МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра физики полупроводников

Егоров Дмитрий Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Особенности магнетосопротивления полупроводниковых микроструктур, обусловленные эффектом магнитной фокусировки**

3 курс, группа №20344

**Научный руководитель**: к.ф.-м.н. Д.А. Похабов

Оценка научного руководителя

« » мая 2023 г.

Новосибирск 2023

**Аннотация**

**Оглавление**

1. **Введение**

Работа посвящена изучению магнитной фокусировки в режиме баллистического транспорта в микроструктурах с двумерным электронным газом. В изучаемых образцах можно наблюдать наличие пиков в магнетосопротивлении и их температурную зависимость. На эту зависимость сильное влияние оказывает электрон-электронное взаимодействие. Особенный интерес представляют подвешенные структуры, то есть отделенные от подложки, так как в таких структурах усиливается электрон-электронное взаимодействие. О силе этого взаимодействия можно судить по длине e-e рассеяния , которое можно извлечь из измерений магнетосопротивления [].

Целью данной работы являлось наблюдение фокусировочного пика в магнетосопротивлении и изучение температурной зависимости его высоты как в неподвешенных, так и в подвешенных образцах. Для достижения цели работы, были поставлены следующие задачи:

1. Познакомиться с техникой низкотемпературного эксперимента
2. Освоить методику измерения малых сигналов
3. Познакомиться со строением гетероструктур
4. Изучить методы создания микроструктур в двумерном электронном газе
5. Создать собственный дизайн микроструктур
6. Составить технологический маршрут создания микроструктур
7. Изготовить образцы
8. Провести серии измерений магнетосопротивления при различных температурах
9. Проанализировать полученные экспериментальные данные
10. **Теоретическая часть**
    1. **Двумерный электронный газ**

Двумерным электронным газом (ДЭГ) называется область пространства, в которой электроны движутся свободно только в двух направлениях, в третьем направлении движение электронов ограничивается потенциальным барьером. Обычно ДЭГ формируется на основе полупроводниковых гетероструктур, в том числе в квантовых ямах. Особенностью двумерного электронного газа является высокая подвижность электронов, а также многообразие квантовых эффектов, которые в нем можно наблюдать. В данной работе исследовался ДЭГ, полученный на основе квантовой ямы.

* 1. **Баллистический транспорт**

В двумерном электронном газе существуют различные режимы транспорта: диффузионный, квази-баллистический, баллистический. В данной работе изучается баллистический электронный транспорт. Он характеризуется тем, что характерные длина и ширина образца много меньше длины свободного пробега электронов . В этом режиме рассеяние электронов на примесях мало по сравнению с рассеянием на стенках структуры.

При помещении ДЭГ в поперечное магнитное поле, электроны начинают двигаться по круговым орбитам. Так как рассеяние на примесях в баллистическом режиме мало, то в нем можно проводить измерения, связанные с магнитной фокусировкой.

Рассмотрим, как циклотронные диаметры траекторий электронов в двумерном электронном газе зависят от величины магнитного поля . Уравнение движения электронов в магнитном поле:

где – ферми-импульс электронов. Определим его выражение для концентрации электронов в ДЭГ:

Это выражение получается из того, что концентрация электронов в единице объема двумерной системы равна отношению допустимого объема пространства импульсов к элементарному объему фазового пространства с учетом спинового вырождения. Таким образом диаметры траекторий выражаются через концентрацию

1. **Образцы**

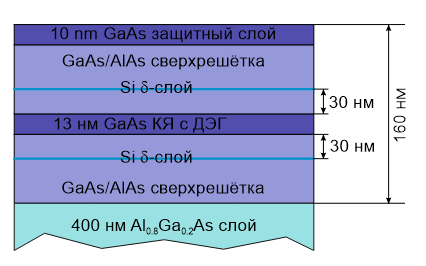
Изготовление образцов производилось выращиванием гетероструктур с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. Схема гетероструктуры представлена на рисунке. Для создания ДЭГ с высокой подвижностью и концентрацией электронов с обоих сторон от квантовой ямы располагались чередующиеся AlGaAs/GaAs слои с кремния.

Рисунок 1. Гетероструктура с квантовой ямой

Для изучения магнитной фокусировки необходимо сформировать в ДЭГ микроструктуры. Были разработаны несколько типов геометрий для последующего формирования их в гетероструктуре.

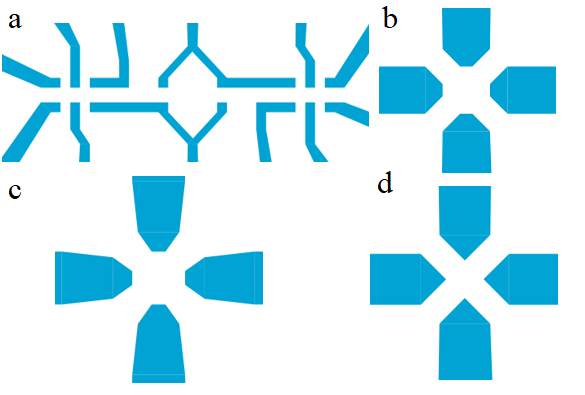


Рисунок 2. Геометрии гетероструктур: a - геометрия в виде холловских мостиков, b, c, d - геометрии в виде различных перекрестков.

Для создания геометрии в ДЭГ использовался метод фотолитографии. Одна структура с двумерным электронным газом разбивалась на 28 квадратных образцов со стороной 2,5 мм. (4 по горизонтали и 7 по вертикали). В процессе фотолитографии с образцами проводились следующие процедуры: фотолитография по фоторезисту, напыление омических контактов, их вжигание до ДЭГ, а также травление.

Использованный метод фотолитографии позволяет задавать геометрию образца с разрешением 1 мкм.

Ко внешним, наиболее широким проводящим частям образца припаивались металлические контакты, в дальнейшем используемые для измерений.

1. **Методика измерений**

Для исследования магнетосопротивления в двумерном электронном газе необходимы низкие температуры. Тепловое движение электронов полностью размывает необходимые эффекты при приближении к 80 K.

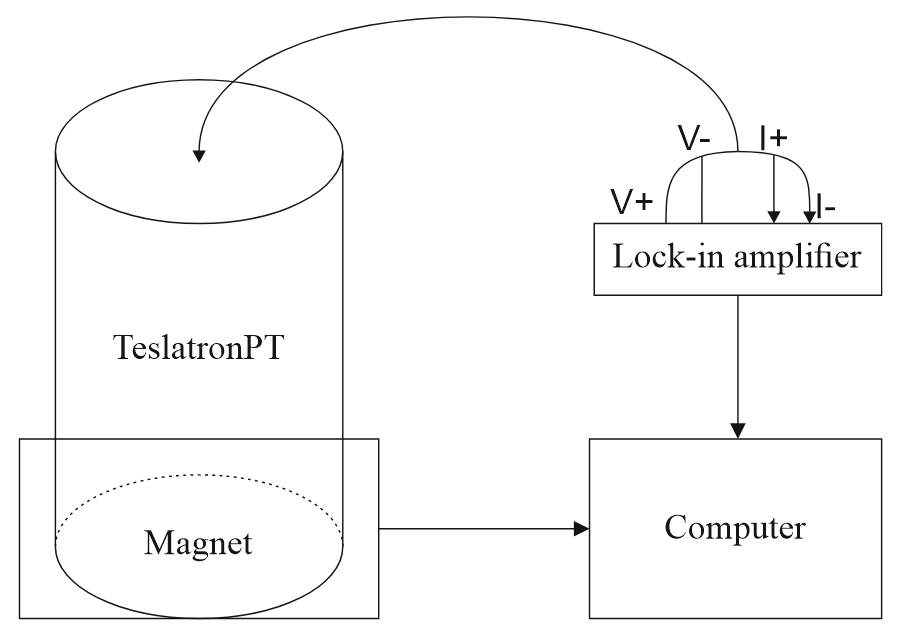
В работе использовался криостат TeslatronPT со встроенным магнитом. Принцип работы криостата основывается на откачке паров гелия. В ходе эксперимента серии данных были записаны при различных температурах от 1,6 до 80 К. Встроенный постоянный магнит позволял устанавливать магнитное поле до 12 Т.

Рисунок 3. Схема установки

Так как в виде отклик тока регистрируется на частоте прикладываемого напряжения, то для детектирования сигнала использовался метод синхронного детектирования. К образцу прикладывалось напряжение 1 В через резистор 1 МОм, и так как характерное напряжение между контактами во время измерений составляло 1 кОм, то между контактами напряжение составляло порядка 1 мВ. Во время измерений также контролировалась фаза принимаемого сигнала, а также линейность зависимости получаемого тока от прикладываемого напряжения.

Образец погружался в низкотемпературную камеру с проводами, протянутыми от него через трубку к синхронному детектору. В течении длительного времени в камере устанавливалась температура 1,6 К. Проверка корректности работы всех контактов производилась двухточечным измерением сопротивления каждой пары контактов. При таком измерении наличие большого сопротивления (относительно других пар контактов) или большой фазы получаемого сигнала указывает на неисправность контакта.

Измерения проводились по четырем точкам: на два контакта подавалось переменное напряжение и с двух контактов снимался ток. Магнитное поле медленно менялось, а получаемый сигнал усреднялся по времени синхронным детектором для уменьшения погрешности. После записи каждой кривой, температура в камере изменялась и измерения производились вновь.

1. **Эксперимент**

Для определения концентрации и подвижности электронов в ДЭГ использовался метод ван дер Пау. Четырехзондовое измерение сопротивления позволяет избавиться от сопротивления контактов. Суть метода состоит в том, что образец любой формы может быть с помощью комфорных отображений переведен в полуплоскость. Такие отображения сохраняют углы между кривыми и пропорции малых фигур. Из этого можно получить, что сопротивления, измеренные четырехзондовым способом также сохраняются при комфорных отображениях. Таким образом, работает формула полученная для контактов, расположенных на границе полуплоскости:

где сопротивление между контактами и , при пропускании тока через контакты и , – двумерная проводимость.

Полученные значения подвижности и концентрации проводимости составили и . Вычислим длину свободного пробега по этим значениям проводимости и концентрации. Время релаксации по импульсам вычислим из формулы для подвижности:

где - эффективная масса. Длина свободного пробега:

Подставив значения концентрации и проводимости, получаем .