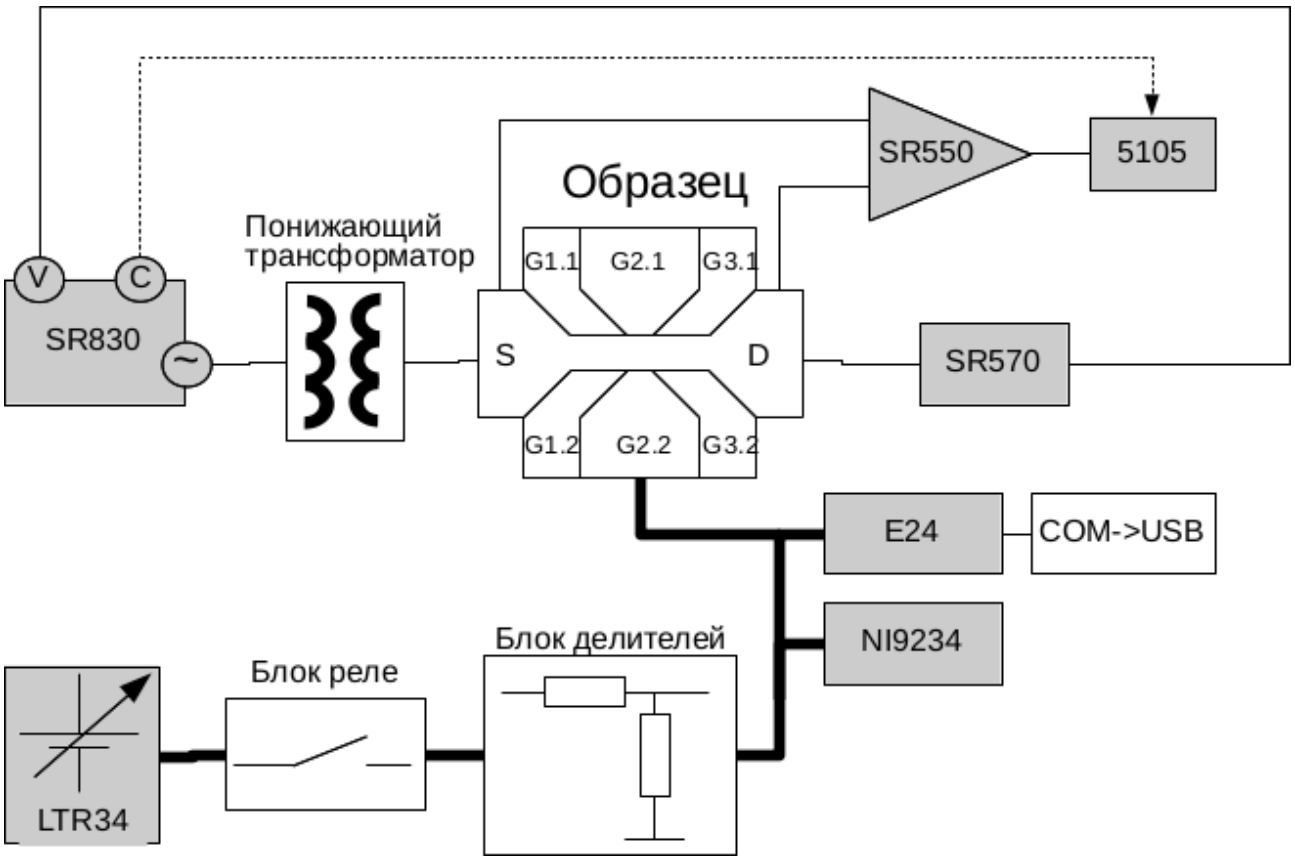


Рисунок 26 — Схема измерительной установки

4.3.2. Характеристики «мелких» структур

Особенностью таких структур является малая глубина залегания двумерного электронного газа, составляющая 35 нм, что дает возможность применения локального анодного окисления для формирования канала и затворов. Таким образом, их изготовление было возможно до того, как начались эксперименты с импульсной силовой нанолитографией. На рисунке 27 приведены результаты измерения зависимости проводимости 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. Более явно особенности при малых проводимостях канала видны на зависимостях, показанных на

рисунке 28. На рисунке приведены результаты измерения при температуре 1,5 К зависимости проводимости структуры при низком уровне проводимости канала от напряжения на центральном затворе при фиксированных напряжениях на крайних затворах в диапазоне от 0 до 150 мВ. Эти характеристики получены после длительной релаксации образца после засветки и отражают практически равновесные параметры образца. Видно, что изменение потенциала центральных затворов от -0,3 до 0,5 В приводит к изменению кондактанса канала от 0 G_0 до 0,3 — 0,4 G_0, причем проводимость возрастает не монотонно, а при значениях G менее 0,15 G_0 на зависимостях наблюдаются характерные осцилляции.

На рисунке 29 представлены зависимости проводимости канала от продольного напряжения. При этом крайние затворы заземлены, а на средний затвор подаётся отрицательный потенциал. Представленные кривые можно рассматривать как суперпозицию двух зависимостей. На кривую с минимумом при U_{sd}=0 наложена кривая с рядом резонансных пиков, которые наиболее отчётливо проявляются вблизи точки минимума. При монотонном (от кривой 1 до 7) изменении потенциала среднего затвора пик, находящийся на кривой 1 слева от минимума при U_{sd}=0, отходит дальше от него (кривые 2 и 3), а на правом склоне, наоборот, появляется и приближается к U_{sd}=0 другой пик (кривые 2 – 5). Можно полагать, что на кривой 5 данный пик попадает почти точно в область минимума, этим можно объяснить относительно небольшое снижение проводимости в минимуме по сравнению со склонами. На кривой же 6 минимум резко проваливается, то есть пик переходит на левый склон, а на правом появляется новый, который ярче выражен на кривой 7 при его приближении к минимуму. Таким образом, в целом картину можно представлять как сложение двух эффектов. Ряд пиков, которые на рисунке последовательно перемещаются в сторону отрицательных U_{sd} при переходе от кривой 1 к кривой 7, возможно обусловлены образованием резонансного квазисвязанного состояния, аналогичного рассмотренному в [76].

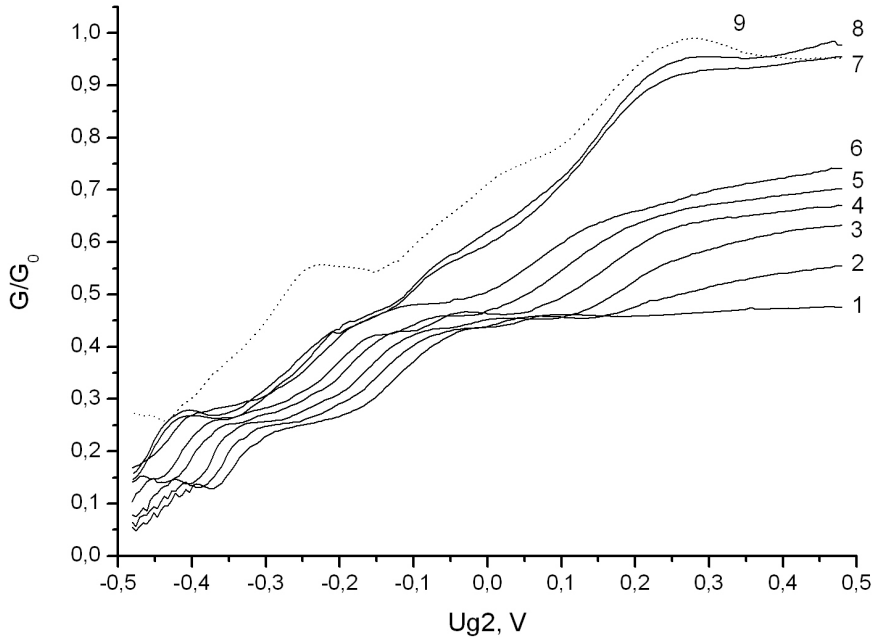


Рисунок 27 — Зависимость проводимости канала при напряжении UG1 = -280 мВ и напряжениях UG2 = -350 (1), -300 (2), -250 (3), -200 (4), -140 (5), -100 (6), 350 (7), 500 (8) мВ и при UG1 = UG3 = 0.

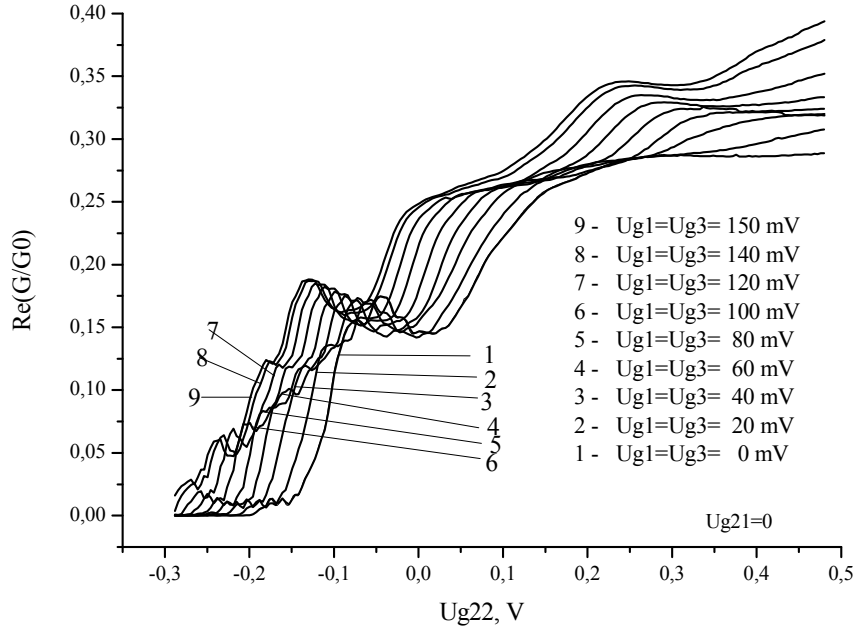


Рисунок 28 — Зависимости проводимости от напряжения на средних затворах при различных напряжениях на крайних

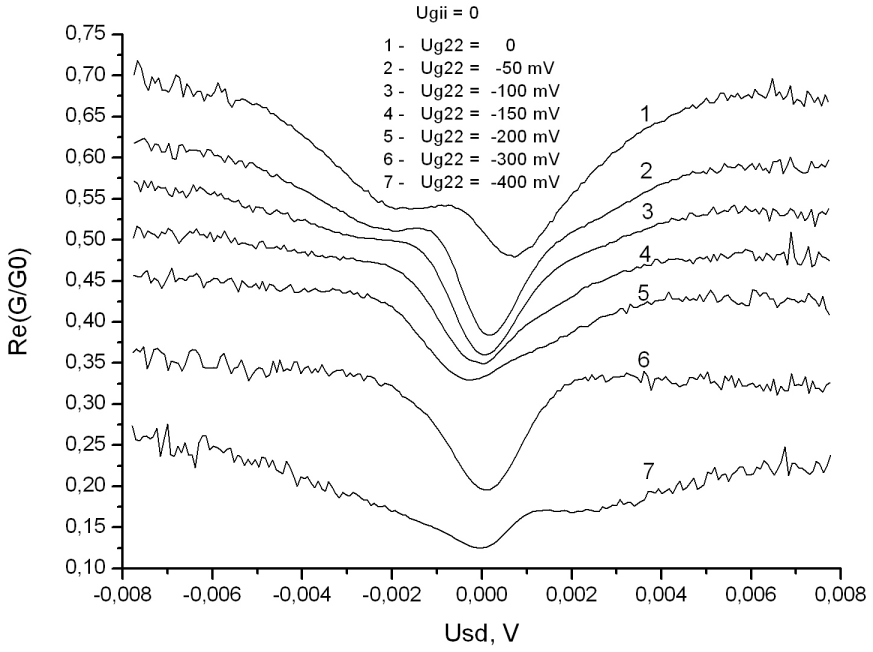


Рисунок 29 — Зависимость проводимости канала от продольного напряжения при различных потенциалах на затворе G2

4.3.3. Характеристики «глубоких» структур

Как было сказано ранее, применение локального анодного окисления к структурам с «глубоким» (135 нм в рассматриваемых структурах) залеганием двумерного электронного газа в настоящее время затруднено, что и послужило причиной разработки метода ИСНЛ. Наиболее оптимальными структурами для проверки вносимых им дефектов и их влияния на транспортные характеристики электронов являются структуры с «глубоким» залеганием двумерного газа.

Топология исследуемых структур включает в себя разделение каждого затвора на три части с целью раздельного управления. Однако на первом этапе такого разделения не проводилось и конфигурация ее изолирующих канавок выглядела как показано на рисунке 30. Одна из ее зависимостей проводимости от напряжения на затворах, снятых при температуре 1,5 К, приведена на рисунке 31. Наличие ступеней квантования означает, что значительная часть электронов образует одномерный газ, а их сглаженность — что присутствует рассеяние или параллельный проводящий канал. Первоначально было сделано первое предположение: поскольку длина канала сравнима с длиной свободного пробега электрона в исходном материале (до нанесения контактов и проведения литографии), вполне вероятна ситуация ухудшения проводимости при вжигании и литографии, что несколько снижает длину свободного пробега и увеличивает рассеяние. Однако, учитывая возможность наблюдения квантования в каналах длиной несколько микрометров, возможное снижение подвижности считалось незначительным, а применяемые методики, соответственно, пригодными для дальнейших экспериментов.

Следующим этапом было исследование поведения шестизатворных структур от приложенного в разных конфигурациях напряжения. На рисунке 32а показаны характеристики шестизатворной структуры при подаче постоянного напряжения на крайние затворы (G1, G3) и изменении напряжения на средних (G2), а на рисунке 32б — сравнение

характеристик при подаче на крайние затворы постоянного напряжения 0,8 В и при изменении напряжения на них синхронно со средними. Как видно из графиков, при изменении профиля электрического потенциала меняется форма характеристики. Так, при подаче на все затворы одинакового напряжения форма характеристики становится близкой к линейной, тогда как в двузатворной структуре с той же длиной канала ступени квантования заметны лучше.

Интересен факт, что на всех исследованных структурах «особенность 0,7» была значительно более выраженной, чем ступени проводимости. Согласно [77], данная особенность обусловлена спин-поляризацией электронов и характерна для структур высокого качества.

Наиболее близкие к теоретическим характеристики, приведенные на рисунке 33, 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. Наличие явно выраженного квантования проводимости канала подтверждает, что транспорт электронов в нем является баллистическим, то есть применение ИСНЛ не вносит существенных дефектов кристаллической решетки.

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 данного предположения образец обрабатывался кислородной плазмой с измерением характеристик после каждого этапа. Эти измерения проводились уже в криостате замкнутого цикла при температуре 10 К. Полученные характеристики приведены на рисунке 34. Первоначальное измерение, обозначенное на графике как Initial, проводилось перед какой-либо обработкой поверхности. Далее была проведена стандартная процедура освежения (линия, обозначенная HCl), после чего два отдельных процесса обработки кислородной плазмой (линии O_2 и $2xO_2$). На последнем этапе образец обрабатывался водородом по схеме, аналогичной описанной в главе, посвященной водородной

чистке (линия 2xO_2 + H_2). Как видно из графиков, проводимость образца после каждого этапа росла вместо того чтобы снижаться. Таким образом, можно сделать вывод о неэффективности использования кислородной плазмы для разрушения паразитного канала.

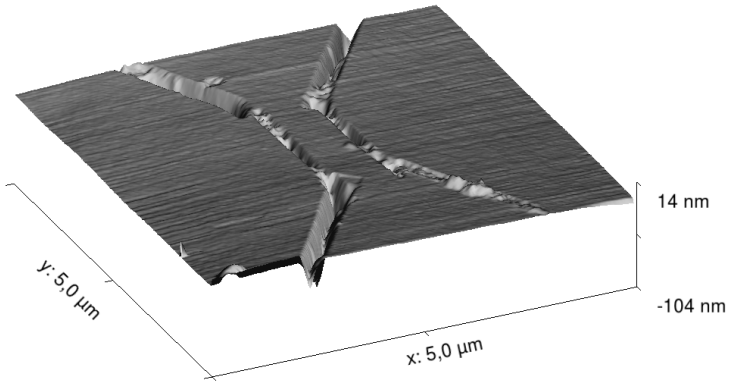


Рисунок 30 — АСМ изображение двузатворной структуры

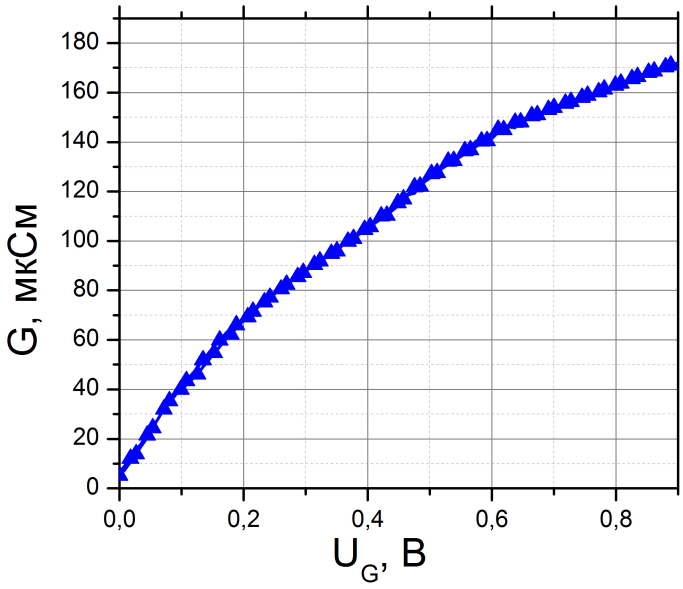
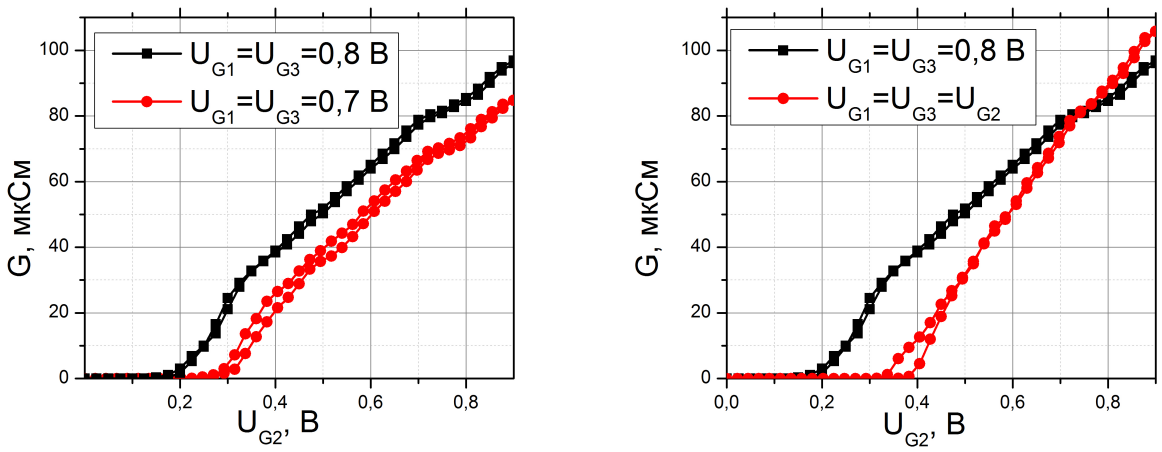


Рисунок 31 — Характеристика двузатворной структуры



а) б)

Рисунок 32 — Характеристики шестизатворных структур при различных конфигурациях напряжения на затворах

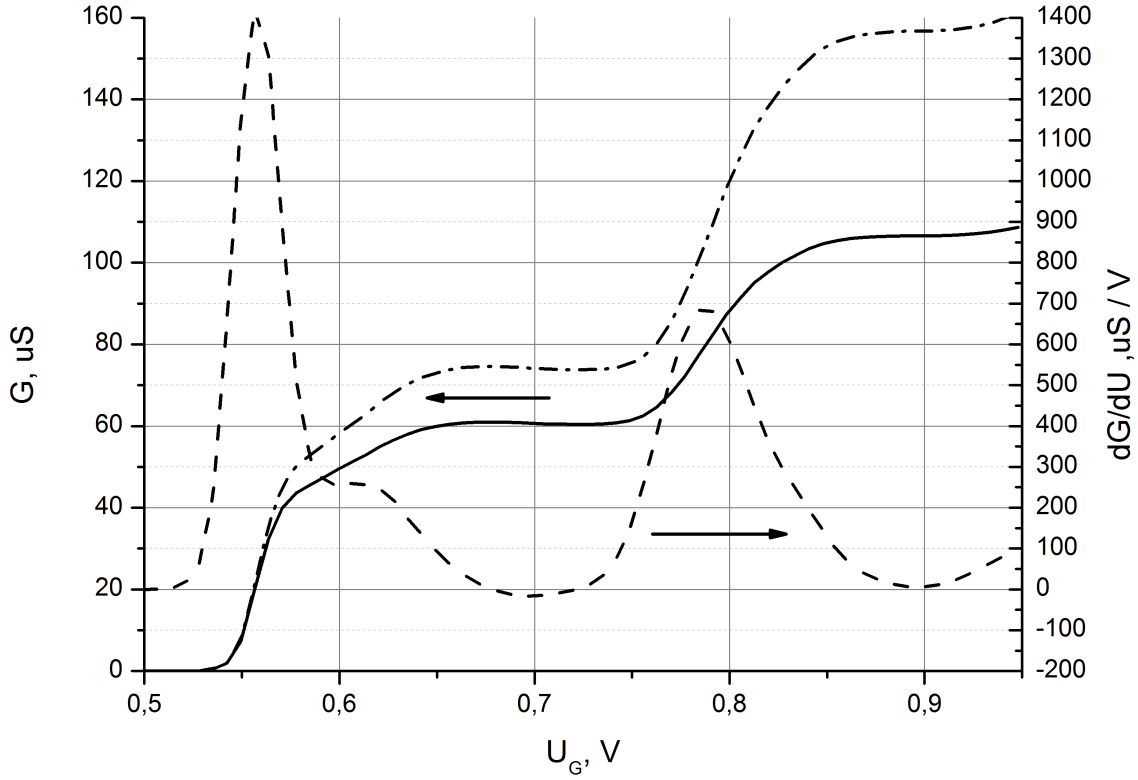


Рисунок 33 — Характеристика шестизатворной структуры с, вероятно, нарушенным параллельным каналом

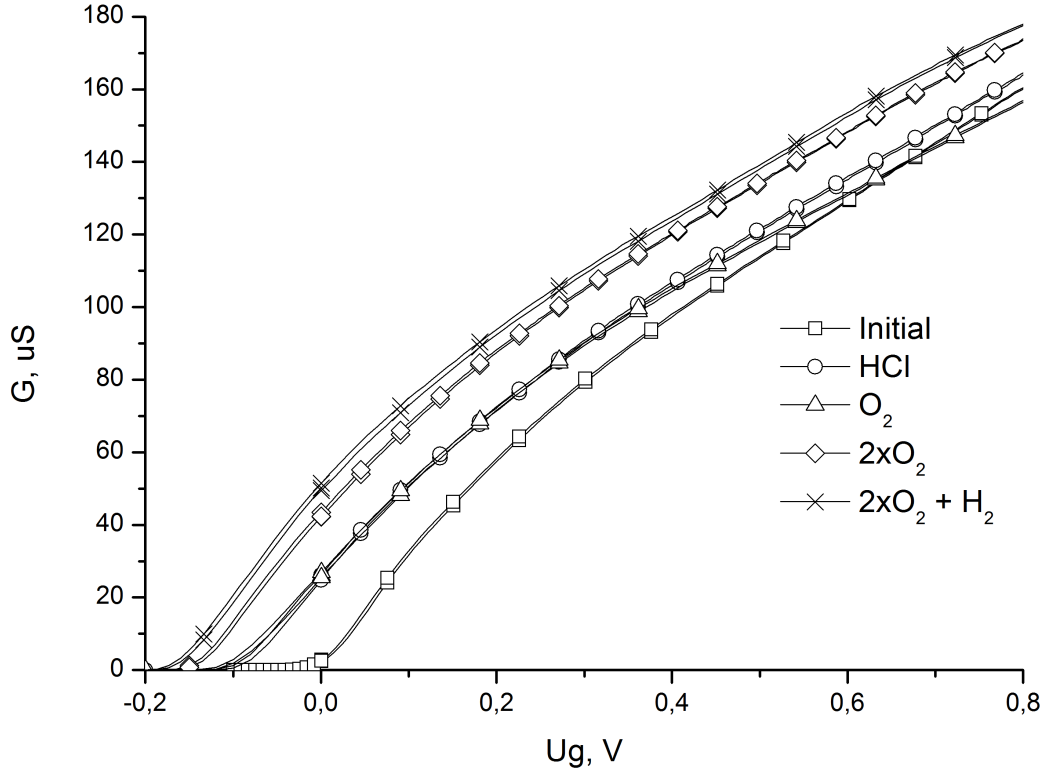


Рисунок 34 — Характеристики образца на различных этапах проверки влияния окисления поверхности

4.4. Заключение

При измерении характеристик контактов Ni/Ge/Au к «мелкой» структуре с глубиной залегания двумерного электронного газа 35 нм была обнаружена неожиданная зависимость сопротивления зазора от его длины, что сделало применение метода передающей линии к такой структуре невозможным. Более подробный анализ этих характеристик и их моделирование будут приведены в следующей главе. Несмотря на это, вольт-амперные характеристики контактов к таким структурам оставались линейными и обладали небольшим сопротивлением. Таким образом можно сделать вывод о применимости использованной системы

металлизации, режима вжигания и нанолитографии методом локального анодного окисления.

Характеристики «глубоких» структур с расстоянием от слоя двумерного газа до поверхности 135 нм не обладали такими особенностями, вследствие чего было возможно измерить их точнее. Сопротивление 7,1 Ом·мм при температуре 10 К, а также линейные вольт-амперные характеристики позволяют подтвердить применимость выбранной технологии создания контактов к таким структурам.

Наблюдение нескольких плато проводимости и «особенности 0,7» при низких температурах позволяет сделать вывод о высокой подвижности электронов, которая возможна только в том случае, если в процессе нанолитографии и изготовления контактов не было внесено значительного количества дефектов. Таким образом, была подтверждена возможность использования метода импульсной силовой нанолитографии для изготовления наноструктур с высокой подвижностью электронов и глубиной залегания двумерного газа более 135 нм.

Наблюдаемые в первых опытах с «глубокими» структурами сглаженные характеристики являются, вероятнее всего, следствием наличия параллельного проводящего канала с низкой подвижностью электронов. Однако попытки его разрушения обработкой поверхности кислородной плазмой или водородом заметного эффекта не дали. Таким образом для подтверждения или опровержения этой гипотезы требуется проведение дополнительных исследований.

5. Анизотропия контакта

При определении сопротивления контактов методом TLM было сделано предположение о том, что влияние контакта на сопротивление полупроводника распространяется на пренебрежимо малое расстояние. Однако, как видно из приведенных данных, это не всегда верно. Наблюдение подобных эффектов, хотя и редкое, упоминалось и в литературе. К примеру, в [22] при исследовании контактов с различными размерами и кристаллографическими ориентациями, было обнаружено, что сопротивление контакта зависит не столько от его площади, сколько от длины его границы с полупроводником. Кроме того, было обнаружено, что контакты с разной ориентацией обладают разным сопротивлением и даже его зависимостью от расстояния между соседними контактами.

Контакты, расположенные вдоль направления [011], обладают линейной зависимостью сопротивления от расстояния, то есть могут быть измерены методом TLM. Исследования образцов с различной шириной мезы показало, что удельное сопротивление контактов практически не меняется, то есть влияние ее границы невелико. В то же время, контакты, расположенные вдоль направления $[01\bar{1}]$ продемонстрировали увеличение сопротивления при уменьшении длины зазора, как показано на рисунке 35. Кроме того, обнаружился большой разброс сопротивлений контактов, сильная зависимость от ширины мезы и плохая воспроизводимость. Для минимизации этого эффекта, при изготовлении образцов для измерения эффекта Холла, авторы рекомендуют применять контакты с краем в форме меандра с длинными участками, перпендикулярными направлению [011].

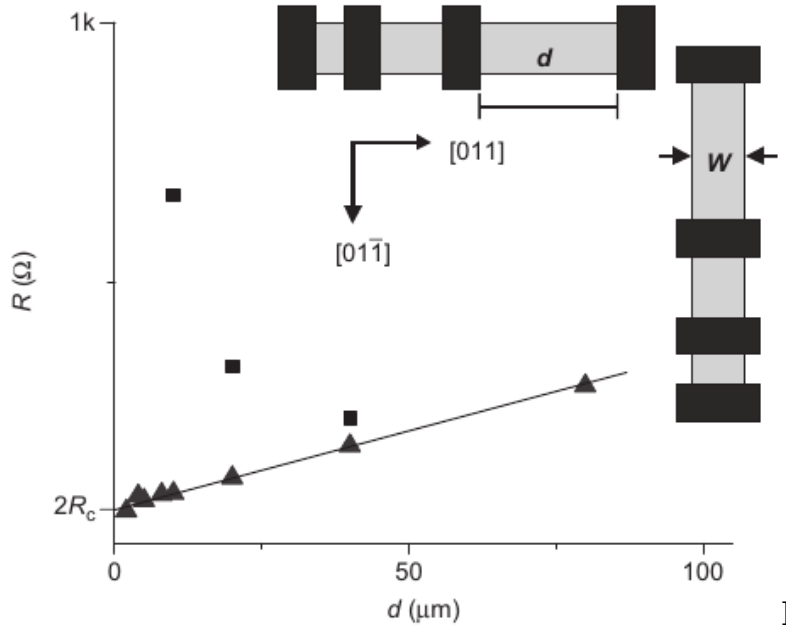


Рисунок 35 — Зависимость сопротивлений зазоров от ориентации и длины. Треугольные маркеры соответствуют направлению протекания тока [011], квадратные — [01$\bar{1}$]. Ширина мезы w = 10 мкм

Зависимость сопротивлений контактов или характеристик полевых транзисторов от кристаллографической ориентации рассматривалась большом числе литературных источников [78 — 81]. В частности, в [81] был рассмотрен эффект зависимости сопротивления контакта от его ориентации. Эта зависимость приведена на рисунке 36. Для ее объяснения было предложено три механизма: анизотропия диффузии металла, анизотропия роста зерен металла при рекристаллизации и пьезоэффект. Первый механизм самый простой и его результаты изображены на рисунке сплошной линией. В качестве модели было принято, что длина, на которую проникла металлизация, составила 0,41 мкм, что, однако, намного больше, чем реальная длина боковой диффузии. Таким образом, одного этого эффекта недостаточно для объяснения наблюдаемой анизотропии.

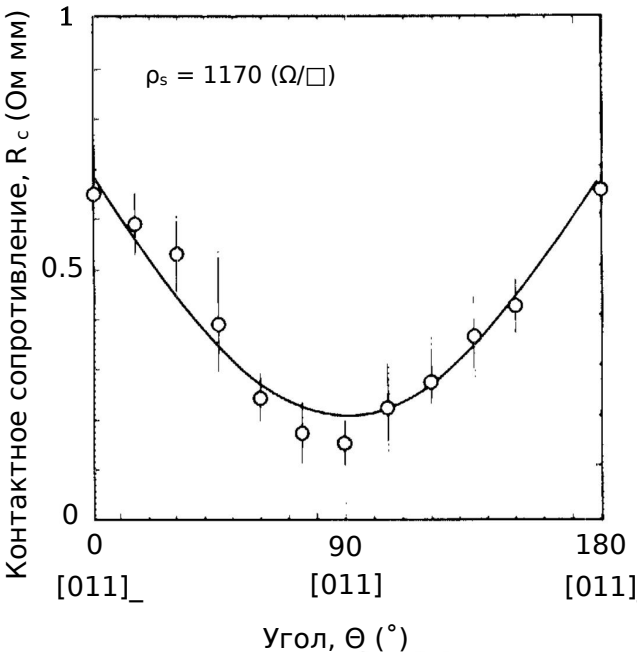


Рисунок 36 — Зависимость сопротивления контактов от их ориентации

Согласно упомянутому в этой работе Christou [82], зерна NiGeAs имеют прямоугольную форму и ориентируются вдоль направлений [011] и [0$\bar{1}$1]. В таком случае структура и площадь контакта зерна и полупроводника будет зависеть от ориентации. Впрочем, аномальную зависимость проводимости от расстояния между контактами этот эффект не объясняет.

В настоящей работе такая зависимость наблюдалась только на «мелких» структурах. Было сделано предположение, что меньшее расстояние до поверхности и меньшие толщины δ-слоев не обеспечивают достаточного экранирования зарядов, сформированных на поверхности структуры. В таком случае движение электронов в проводящем слое может быть не однородным, а осуществляться по сложным каналам, сформированным этими поверхностными зарядами. Такая проводимость рассмотрена, например, в [83 — 85] для топологических изоляторов и низкоразмерных полупроводниковых структур. При этом по длине проводящего слоя могут возникать точки, соединенные каналами

различной длины, что приводит к сдвигу фазы электронов и их интерференции, в результате чего образуются области с большей или меньшей проводимостью. Такой эффект называется слабой локализацией. Макроскопический характер неоднородностей вполне может объяснять различие проводимости при различных расстояниях между контактами.

Характерной особенностью данного эффекта является пик сопротивления в нулевом магнитном поле. При увеличении поля сопротивление достигает минимума, а потом растет вследствие эффекта Холла. Для проверки его наличия в лабораторных структурах были проведены измерения сопротивления образца при приложении магнитного поля. Отсутствие на графике зависимости, приведенном на рисунке 37, пиков в области нулевого поля, позволяет сделать вывод об отсутствии эффекта слабой локализации.

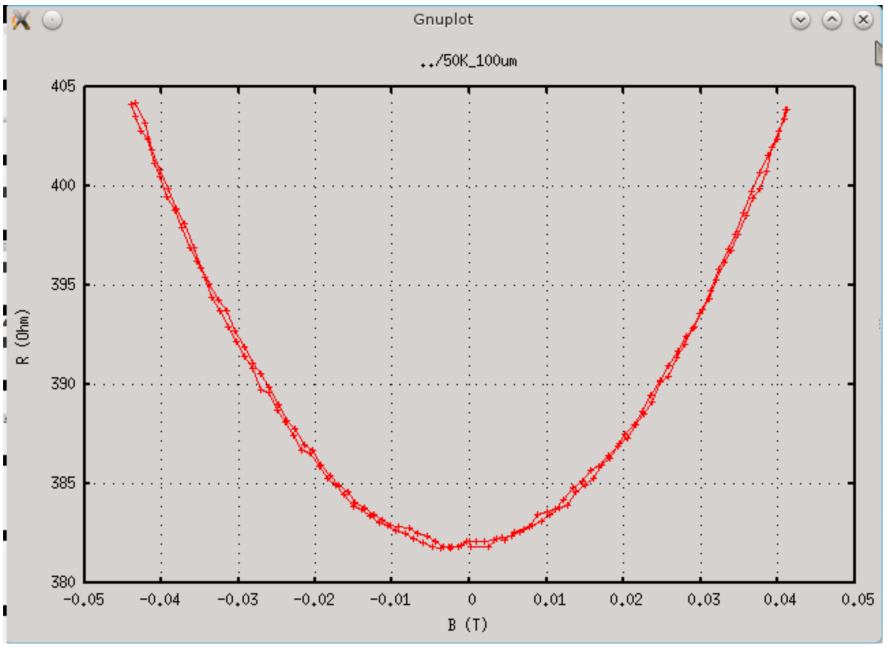


Рисунок 37 — Зависимость сопротивления зазора 100 мкм от магнитного поля при температуре 50 K

Наиболее вероятным эффектом, объясняющим анизотропию контактов и зависимость их сопротивления от длины зазора, является пьезоэлектрический эффект.

5.1. Моделирование пьезоэффекта в полевом транзисторе

Наличие на поверхности полупроводника слоев металлов и диэлектриков, формируемых при высоких температурах, а также отличие их коэффициентов термического расширения, приводит к возникновению механических напряжений. Одними из первых на этот эффект обратили внимание авторы [86], рассмотревшие пьезоэффект, вызванный таким напряжением на границе объемного GaAs и диэлектрика Si_3N_4, разделяющего электроды в полевых транзисторах с различной кристаллографической ориентацией и длиной канала до 10 мкм. Более подробно транзисторы с коротким каналом рассмотрены в [87]. Схема такого транзистора изображена на рисунке 38. Пьезоэффект, возникающий на границе диэлектрика, приводит к изменению плотности зарядов, описываемому следующей формулой:

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

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.

Эта формула записана для направления [011]. В формуле для направления $[01\bar{1}]$ необходимо изменить знак d_{14}, а для других направлений — воспользоваться матрицей поворота тензора пьезокоэффициентов. Авторы рассматривают полевые транзисторы с коротким затвором, на которых пьезоэффект наиболее заметен. В качестве изолятора был применен SiO_2, приводящий к возникновению напряжения порядка 10^9 дин/см^2 (10^8 Н/м^2). Длина затвора менялась от

0,5 до 5 мкм, расстояние от затвора до стока и истока составляло 0,75 мкм.

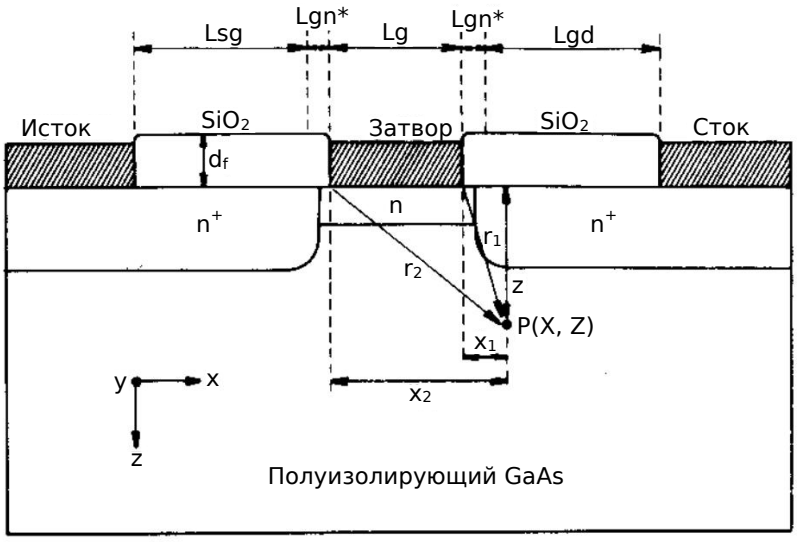
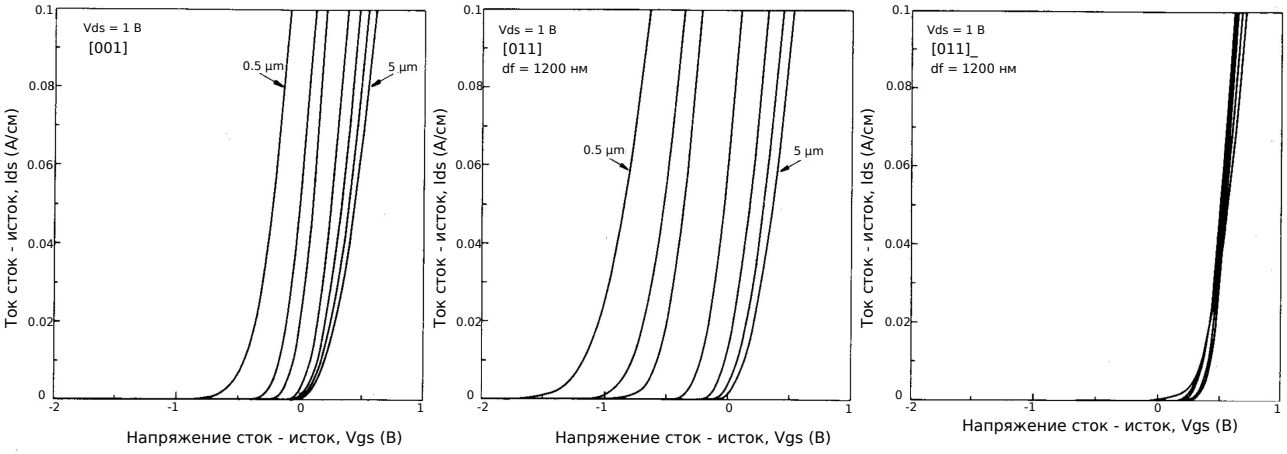


Рисунок 38 — Исследуемая структура транзистора

Расчеты двумерного случая методом конечных элементов позволили сделать вывод, что в транзисторах с коротким каналом пьезоэффект оказался существенным фактором, который накладывает определенные ограничения на минимальную длину канала, поскольку, как видно из приведенной формулы, с уменьшением длины канала величина пьезоэффекта возрастает. Также, исходя из этой формулы, пьезозаряды при ориентациях [011] и [01$\bar{1}$] равны по величине и противоположны по знаку. Для сравнения рассмотрим модель транзистора с ориентацией [001], в котором, вследствие симметрии кристалла, пьезоэффект наблюдаться не будет. Зависимость токов стока от напряжений на затворе приведены на рисунке 39а. Из рисунка видно влияние длины канала: при увеличении длины более 2 мкм, пороговое напряжение перестает изменяться. Для транзисторов с ориентациями [011] и [01$\bar{1}$], графики зависимостей которых приведены на рисунках 39б и 39в соответственно, ситуация иная. В случае ориентации [011] влияние длины канала значительно сильнее. Напротив, при ориентации [01$\bar{1}$] пороговое напряжение почти не зависит от длины канала, то есть пьезоэффект компенсирует его влияние.



а) б) в)

Рисунок 39 — Зависимость тока сток-исток от напряжения на затворе для различных ориентаций: (а) — [001], (б) — [011], (в) — [01$\bar{1}$]. Длина канала составляет 0,5, 0,75, 1, 2, 3, 4 и 5 мкм

Помимо различия коэффициентов теплового расширения, к возникновению механических напряжений может привести химическая реакция. Согласно [88], при вжигании транзисторных структур на основе InP с затвором на основе титана в атмосфере форминг-газа (азот с примесью 5% водорода), пороговое напряжение также меняется. Авторы сделали предположение, что при взаимодействии водорода с титаном образуется соединение TiH_x, превышающее объем исходного титана на 15 % даже при столь незначительной концентрации водорода, что и приводит к появлению механических напряжений, вызывающих пьезоэффект. Дальнейшие исследования, включавшие пассивацию поверхности при помощи Si_3N_4, исключение водорода из состава газа для вжигания и изготовления тестовых структур на основе кремния, подтвердили это предположение. Также выяснилось, что реакция с водородом проходит в первую очередь на границах зерен титана, что создает помимо общего механического напряжение, также локальные.

Отказ от использования водорода в процессе изготовления транзисторной структуры не дает защиты от его попадания в процессе эксплуатации. Авторы [89] утверждают, что достаточное для реакции количество водорода может быть десорбировано с поверхности корпуса

образца в течение длительного времени. Также ими было проведено численное моделирование, учитывающее различные длинны затворов, толщины слоев полупроводника, подзатворного диэлектрика и металлов. Было обнаружено, что влияние механических напряжений на сдвиг характеристик в GaAs выше, чем в InP. Моделирование транзисторов с разной длиной затвора показало, что при наиболее распространенной ориентации [011] для длинных затворов характерно отрицательное смещение порогового напряжения ΔV_T, при уменьшении длины оно начинает расти, и при длине менее 1 — 10 мкм становится положительным. При дальнейшем уменьшении длины скорость роста ΔV_T значительно увеличивается. Согласно расчетам, для уменьшения механических напряжений и, как следствие, изменения порогового напряжения транзистора, рекомендуется введение в металлизацию затвора дополнительного слоя менее упругого материала, который бы ограничивал деформацию титана, или увеличение толщины проводящего канала. Изменение ориентации на [010], как и в предыдущем рассмотренном случае, позволяет устранить пьезоэффект полностью, однако, в силу технологических особенностей, область применения таких структур ограничена.

Еще одной причиной возникновения пьезоэффекта может являться наличие в полупроводнике дефектов кристаллической решетки [90].

Данному эффекту может быть найдено и практическое применение. В [91, 92] рассмотрено влияние нанесенного на поверхность гетероструктуры GaAs/AlGaAs островка InP, за счет механического напряжения в полупроводнике формирующего квантовую точку. В [16, 17] пьезоэффект, вызванный различием постоянных кристаллических решеток гетероструктуры, используется для получения свободных носителей заряда вместо введения легирующей примеси. А в [93] предложен способ формирования планарной сверхрешетки путем нанесения металлических затворов на поверхность полупроводника.

5.2. Моделирование пьезоэффекта в гетероструктуре

Большая часть рассмотренных литературных источников обсуждает модель полевого транзистора, в котором проводящий канал располагается непосредственно под материалом, обеспечивающим механическое напряжение, а расчет ведется только для самого канала.

Используемые в настоящей работе структуры не содержат нанесенных на поверхность слоев диэлектрика. Таким образом, механические напряжения могут вызваться только разницей температурных коэффициентов расширения контактов и полупроводника. Точные значения коэффициентов теплового расширения могут быть найдены например в [94]. Модель рассматриваемой структуры, использованная также в [95, 96], приведена на рисунке 40.

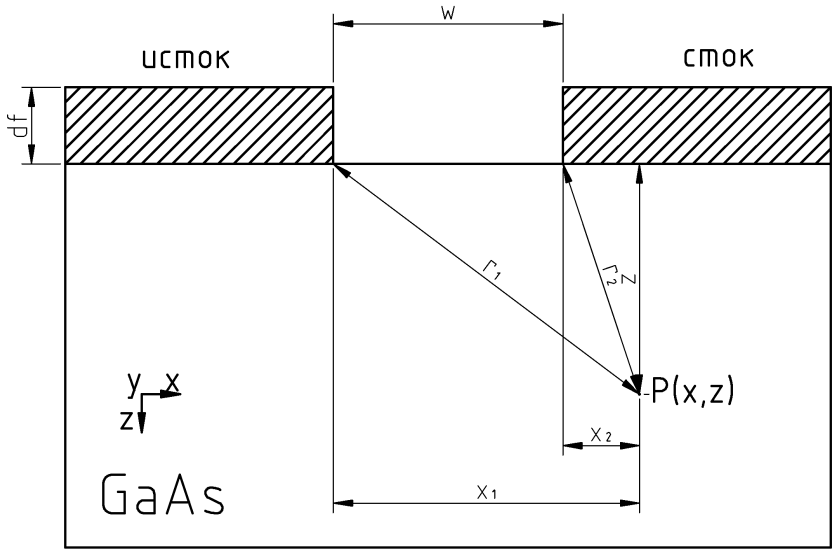


Рисунок 40 — Модель рассматриваемой структуры

Концентрация пьезозарядов в заданной точке может быть вычислена по упомянутой ранее формуле, приведенной в [87]:

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

Величина и знак пьезокоэффициента в арсениде галлия зависит от кристаллографической ориентации. Традиционно в транзисторах применяют такую, при которой ток идет вдоль направления [110], тогда как направление $[1\bar{1}0]$ считается непригодным. Тензор пьезоэлектрических коэффициентов для арсенида галлия в собственных кристаллографических координатах выглядит следующим образом [97, 98]:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} \end{pmatrix}$$

Для расчетов необходимо перевести данный тензор в выбранную систему координат, умножив его на матрицу поворота на 45° в ту или другую сторону в зависимости от требуемого направления протекания тока, [110] или $[1\bar{1}0]$. Это приводит к следующим тензорам:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 & 0 \\ \frac{d_{14}}{2} & -\frac{d_{14}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

или

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ -\frac{d_{14}}{2} & \frac{d_{14}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Как видно, все компоненты одного тензора равны по модулю и противоположны по знаку соответствующим компонентам второго. То есть механическое напряжение, при одной ориентации вызывающее за счет пьезоэффекта увеличение концентрации электронов, при другой ориентации будет приводить к ее уменьшению.

Наиболее очевидное влияние на проводимость оказывают пьезозаряды, индуцированные непосредственно в проводящем слое и изменяющие концентрацию свободных электронов. График зависимости концентрации пьезозарядов от расстояния до края контакта приведен на

рисунке 41, а качественное распределение плотности заряда по объему полупроводника — на рисунке 42. Из рисунка видно, что для заданной глубины залегания двумерного газа максимумы и минимумы концентрации располагаются на расстояниях, сравнимых с этой глубиной.

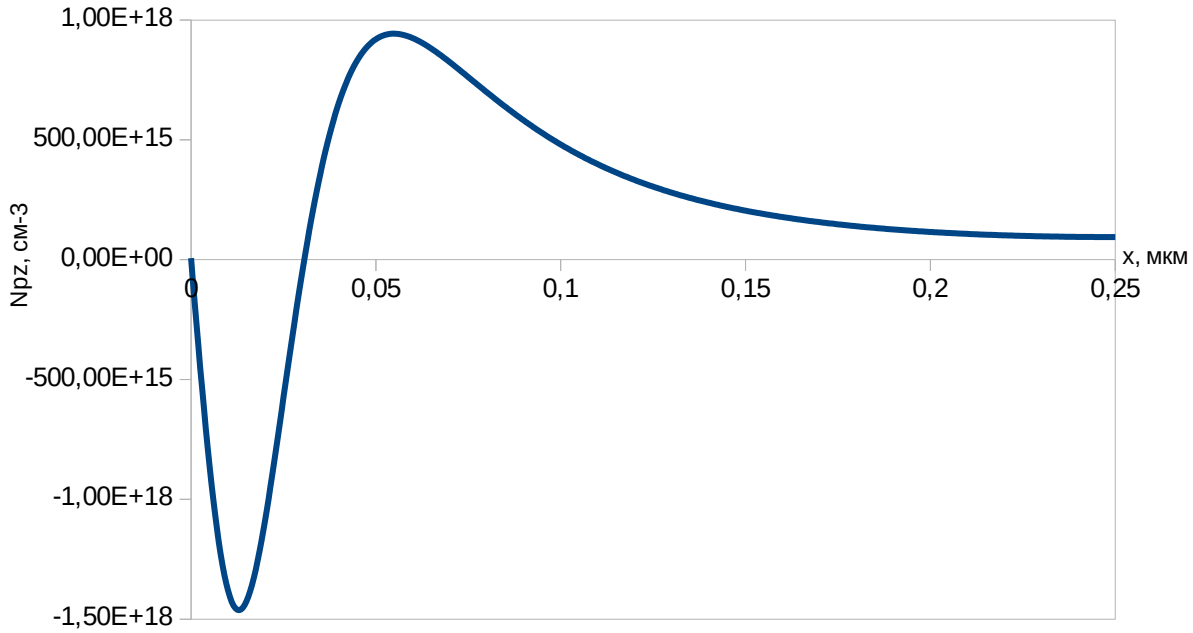


Рисунок 41 — График зависимости концентрации пьезозарядов в точке от ее расстояния до края контакта

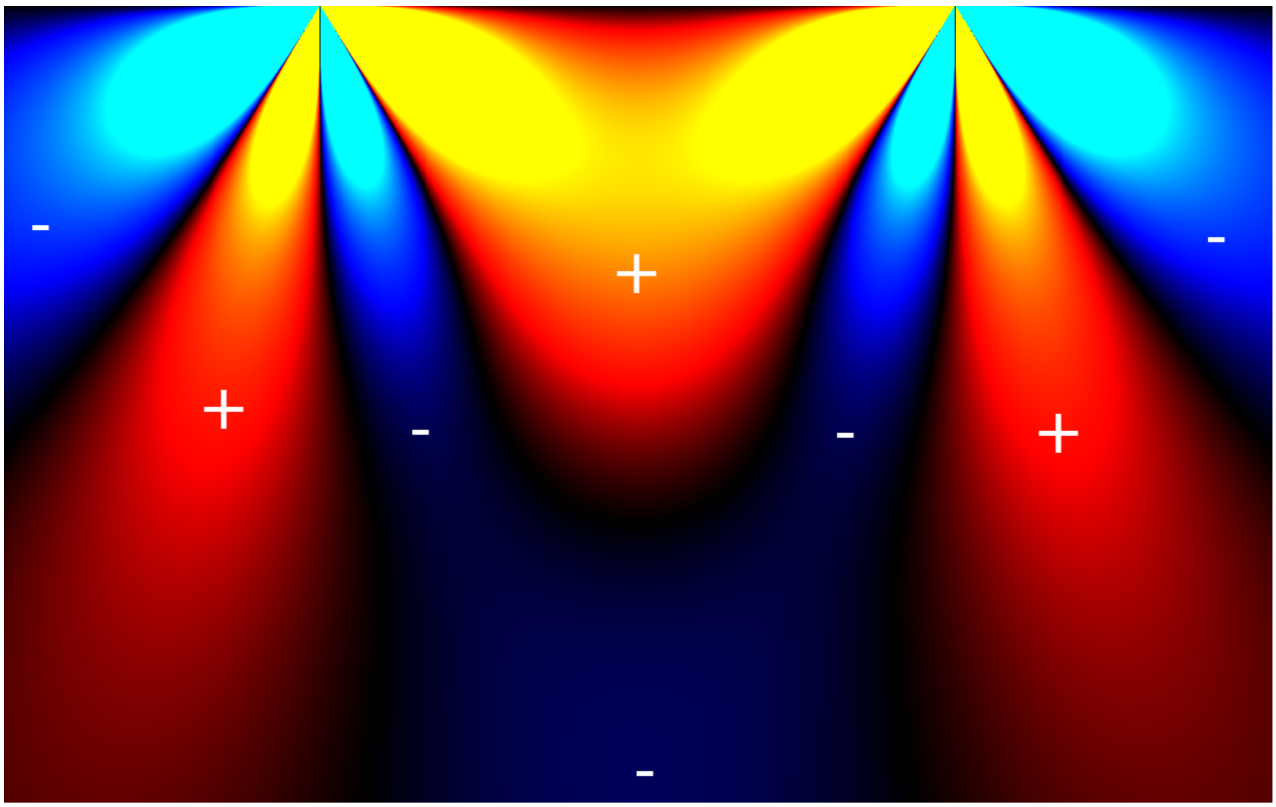
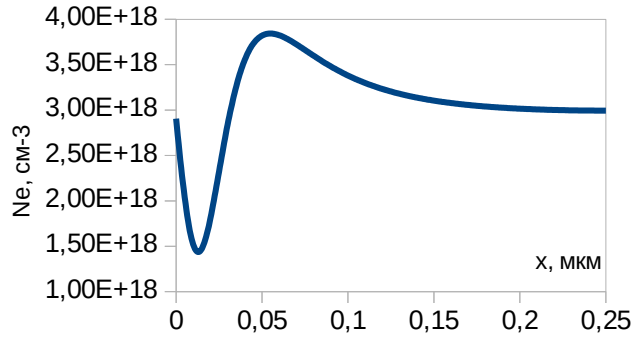
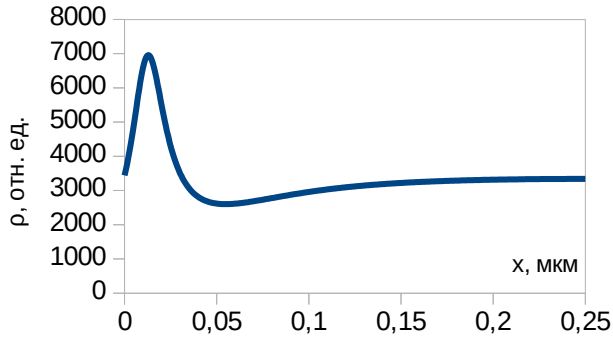


Рисунок 42 — Схема распределения пьезозарядов, вызванных наличием металлических контактов на поверхности полупроводника

Если концентрация свободных электронов в канале велика, влияния пьезоэффекта недостаточно для ее изменения на значительную величину и, как следствие, проводимость останется практически неизменной. Если же концентрация электронов лишь незначительно превышает концентрацию пьезозарядов, обедненные области вблизи максимума концентрации пьезозарядов начинают оказывать существенное влияние на общую проводимость канала. На рисунке 43 приведены соответствующие графики концентрации электронов и удельной проводимости для концентрации свободных носителей $2{,}9 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$, глубине залегания ДЭГ 40 нм, толщине металлизации 1 мкм, механическом напряжении $5 \cdot 10^{8}$ $Н/м^{2}$ и расстоянии между контактами 500 нм. Из них легко получить общее сопротивление зазора интегрированием по его длине.



а



б

Рисунок 43 — концентрация свободных электронов (а) и удельное сопротивление (б) в зависимости от расстояния от края контакта

В результате проведения соответствующих расчетов для нескольких зазоров был получен график зависимости сопротивления зазора от его длины, приведенный на рисунке 44

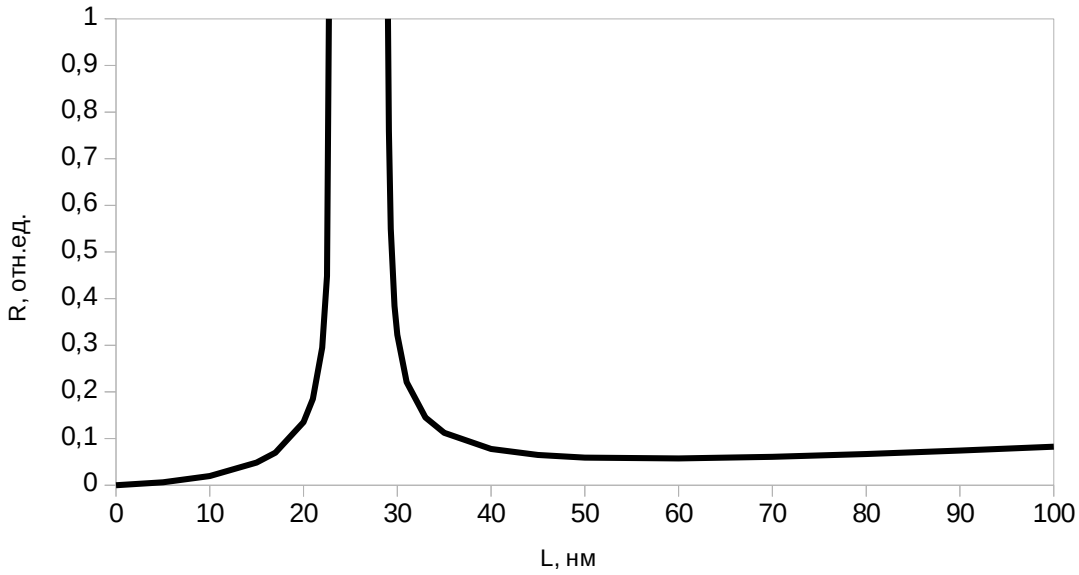


Рисунок 44 — Зависимость сопротивления зазора от его длины

Как видно из графика, существует область от 30 до 60 нм, в которой сопротивление уменьшается при увеличении расстояния между контактами. При расстоянии от 23 до 30 нм концентрация пьезозарядов

становится достаточно большой для полного обеднения участка канала, а при большем — максимумы концентрации пьезозарядов от отдельных контактов слишком сильно отдаляются и не оказывают друг на друга существенного влияния, что соответствует модели метода передающей линии.

Существенным ограничением рассмотренного метода моделирования является недостаточное расстояние между контактами по сравнению с глубиной залегания ДЭГ. Для глубины залегания двумерного газа расчетный диапазон длин канала от 30 до 60 нм сильно отличается от наблюдаемого экспериментально 20 — 100 мкм, однако модель подтверждает принципиальную возможность объяснения наблюдаемого явления при помощи пьезоэффекта.

Существование механических напряжений приводит к появлению заряда не только в проводящем слое, но и во всей толще полупроводника. Этот заряд создает электростатический потенциал, аналогичный потенциалу затвора полевого транзистора, что также может повлиять на проводимость. Для проверки существования условий, при которых сопротивление более короткого зазора превышает сопротивление более длинного была написана программа расчета разности потенциалов между одним из контактов и серединой зазора в зависимости от толщины слоя полупроводника. Исходный код программы доступен по адресу https://github.com/COKPOWEHEU/piezoeffect_GaAs. Первоначально весь объем разбивался на одинаковые ячейки, бесконечно протяженные вдоль оси Y и имеющие размеры dx и dz по осям X и Z соответственно. Далее для каждой ячейки рассчитывалась концентрация пьезозаряда по приведенной ранее формуле. Считая сечение ячейки пренебрежимо малым, можно представить ее в виде бесконечно длинного однородно заряженного цилиндра с плотностью заряда $\tau = N_{PZ} \cdot dx \cdot dz$, зная который, можно найти разность потенциалов между двумя точками по формуле

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

где l_1, l_2 — расстояния от ячейки до заданных точек.

Далее, согласно принципу суперпозиции, потенциалы в данной точке, созданные всеми ячейками, складываются. На основании полученных значений были построены графики зависимости потенциала в середине зазора от глубины интегрирования (в логарифмическом масштабе), приведенные на рисунке 45 для глубины залегания ДЭГ 10 нм. Как видно из рисунка, существует область между -4.5 и -5 единицами (10 — 31,5 мкм), 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.

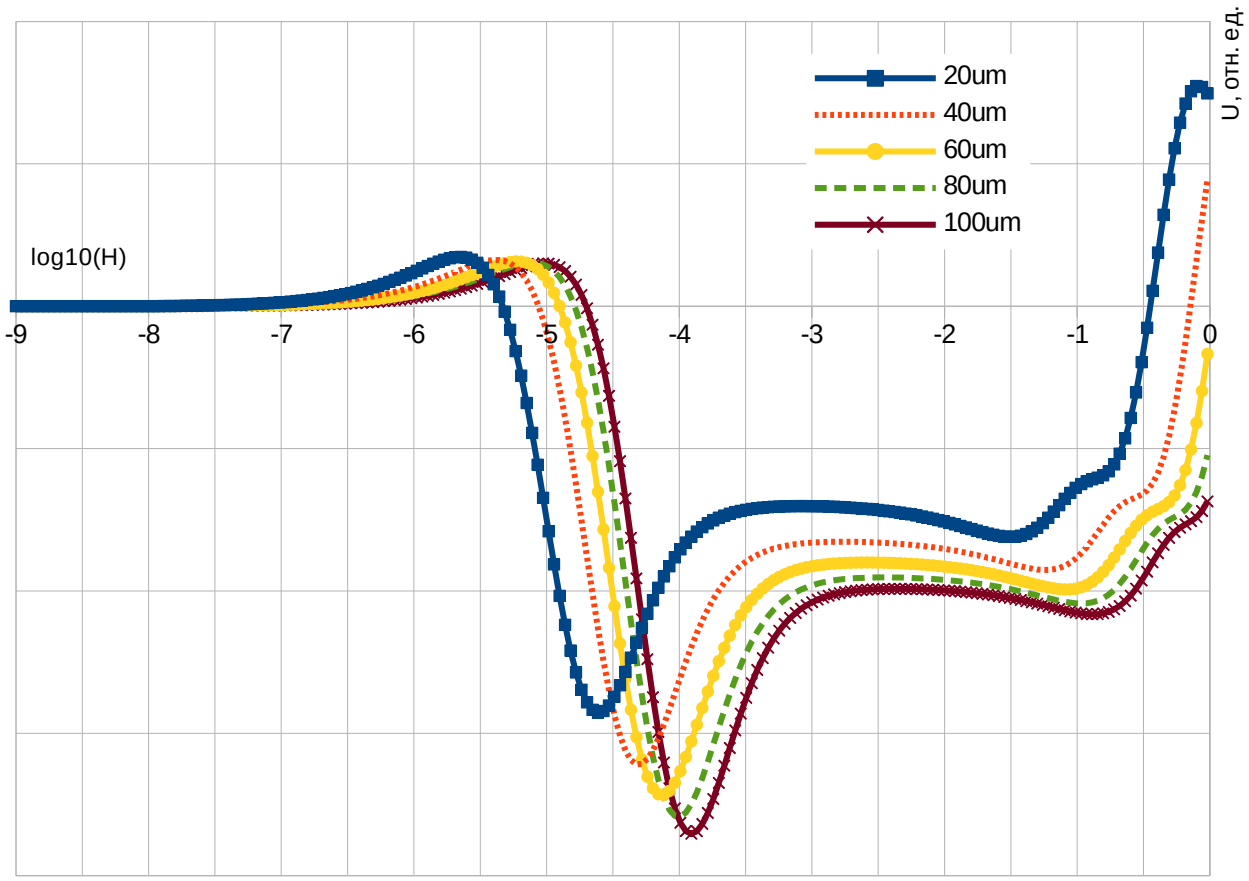


Рисунок 45 — Зависимость потенциала в середине канала от глубины интегрирования

В данной модели не учитывается снижение концентрации пьезозарядов вследствие экранирования свободными носителями зарядов в подложке. В реальной структуре это приводит к значительному снижению влияния пьезозарядов, формирующихся на большой глубине.

5.3. Заключение

Наблюдаемые эффекты анизотропии проводимости полупроводника могут быть объяснены несколькими причинами: анизотропией диффузии металла контактов в полупроводнике; анизотропией и кристаллографической ориентацией роста зерен металла контакта при рекристаллизации; пьезоэлектрическим эффектом, вызванным различием температурных коэффициентов расширения полупроводника и металла; неоднородностью проводящего слоя, приводящей к появлению эффекта слабой локализации.

Для объяснения наблюдаемого эффекта зависимости сопротивления полупроводника от расстояния между контактами могут быть применены только пьезоэффект и эффект слабой локализации, причем наличие последнего опытным путем подтверждено не было. Эффекты анизотропии диффузии и ориентации зерен металла могут давать вклад в анизотропию проводимости по различным кристаллографическим направлениям, однако не объясняют ее полностью.

В литературе описаны эффекты возникновения пьезоэффекта вследствие реакции титана, входящего в состав металлизации затвора, с водородом, в том числе, постепенная деградация приборов, собранных по соответствующей технологии. Также упоминается использование нанесенной на поверхность полупроводника фоторезистивной или металлической сетки для создания потенциального рельефа в канале.

Численное моделирование пьезоэффекта подтвердило его влияние на пороговое напряжение транзисторных структур, зависящее от кристаллографической ориентации. Расчет влияния пьезоэффекта

непосредственно на концентрацию электронов в канале подтвердил возможность существования области обратной зависимости сопротивления зазора от его длины при длинах, сравнимых с глубиной залегания двумерного газа. Использование модели, учитывающей существование пьезозарядов во всей толще полупроводника подтвердило возможность существования такой области при длинах канала, значительно превышающих глубину залегания двумерного газа.

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.

Список использованных источников

1. Алфёров Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетеоструктур // Физика и техника полупроводников, 1998, том 32, вып.1, с. 3-18
2. А.А. Щука Наноэлектроника – Москва, Физматкнига, 2007. - 464 с. ISBN 978-5-89155-163-3.
3. Физика низкоразмерных систем /А.Я. Шик, Л.Г. Бакуева, С.Ф. Мусихин, С.А. Рыков — Санкт-Петербург «Наука», 2001.
4. Нанотехнология. Физика, процессы, диагностика, приборы. / А.В. Афанасьев, В.П. Афанасьев, Г.Ф. Глинский и др.; Под ред. Лучинина В.В., Таирова Ю.М. — Москва, Физматлит, 2006
5. D. P. Yu, Z. G. Bai, Y. Ding et al. Nanoscale silicon wires synthesized using simple physical evaporation // Appl. Phys. Lett., 1998, 72(26), pp. 3458-3460
6. Y. F. Zhang, Y. H. Tang, N. Wang et al. Silicon nanowires prepared by laser ablation at high temperature // Appl. Phys. Lett., 1998, 72(15), pp. 1835-1837
7. N. Wang, Y.H. Tang, Y.F. Zhang et al. Transmission electron microscopy evidence of the defect structure in Si nanowires synthesized by laser ablation // Chemical Physics Letters 283 (1998) 368–372
8. R. S. Wagner, W. C. Ellis Vapor-liquid-solid mechanism of single crystal growth // Appl. Phys. Lett. 4 (1964) pp. 89-90
9. Yue Wu, Yi Cui, Lynn Huynh et al. Controlled Growth and Structures of Molecular-Scale Silicon Nanowires // Nano Lett., Vol. 4, No. 3 (2004) pp. 433-436
10. J. B. Hannon, S. Kodambaka, F. M. Ross, R. M. Tromp The influence of the surface migration of gold on the growth of silicon nanowires // Nature Vol. 440 No 2 (2006) pp. 69-71
11. Yi Cui, Xiangfeng Duan, Jiangtao Hu, Charles M. Lieber Doping and Electrical Transport in Silicon Nanowires // J. Phys. Chem. B, Vol. 104, No. 22 (2000) pp. 5213-5216

12. Yi Cui, Charles M. Lieber Functional Nanoscale Electronic Devices Assembled Using Silicon Nanowire Building Blocks // Science 291 (2001) pp.851-853
13. C. Z. Li, N. J. Tao. Quantum transport in metallic nanowires fabricated by electrochemical deposition/dissolution. Appl. Phys.Letters, 72, 8, P.894-897, 1998
14. Beenakker C. W. J., van Houten H. Quantum Transport in Semiconductor Nanostructures // Solid State Physics, 44, P. 1-228, 1991.
15. Y. Jin. Ohmic contact to n-type bulk and δ doped $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$/GaAs MODFET type heterostructures and its applications // Solid-State Electronics Vol. 34, No 2, pp 117 – 121, 1991
16. F. Bernardini, V. Fiorentini, D. Vanderbilt Offsets and polarization at strained AlN/GaN polar interfaces // arXiv:cond-mat/9612107v1 [cond-mat.mtr1-sci] 11 Dec 1996
17. O. Ambacher, B. Foutz, J. Smart et al. Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaN/GaN heterostructures // Journal of applied physics, vol. 87 No 1 (2000) pp. 334 — 344
18. John H. Davies, Ivan A. Larkin and E. V. Sukhorukov Modeling the patterned two-dimensional electron gas: Electrostatics // J. Appl. Phys. 77 (9), 1 (1995) pp. 4504 — 4512. https://doi.org/10.1063/1.359446
19. Stephan Baer, Klaus Ensslin Transport Spectroscopy of Confined Fractional Quantum Hall Systems. Springer Series in Solid-State Sciences ISBN 978-3-319-21050-6. DOI 10.1007/978-3-319-21051-3
20. Технология СБИС: В 2-х кн. Кн.2. Пер. с англ. / под ред. С. Зи. - М. Мир, 1986 — 453 с
21. Ghandhi S.K. VLSI Fabrication Principles. Second Edition. Wiley. 1994. 837 p.
22. Oktay Göktas, Jochen Weber, Jürgen Weis, Klaus von Klitzing. Alloyed ohmic contacts to two-dimensional electron system in AlGaAs/GaAs heterostructures down to submicron length scale // Physica E 40 (2008) 1579–1581

23. 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
24. 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
25. М.В. Степушкин Особенности изготовления омических контактов к гетероструктурам GaAs/AlGaAs // Сборник трудов XIV Всероссийской конференции молодых ученых (2019), Саратов, с. 333 — 334
26. Gregory C. DeSalvo, Christopher A. Bozada, John L. Ebel Wet Chemical Digital Etching of GaAs at Room Temperature // J. Electrochem. Soc., Vol. 143, No. 11 (1996) pp. 3652 — 3656
27. Степушкин М.В. Создание и исследование полупроводниковых наноструктур на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs с двумерным электронным газом с высокой подвижностью электронов // 69-е дни науки студентов МИСиС — типография Издательского Дома МИСиС, 2014. - С.55.
28. G.J. Dolan, Offset masks for lift-off photoprocessing, Appl. Phys. Lett. 31, 337-339 (1977).
29. Способ изготовления устройств с тонкопленочными сверхпроводниковыми переходами // Патент РФ №2442246, 10.02.2012 / Кузьмин Л.С., Тарасов М.А.
30. Ю.А. Гольдберг. Омический контакт металл-полупроводник AIIIBV: методы создания и свойства // Физика и техника полупроводников том 28 вып. 10 — Санкт-Петербург, Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН, 1994.
31. Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг Механизмы протекания тока в омических контактах металл–полупроводник // Физика и техника полупроводников, 2007, том 41, вып. 11, с. 1281 – 1308

32. V. Kažukauskas, J. Storasta, J.-V. Vaitkus Effect of indium doping on transient transport phenomena in semi-insulating GaAs // Physical Review B Vol.62, No16 (2000) pp. 882 — 890
33. В. Казлаускене, В. Кажукаускас, Ю. Мишкинис и др. Формирование омических контактов к полуизолирующему GaAs путем лазерного осаждения In // Физика и техника полупроводников, том 38, вып. 1 (2004) с. 79 — 83
34. Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг, О.В. Константинов и др. Механизм протекания тока в сплавном омическом контакте In–GaAs // Журнал технической физики, том 77, вып. 2 (2007) с. 140 — 142
35. D.W. Davies, D.V. Morgan, H. Thomas Indium-based ohmic contacts to n-GaAs, fabricated using an ion-assisted deposition technique // Semicond. Sci. Technol. 14 (1999) 615–620
36. Masanori Murakami, W. H. Price, Yih-Cheng Shih et al. Thermally stable ohmic contact to n-type GaAs. I. MoGeW contact metal // J. Appl. Phys. 62 (8),15 (1987) pp. 3288 — 3294
37. Masanori Murakami, W. H. Price, Yih-Cheng Shih et al. Thermany stable ohmic contacts to n-type GaAs: II. MoGeinW contact metal // J. Appl. Phys. 62 (8), 15 (1987) pp. 3295 — 3303
38. Masanori Murakami, Yih-Cheng Shih, W. H. Price et al. Thermally stable ohmic contacts to n-type GaAs. III. GeInW and NiInW contact metals // J. Appl. Phys. 64 (4), 15 (1988) pp. 1974 — 1982
39. Yih-Cheng Shih, Masanori Murakami, W. H. Price Thermally stable ohmic contacts to n-type GaAs. IV. Role of Ni on NiInW contacts // J. Appl. Phys. 65 (9), 1 (1989) pp. 3539 — 3545
40. Masanori Murakami, W. H. Price, J. H. Greiner et al. Thermally stable ohmic contacts to n-type GaAs. V. Metal-semiconductor field-effect transistors with NiInW ohmic contacts // J. Appl. Phys. 65 (9),1 (1989) pp. 3546 — 3551
41. H.J. Buhlmann, M. Ilegems Characterization of AuGe/Ni/Au Contacts on GaAs/AlGaAs Heterostructures for Low-Temperature Applications // J. Electrochem. Soc., vol. 138 No 9 (1991) pp. 2795 — 2798

42. G.Sai Saravanan, K. Makadeva Bhat, K. Muraleedharan, et al. Ohmic contacts to pseudomorphic HEMTs with low contact resistance due to enhanced Ge penetration through AlGaAs layers // Semicond. Sci. Technol. 23 (2008) 025019 (6pp)
43. T.S. Abhilash, Ch. Ravi Kumar, G. Rajaram Influence of Nickel layer thickness on the magnetic properties and contact resistance of AuGe/Ni/Au Ohmic contacts to GaAs/AlGaAs heterostructures // J. Phys. D: Appl. Phys. 42 (2009) 125104 (8pp)
44. T.S. Abhilash, Ch. Ravi Kumar, G. Rajaram Magnetic, electrical and surface morphological characterization of AuGe/Ni/Au Ohmic contact metallization on GaAs/AlGaAs multilayer structures // J. Nano- Electron. Phys. 3 (2011) No1, P. 396-403
45. Contacts to Semiconductors: Fundamentals and Technology (Materials Science and Process Technology). Ed. by L.J. Brillson. Noyes Publication.1993. 680 p.
46. N. Braslau, J.B. Gunn, J.L. Staples. Metal-semiconductor contacts for GaAs bulk effect devices // Solid-State Electronics Volume 10, Issue 5, May 1967, Pages 381-383
47. A.G. Baca, F. Ren, J.C. Zolper et al. A survey of ohmic contacts to III-V compound semiconductors // Thin Solid Films 308–309 (1997) p.599–606
48. E. J. Koop, M. J. Iqbal, F. Limbach. The annealing mechanism of AuGe/Ni/Au ohmic contacts to a two-dimensional electron gas in GaAs/$Al_xGa_{1-x}As$ heterostructures // Semicond. Sci. Technol. 28 (2013) 025006
49. M. J. Iqbal, D. Reuter, A. D. Wieck, and C. H. van der Wal Robust recipe for low-resistance ohmic contacts to a two-dimensional electron gas in a GaAs/AlGaAs heterostructure // arXiv:1407,4781v1 [cond-mat.mes-hall] 17 Jul 2014
50. L.C. Wang, P.H. Hao, J.Y. Cheng, F. Deng, S.S. Lau. Ohmic contact formation mechanism of the Au/Ge/Pd/n -GaAs system formed below 200 °C // J. Appl. Phys. 79 (8), 4211 (1996)

51. L.C. Wang, S.S. Lau, E. K. Hsieh, J. R Velebir. Low-resistance nonspiking ohmic contact for AlGaAs/GaAs high electron mobility transistors using the Ge/Pd scheme // Appl. Phys. Lett. 54 (26), 2677-2679 (1989)
52. S. V. Morozov, Yu. V. Dubrovskii, V. N. Abrosimova, J. Würfl. Electrical properties of PdGe ohmic contacts to GaAs/$Al_xGa_{1-x}As$ heterostructures at liquid helium temperature // Appl. Phys. Lett. 72(22), 2882-2884 (1998)
53. 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.
54. M. Pepper, C.G. Smith, R.J. Brown, D.A.Wharam, M.J. Kelly, R. Newbury, H. Ahmed, D.G. Hasko, D.C. Peacock, J.E.F. Frost, D.A. Ritchie, G.A.C. Jones. One-dimensional ballistic transport of electrons. Semicond. Sci. Technol., 5, 1185 (1990).
55. J. Nieder, A.D. Wieck, P. Grambow, H. Lage, D. Heitman, K. v. Klitzing, K. Ploog. One-dimensional lateral-field-effect transistor with trench gate-channel insulation. Appl. Phys. Lett., **57** (25), 2695 (1990).
56. В.И. Борисов, В.Г. Лапин, А.Г. Темирязев, А.И. Торопов, А.И. Чмиль. Особенности квантования кондактанса одномерных каналов, полученных методом травления. Радиотехника и электроника, 54 (4), 457 (2009).
57. A.M. Song et al. Unidirectional electron flow in a nanometer-scale semiconductor channel: A self-switching device // Appl. Phys. Lett. Vol. 83 No 9 (2003) pp.1881 — 1883
58. A.D. Wieck, K. Ploog In-plane-gated quantum wire transistor fabricated with directly written focused ion beams. Appl. Phys. Lett., 56 (10), 928 (1990)
59. A.A. Tseng (ed.), Tip-Based Nanofabrication, Springer Science+Business Media, LLC 2011
60. 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

61. 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
62. R. Held et al. In-plane gates and nanostructures fabricated by direct oxidation of semiconductor heterostructures with an atomic force microscope // Appl. Phys. Lett. Vol 73 No 2 (1998) pp. 262 — 264
63. A. Fuhrer et al. Transport properties of quantum dots with steep walls // Phys. Rev. B vol 63, 125309 (2001)
64. Matsumoto K. Application of scanning tunneling/atomic force microscope nanooxidation process to room temperature operated single electron transistor and other devices. Scanning Microscopy, 12 (1), 61 (1998).
65. В.И. Борисов, В.Г. Лапин, В.Е. Сизов, А.Г. Темирязев. Транзисторные структуры с управляемым потенциальным рельефом одномерного квантового канала. Письма в Журнал технической физики, 37(3), 85 (2011).
66. М.Ю. Мельников, В.С. Храпай, D. Schuh Создание наноструктур в гетеропереходе с глубоким залеганием двумерного электронного газа методом высоковольтной анодно-окислительной литографии с использованием атомно-силового микроскопа // Приборы и техника эксперимента, 4 (2008), с.137 — 144
67. 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

68. 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
69. A.G. Temiryazev Pulse force nanolithography on hard surfaces using atomic force microscopy with a sharp single-crystal diamond tip // Diamond & Related Materials 48 (2014) 60–64
70. М.П. Темирязева, Ю.А. Данилов, А.В. Здоровейщев, А.В. Кудрин, А.Г. Темирязев Структурирование магнитных пленок CoPt с помощью АСМ // Нанофизика и наноэлектроника. Материалы XX Международного симпозиума (Нижний Новгород, 14–18 марта 2016 г.) Том 1 с. 328 — 329
71. В.В. Батавин Контроль параметров полупроводниковых материалов и эпитаксиальных слоев — Изд. «Советское радио», 1976
72. Физика полупроводников и металлов: учебник для вузов. 2-е изд. Горбачев В.В., Спицына Л.Г. М.: Металлургия, 1982, 336 с
73. G.K. Reeves, H.B. Harrison. Obtaining the specific contact resistance from transmission line measurements // IEEE Electron. Device. Letters, vol. EDL-3, NO. 5, 111 (1982)
74. M. Heiblum, M.I. Nathan, C.A. Chang. Characteristics of AuGeNi ohmic contacts to GaAs // Solid-St. Electron. 25, 185 (1982)
75. http://cxem.net/comp/comp211.php
76. Chen T.-M., Pepper M., Farrer I., et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. V.109. P. 177202
77. K.-F. Berggern, M. Pepper Electrons in one dimension Phil. Trans. R. Soc. A (2010) 368, 1141–1162
78. N. Yokoyama, H. Onodera, T. Ohnishi, A. Shibatomi Orientation effect of self-aligned source/drain planar GaAs Schottky barrier field-effect transistors // Appl. Phys. Lett. 42 (3), 1983
79. R. A. Sadler, L. F. Eastman Orientation effect reduction through capless annealing of self-aligned planar GaAs Schottky barrier field-effect transistors // Appl. Phys. Lett. 43 (9) 1983

80. K. L. McLaughlin, M. S. Birrittella Preferential diffusion and orientation effects of Schottky barrier GaAs field-effect transistors // Appl. Phys. Lett. 44 (2), 1984
81. M. Kamada, T. Suzuki, F. Nakamura, Y. Mori, M. Arai Investigation of orientation effect on contact resistance in selectively doped AlGaAs/GaAs heterostructures // Applied Physics Letters 49, 1263 (1986).
82. A. Christou Solid phase formation in Au:Ge/Ni, Ag/In/Ge, In/Au:Ge GaAs ohmic contact systems // Solid State Electron. 22,141 (1979).
83. Oktay Göktas Small alloyed ohmic contacts to 2DES and submicron scale corbino devices in strong magnetic fields: Observation of a zero bias anomaly and single electron charging // http://dx.doi.org/10.18419/opus-6695 (2009)
84. Shun-Qing Shen Topological Insulators. Dirac Equation in Condensed Matters — Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2012), DOI 10.1007/978-3-642-32858-9
85. Dirk Backes et al., Observation of geometry-dependent conductivity in two-dimensional electron gases // arXiv:1505.03444v1 [cond-mat.mes-hall] 13 May 2015
86. Peter M. Asbeck, Chien-Ping Lee, Mau-Chung F. Chang Piezoelectric Effects in GaAs FET’s and Their Role in Orientation-Dependent Device Characteristics // IEEE Transactions on electron devices, vol. ED-31, NO. 10 (1984) 1377-1380
87. Shin-Shien Lo, Chien-Ping Lee Two-Dimensional Simulation of Orientation Effects in Self-Aligned GaAs MESFET’s // IEEE Trans. on Electron Devices. vol.ED-37. NO.10, (1990).
88. Blanchard et al. Hydrogen-Induced Piezoelectric Effects in InP HEMT’s // IEEE Electron Device Letters, vol. 20, NO. 8, (1999) 393 — 395
89. S. D. Mertens, J. A. del Alamo A Model for Hydrogen-Induced Piezoelectric Effect in InP HEMTs and GaAs PHEMTs // IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 49, NO. 11 (2002) 1849 — 1855

90. H. Booyens, J. S. Vermaak, G. R. Proto Dislocations and the piezoelectric effect in III-V crystals // Journal of Applied Physics. Vol. 48. No.7. July 1977
91. J.H. Davies Quantum dots induced by strain from buried surface stressors // Applied Physics letters vol.75 No 26 (1991) pp. 4142 — 4144
92. J.H. Davies Elastic and piezoelectric fields around a buried quantum dot: A simple picture // Journal of applied physics vol.84 No 3 (1998) pp.1358 — 1365
93. I.A. Larkin, J.H. Davies, A.R. Long, R. Cuscó Theory of potential modulation in lateral surface superlattices. II. Piezoelectric effect // Physical Review B vol.56 No 23 (1997) 15242 – 15251
94. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М, Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. - М.; Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.
95. М.В. Степушкин, С.П. Курочка Аномальная зависимость сопротивления HEMT-подобной структуры от расстояния между контактами // Сборник трудов XIII Всероссийской конференции молодых ученых (2018), Саратов, с. 304 — 305
96. М.В. Степушкин Влияние пьезоэффекта на проводимость низкоразмерной структуры // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019»
97. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. – М.:Наука, 1975
98. Переломова Н.В., Тагиева М.М. Задачник по кристаллофизике. – М.:Наука, 1982

Приложение А — скрипт, используемый для анализа характеристик затворов

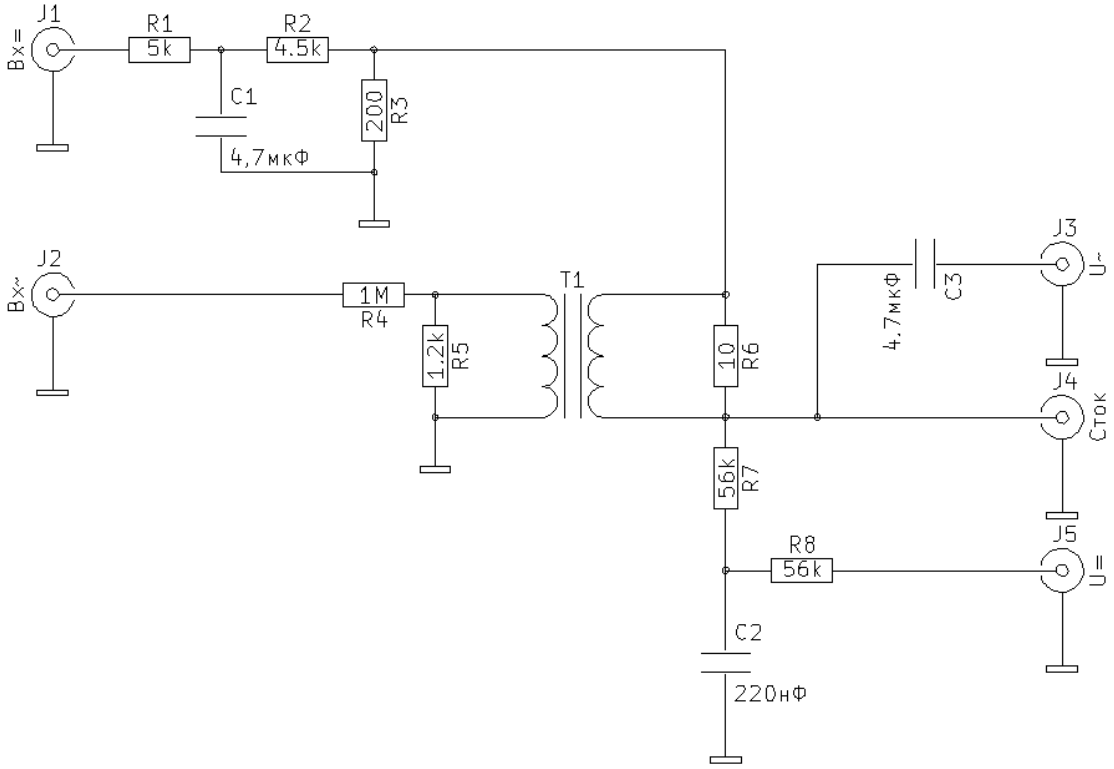
Для анализа характеристик затворов был написан следующий скрипт, вызывающий утилиту approx для каждого файла:

```
#!/bin/bash
if ! [[ -d out ]] ; then
  mkdir out
fi
if [[ -e $1 ]] ; then
  cat $1 | feedgnuplot --domain --lines --points --exit
  echo "Input minimum and maximum voltage"
  read Umin Umax
  if [[ -z $Umin || -z $Umax ]] ; then
    Rflag=""
  else
    Rflag="-R "$Umin","$Umax
  fi
  ~/approx -i $1 -e -m 1 -X 1 -Y 0 -S 3 $Rflag -o out/$1.out
else
  echo "File ["$1"] not found"
fi
```

Данный скрипт считывает все файлы в текущем каталоге и при помощи системной утилиты feedgnuplot выводит их в виде графиков. Далее пользователь может вручную задать линейную область для расчета сопротивления. Особенностью используемых наборов данных являлось одновременное определение пробивных характеристик. Представление данных в виде графика позволяет как визуально оценить линейность графика, так и задать минимальное и максимальное напряжения, для чего служит флаг `-R` U_{MIN} U_{MAX}, где U_{MIN} и U_{MAX} — граничные напряжения, и значения, выходящие за их пределы, игнорируются. Флаг `-S 3` используется чтобы указать программе игнорировать первые три строки входного файла. Сделано это потому что в них содержится комментарий о структуре, исследуемом зазоре и прочая информация. Остальные флаги описаны в справке, вызываемой командой

```
./approx -h
```

Приложение Б — Электрическая схема блока понижающего трансформатора



Опорный синусоидальный сигнал подается на BNC-коннектор «Вх~», где резистивный делитель R4R5 и трансформатор T1 обеспечивают частичную гальваническую развязку и снижение амплитуды в 31133 раза (предпочтение было отдано цифровой коррекции коэффициента вместо подбора резисторов). При необходимости использования постоянного смещения используется разъем «Вх=», напряжение с которого через RC-фильтр и резистивный делитель складываются с переменным сигналом на вторичной обмотке трансформатора. Если же необходимости в это нет, верхний по схеме вывод вторичной обмотки оказывается соединен с землей (корпусом прибора) через сопротивление R3. С нижнего по схеме вывода вторичной обмотки трансформатора сигнал подается на сток исследуемой структуры. Разъемы «U=» и «U~» используются для измерения постоянной и переменной составляющих напряжения на стоке. Фильтры R7R8C2 и C3 снижают соответственно переменную и постоянную составляющие.