

На правах рукописи

Васильева Галина Юрьевна

**Особенности магнетосопротивления и терагерцовой
фотопроводимости в графене**

Специальность 01.04.10 – «Физика полупроводников»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук и федеральном государственном автономном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

Ива́нов Юрий Леонидович
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Официальные оппоненты:

Лебедев Виктор Михайлович
доктор технических наук
старший научный сотрудник ФГБУ "ПИЯФ им. Б.П. Константинова".

Алексеев Николай Игоревич
доктор физико-математических наук,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (кафедра физики)

Защита состоится « 15 » октября 2015 г. в _____ часов _____ минут на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2015г.

Ученый секретарь Диссертационного совета, д.ф.-м.н.

Л.М. Сорокин

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы.

Графен – аллотропная модификация углерода, представляет собой одноатомный слой графита. Первая экспериментальная работа, вызвавшая колоссальный интерес к этому материалу, была опубликована в 2004 году [1]. Она инициировала огромное количество как экспериментальных, так и теоретических исследований, обнаруживших уникальные свойства графена. Важность этих исследований была быстро оценена научным сообществом, и уже в 2010 году двое соавторов пионерской работы были удостоены Нобелевской премии. О значимости этого материала свидетельствует и то, что теперь ни одна крупная международная конференция по физике низкоразмерных структур не обходится без докладов о графене. Причина такого интереса связана с тем, что в графене можно изучать эффекты, которые невозможно наблюдать в обычных полупроводниковых системах. Например, квантовый эффект холла наблюдается в графене даже при комнатной температуре. Важным является тот факт, что носители заряда в графене подчиняются линейному закону дисперсии и являются дираковскими безмассовыми фермионами. Кроме того, графен, как углеродный материал, рассматривается в качестве базового элемента для развития коммерческой электроники и предсказывается появление различных приборов на его основе в ближайшем будущем.

Несмотря на большое количество работ в этой области, многие эффекты остаются непонятыми и требуют дальнейшего изучения. В частности, до конца не развита теория магнетосопротивления в графене, отсутствует понимание асимметрии свойств электронов и дырок, проявляющейся в магнетотранспорте, практически отсутствуют публикации по терагерцовой фотопроводимости в графене. Исследования, проведенные в рамках данной диссертационной работы, привели к обнаружению новых особенностей магнетосопротивления монослойного и двухслойного графена, а исследования терагерцовой фотопроводимости в графене могут быть полезными для разработки новых оптоэлектронных приборов на основе графена.

Задачи работы:

1. Изготовить образцы графена, в которых можно регулировать концентрацию носителей заряда меняя напряжение на затворе.
2. Исследовать магнетосопротивление однослойного и двухслойного графена в широком интервале температур и концентраций носителей.
3. Исследовать магнетосопротивление монослойного графена с разными типами рассеивающего потенциала.
4. Изучить влияние размерных и краевых эффектов на магнетосопротивление графена.
5. Изучить терагерцовую фотопроводимость в графене.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. В монослойном графене экспериментально обнаружено, что сопротивление может зависеть корневым образом от магнитного поля в слабых магнитных полях. Подобный тип магнетосопротивления в слабых магнитных полях ранее не наблюдался. Экспериментально установлено, что такое магнетосопротивление связано с рассеянием на короткодействующем потенциале.

2. Впервые получены результаты, демонстрирующие проявление нетривиальной спектральной зависимости (типа «Мексиканской шляпы») в двухслойном графене в транспортных измерениях.

3. Обнаружено положительное магнетосопротивление в двухслойном графене при высокой концентрации дырок, не чувствительное к размерам и степени легирования образцов. Такое магнетосопротивление не меняется при повышении концентрации и изменении температуры. В этом смысле оно является универсальным.

4. Получен сильный сигнал терагерцовой фотопроводимости в образцах графена в форме меандра изготовленных методом сублимации SiC. Показано, что механизм фотопроводимости обусловлен болометрическим эффектом.

5. Обнаружено, что в p-n переходе в графене имеет место усиление болометрической фотопроводимости. Предположительно такое усиление связано с резонансом на частоте плазмонов.

Научная и практическая значимость работы.

Исследования в монослойных образцах графена вблизи точки электронейтральности показали, что характер зависимости сопротивления от магнитного поля определяется типом рассеивающего потенциала, в частности, в образцах графена с короткодействующим потенциалом, сопротивление растет как квадратный корень с увеличением магнитного поля.

Анализ положительного магнетосопротивления, связанного с двухканальной проводимостью в двухслойном графене, позволил определить эффективные массы, концентрации и времена релаксации носителей в каждом канале.

Результаты исследования линейного магнетосопротивления в точке электронейтральности в двухслойном графене могут быть использованы для создания датчиков магнитного поля.

Результаты экспериментального исследования магнетосопротивления в узких образцах двухслойного графена в точке электронейтральности и ее окрестностях, подтвердили теоретические представления о магнетосопротивлении систем с двумя типами носителей. Из анализа экспериментальных данных магнетосопротивления были найдены длина электронно-дырочной рекомбинации и подвижность в зависимости от концентрации носителей заряда.

На образцах графена, выполненных в форме меандра, получен сильный сигнал терагерцовой фотопроводимости, обусловленный болометрическим эффектом. Эти

результаты указывают на возможность создания новых компактных детекторов в терагерцовом диапазоне спектра.

Методы исследования

Образцы графена на подложке Si/SiO₂ исследовались транспортными методами в магнитных полях до 13 Тл и температурах от 1.5 до 200 К, с применением синхронных усилителей для улучшения отношения сигнал/шум. Сигнал терагерцовой фотопроводимости исследовался в образцах графена, полученных методом высокотемпературной сублимации, с использованием лазера терагерцового диапазона на аммиаке с оптической накачкой CO₂ лазером (длина волны 280, 148 и 90 мкм).

Положения, выносимые на защиту:

1. Искривление дна зоны проводимости (типа «мексиканская шляпа») двухслойного графена проявляется в транспортных измерениях в виде положительного магнетосопротивления, которое описывается формулой Друде для двух типов носителей.
2. Магнетосопротивление монослойного графена с короткодействующими рассеивателями пропорционально квадратному корню из магнитного поля в широкой области классически слабых магнитных полей.
3. В двухслойном графене с одинаковыми концентрациями электронов и дырок, магнетосопротивление является линейным в классически сильных магнитных полях, в определенном интервале ширин образца.
4. В монослойном графене с сильным междолинным рассеянием под действием терагерцового излучения возникает фотопроводимость, обусловленная болометрическим эффектом.

Личный вклад автора заключается в проведении экспериментов и обработке полученных данных. Образцы графена на подложке Si/SiO₂ были изготовлены автором при поддержке группы профессора Рольфа Хауга (Ляйбницкий Университет города Ганновера, Институт Твердотельной Физики, группа Наноструктур). Анализ экспериментальных данных (объяснение результатов и сравнение экспериментальных данных с имеющимися теоретическими представлениями) был проведен в сотрудничестве с теоретиками ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, гарантируется комплексным использованием различных современных экспериментальных методов и воспроизводимостью результатов. Результаты работы хорошо согласуются с современными теоретическими представлениями. Основные положения работы обсуждались на ряде семинаров, и докладывались на международных и всероссийских конференциях. В том числе: на конкурсе работ ФТИ (Санкт-Петербург,

2014 г.), на семинаре лаборатории физики полупроводниковых приборов (Санкт-Петербург, 2013 г.), на 18-ой международной зимней школе по твердотельной физике (Австрия, Маутендорф, 2014 г.), на XI Российской конференции по физике полупроводников как приглашенный доклад (Санкт-Петербург, 2013 г.), на 20-ой и 21-ой международных конференциях по физике электронных свойств двумерных систем (EP2DS.20/MSS.16, EP2DS.21/MSS.17) (Польша, Вроцлав, 2013 г, Япония, Сендай, 2015г), на весенней сессии 2014 Германского физического общества в Дрездене (DPG Spring Meeting 2014 Dresden) (Германия, Дрезден, 2014г.), на 21-ом, 22-ом и 23-ем международных симпозиумах «Наноструктуры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 2013, 2014, 2015гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 8 печатных работ, в том числе 2– в научных журналах и 6 – в материалах конференций.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 147 наименований, содержит 147 страниц, в том числе 59 рисунков и 1 таблицу.

Содержание работы.

Во **Введении** сформулированы цель и задачи проводимого исследования. Обоснованы актуальность темы диссертации и научная новизна полученных результатов, их практическая и теоретическая значимость. Приведены список публикаций по работе и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой обзор литературы по теме диссертации. В этой главе описываются кристаллическая решетка и зонная структура, а также основные свойства монослойного и двухслойного графена. Рассмотрены результаты наиболее значимых экспериментальных и теоретических исследований транспорта в графене. Описан амбиполярный эффект электрического поля и показано, как он может использоваться для характеристики образцов. Рассмотрены особенности квантового эффекта Холла и осцилляций Шубникова-де Гааза в графене. Анализируются результаты основных имеющихся на данный момент исследований в терагерцовой области спектра.

Вторая глава посвящена методам получения графена и описанию экспериментальной установки.

Подробно изложен процесс изготовления образцов графена методом микро-механического отшелушивания графита. Он включает в себя: процесс подготовки подложки Si/SiO₂ (очистка и травление в плазме), получение графена и перенос его на подложку, способ определения содержащегося в графене количества слоев, процесс структурирования графена в виде мостиков Холла и изготовление контактов методом

литографии с применением сканирующего электронного микроскопа, последующее соединение контактных площадок на подложке с контактными площадками держателя методом микросварки. Рассмотрены применявшиеся способы очистки графена, такие как отжиг и очистка в атомно-силовом микроскопе, и их особенности.

Подробно описана методика измерения и все основные компоненты установки, как для магнетотранспортных, так и для терагерцовых исследований. В магнетотранспортных измерениях через образец пропускался переменный ток частотой 17,7 Гц, а падение напряжения на контактах измерялось с помощью синхронных усилителей. В терагерцовых измерениях на образец подавалось постоянное напряжение смещения, а амплитуда сигнала определялась с помощью осциллографа.

В **Третьей главе** представлены результаты исследований двухслойного графена на подложке Si/SiO₂ при разных температурах и затворных напряжениях. Особое внимание в этих измерениях было уделено случаю, когда уровень Ферми находится вблизи дна зоны проводимости. В отсутствие электрического поля двухслойный графен имеет параболический закон дисперсии с нулевой запрещенной зоной. При приложении к слою перпендикулярного электрического поля открывается щель между дном зоны проводимости и потолком валентной зоны, при этом зоны в окрестности экстремумов деформируются, принимая форму «Мексиканской шляпы». Это было впервые предсказано в теоретической работе [2]. Такая зонная структура наблюдалась экспериментально только при исследовании образцов графена методом APRES [4]. В транспортных измерениях проявление «мексиканской шляпы» не наблюдалось. Для её изучения нужно чтобы уровень Ферми находился внутри «мексиканской шляпы». Эта ситуация реализуется в сильно легированных образцах. Если образец чистый и точка электронейтральности (ТЭН) находится вблизи нуля смещения, то щель между зонами отсутствует, и деформация экстремумов зон не возникает (рис 1а). Если теперь увеличить напряжение на затворе, то щель начнет открываться, и уровень Ферми будет подниматься. Однако он поднимается быстрее, чем сдвигаются края щели, поэтому ни

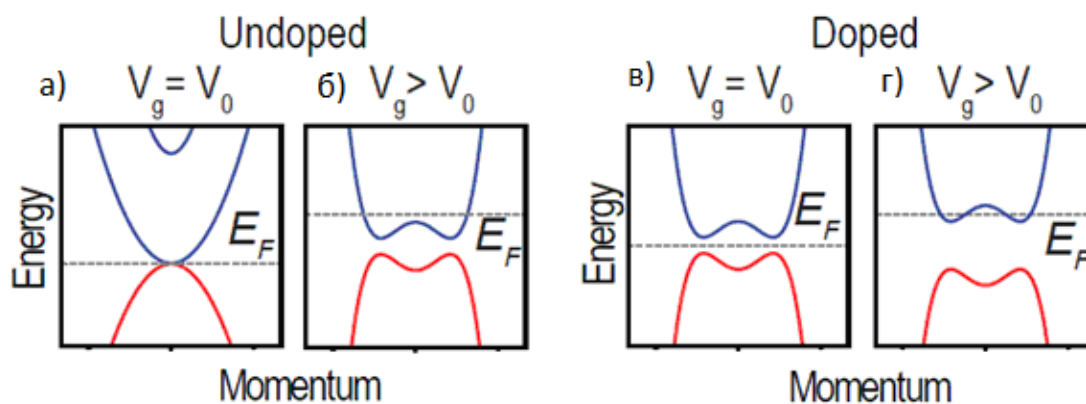


Рис.1 Схематическое изображение зонной структуры двухслойного графена: а), б) чистого образца без приложения и во внешнем электрическом поле, соответственно, и в), г) сильнолегированного образца в точке электронейтральности и вдали от нее, в этом случае дно зоны сильно изгибается.

при каких напряжениях на затворе уровень Ферми не сможет пересечь «мексиканскую шляпу» (рис. 1б). В сильнолегированном образце, чтобы поместить уровень Ферми в точку электронейтральности, на затвор необходимо подать значительное напряжение, что приводит к искривлению дна зон (рис. 1в). В этом случае, при увеличении напряжения на затворе уровень Ферми неизбежно окажется внутри области изгиба дна зоны (рис. 1г). При этом поверхность Ферми будет иметь форму кольца, на внешнем и внутреннем радиусе которого будут находиться носители заряда с разным знаком эффективной массы. За счет того, что имеются носители двух типов, должно наблюдаться положительное магнетосопротивление (МС). Этот эффект исследовался на двух образцах: чистом, ТЭН которого соответствовала $V_0 = -3\text{В}$, и сильно легированном, в котором $V_0 = +22\text{В}$. Образцы имели форму холловских мостиков. Магнитное поле было направлено перпендикулярно к поверхности графена и изменялось от 0 до 12 Тл, рабочий температурный диапазон составлял от 1.5 до 170 К.

Результаты измерений для сильнолегированного образца впервые показали проявление необычного закона дисперсии типа «Мексиканской шляпы» в магнетотранспорте.

Основные результаты были получены при концентрациях электронов $n \sim 1\text{--}2 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2}$. В чистом образце МС в этом случае отсутствует, а в сильнолегированном – оно положительное (рис. 2). Это существенное различие можно объяснить проявлением сложной формы экстремумов энергетических зон. Теоретические оценки показали, что интервал напряжений на затворе, в которой наблюдается положительное МС в сильнолегированном образце, совпадает с теми значениями напряжения, при которых уровень Ферми пересекает область деформации дна зоны проводимости (в чистом образце такое пересечение не происходит, как было рассмотрено выше). Наблюдаемое положительное МС описывается формулой Друде для двух типов носителей. Проведенные по этой формуле подгонки наших экспериментальных данных позволили

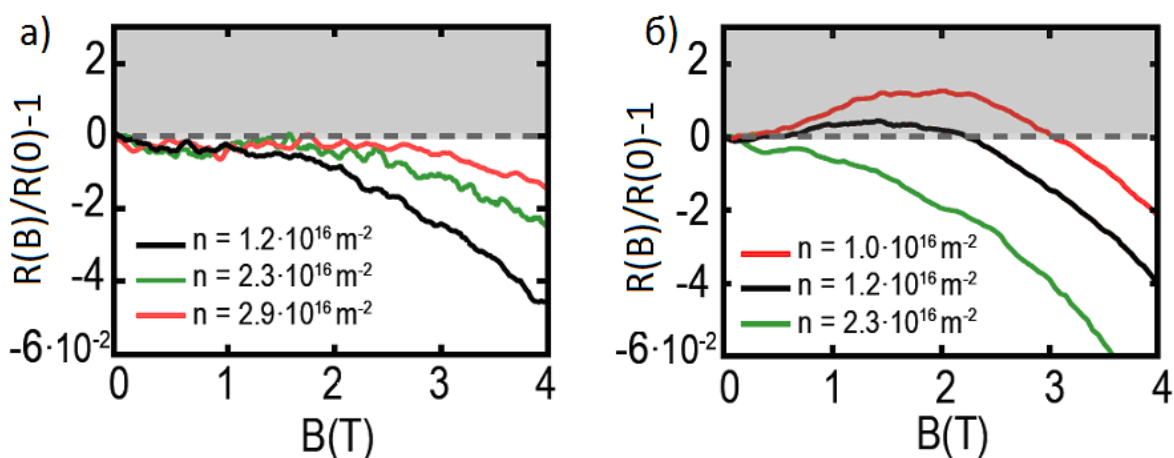


Рис.2. Экспериментальные данные зависимости нормированного сопротивления от магнитного поля, а) для чистого образца и б) для сильнолегированного, при концентрации электронов $n = 1.2, 2.3$ и $2.9 \cdot 10^{16}\text{ м}^{-2}$.

определить некоторые параметры системы. В частности, были получены зависимости концентраций носителей на внешнем радиусе кольца и носителей, расположенных на внутреннем радиусе от приложенного на затвор напряжения. Характер изменения концентрации носителей свидетельствует о наличии сложной зонной структуры типа «Мексиканской шляпы».

При высоких концентрациях носителей заряда ($n, p > 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$), в обоих исследуемых образцах магнетотранспорт демонстрировал одинаковое поведение. При высокой концентрации дырок наблюдалось универсальное положительное МС, слабо зависящее от температуры и не меняющееся от дальнейшего повышения концентрации. При этом размер образца и степень легирования не сказываются на форме зависимости сопротивления от магнитного поля. В литературе упоминание о таком МС не встречается. При высокой концентрации электронов наблюдалось отрицательное МС, которое не зависело от температуры, что исключает электрон-электронное взаимодействие в качестве причины возникновения отрицательного МС. Также можно исключить влияние беспорядка на МС, т.к. отрицательное МС наблюдалось как в «грязном», так и в «чистом» образце. Упоминания о таком МС в литературе также не встречается.

Четвертая глава посвящена результатам исследований магнетосопротивления монослойного графена с рассеянием на короткодействующем потенциале. Для измерений использовались два образца: длина одного составляла 50 мкм (образец 1), другого 15 мкм (образец 2). Для каждого из образцов был измерен полевой эффект, из которого были определены степень легирования, концентрация и подвижность носителей заряда. Точка электронейтральности для образца 1 соответствовала напряжению на затворе $V_0=5 \text{ В}$, а для образца 2 $V_0=22 \text{ В}$. Из зависимости проводимости от приложенного на затвор напряжения был определен тип рассеивающего потенциала [5]. Для образца 1 – короткодействующий, а для образца 2 – далекодействующий. Измерения проводились в магнитных полях в диапазоне от -7 до $+7 \text{ Тл}$, и температурах от 1.5 до 150 К . Для образца 1 зависимость сопротивления от магнитного поля, измеренная в точке электронейтральности, имеет линейный характер. При небольшом затворном напряжении ($-3 < V_0 < 1 \text{ В}$) магнетосопротивление становится пропорциональным квадратному корню в низких магнитных полях до 1.5 Тл . Для образца 2 линейная зависимость наблюдалась вплоть до $V_0=45 \text{ В}$, а для достижения корневой зависимости нужно было приложить еще 20 В , при этом она наблюдалась только при магнитных полях от 4 Тл .

Для случая монослойного графена с рассеянием на короткодействующем потенциале в низких магнитных полях, параллельно и независимо от экспериментов, была разработана теория магнетосопротивления [6]. Сравнение данных показало хорошее качественное согласие теории с экспериментом. В эксперименте, как и в теории, нормированное сопротивление вначале демонстрирует корневую зависимость от

магнитного поля. При магнитных полях выше 3 Тл зависимость становится опять корневой, это наблюдается до тех пор, пока не начинаются осцилляции Шубникова-де Гааза.

Пятая глава посвящена исследованию магнетотранспорта в двухкомпонентных системах с одинаковым числом электронов и дырок на примере двухслойного графена вблизи точки электронейтральности. Исследование таких систем до последнего времени не проводилось, поскольку в обычных полупроводниках не было возможности плавно менять концентрацию носителей заряда вплоть до изменения типа носителей.

Для измерений магнетосопротивления был изготовлен образец в виде трех мостиков Холла (рис.3б). Ширина мостиков в образце составляла 0,5, 1 и 2 мкм. Сопротивления R_{xx} и R_{xy} измерялись четырехзондовым методом в перпендикулярном магнитном поле от 0 до 7 Тл в температурном диапазоне от 1,5 до 150 К.

Типичные результаты измерения магнетосопротивления приведены на рис. 3 а, где отложены зависимости сопротивления от магнитного поля для средней части образца при температуре 50 К при разных значениях напряжения на затворе. Видно, что в точке электронейтральности (черная сплошная линия) магнетосопротивление меняется пропорционально магнитному полю, а при отдалении от нее начинает отклоняться от линейной зависимости. Такое поведение очень хорошо согласуется с тем, что предсказывает теория [7], описывающая магнетотранспорт электронно-дырочной двухкомпонентной системы в классически сильных магнитных полях.

Как следует из теории [7], в таких системах, при равенстве концентраций электронов и дырок, должно наблюдаться линейное МС. Отличие таких систем от

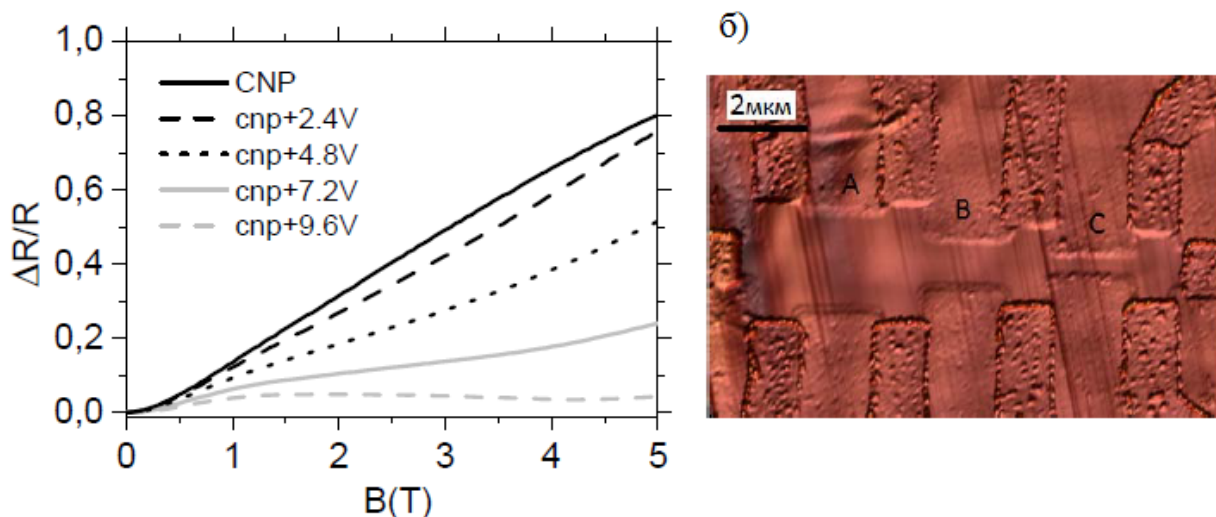


Рис.3. а) Экспериментальные данные магнетосопротивления для средней части образца при температуре 50К, в точке электронейтральности (CNP) и в ее окрестностях. б) Изображение образца графен в виде холловских мостиков на подложке Si/SiO₂ с контактами, получено с помощью атомно-силового микроскопа.

обычных, (в которых проводимость определяется только одним типом носителей) заключается в том, что в них не возникает холловское напряжение (V_H). Действительно, в системе с одним сортом носителей V_H зависит от знака носителей. В системе, где

имеется равная концентрация электронов и дырок V_H возникать не может, следовательно, оно не уравнивает силу Лоренца, что приводит к появлению потока частиц от одного края образца к другому. В этом случае доминирует продольный ток, текущий вдоль краев образца, если ширина образца соизмерима с длиной электронно-дырочной рекомбинации. Поэтому сопротивление двухкомпонентных систем определяется током вдоль краев и в сильных полях при равенстве концентраций носителей заряда пропорционально магнитному полю. Магнетотранспортные измерения показали хорошее согласие с теорией для двухкомпонентных систем для всех секций образца, вне зависимости от их ширины. Была проведена подгонка данных и оценены параметры носителей заряда из результатов такой подгонки.

Последняя, **Шестая глава**, посвящена результатам измерений терагерцовой фотопроводимости. На образцах графена, полученных за счет механического расщепления графита измерить сигнал фотопроводимости не удалось, по-видимому, из-за малых размеров образца (порядка 5 - 10 мкм) по сравнению с длиной волны падающего излучения (100 - 300 мкм). Все результаты по терагерцовой фотопроводимости были получены на образцах графена, изготовленного методом высокотемпературной сублимации на поверхности карбида кремния. Слой графена с помощью литографии вытравливался в форме меандра (рис. 4 а). Это было сделано для того, чтобы увеличить сопротивление образца за счет увеличения отношения длины образца к его ширине. В таких образцах при облучении терагерцовым излучением обнаружен сигнал фотопроводимости. Амплитуда сигнала экспоненциально зависит от смещения, приложенного к контактам, и меняется пропорционально интенсивности падающего света. Были измерены температурные зависимости амплитуды сигнала, которые повторяют форму производной зависимости сопротивления от температуры. Аналогичные измерения были проведены при разных длинах волн – 280, 148 и 90 мкм. Они показали, что форма зависимости амплитуды сигнала от температуры не меняется при изменении длины волны облучаемого лазерного излучения. Из этого следует, что механизм наблюдаемой фотопроводимости связан с болометрическим эффектом.

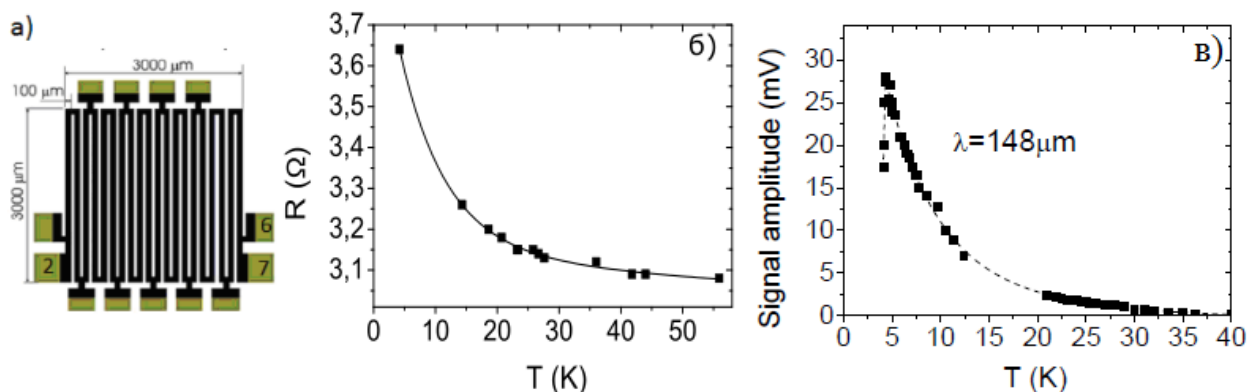


Рис.4. а) Схематическое изображение образца в виде меандра. б) Температурная зависимость сопротивления образца. в) Температурная зависимость амплитуды сигнала фотопроводимости на длине волны 148 мкм.

Дополнительно были проведены исследования температурной зависимости магнетосопротивления образца в виде меандра в широком интервале температур. Известно, что обычно в графене подвижность слабо меняется с температурой, поэтому сопротивление монослойного графена, не зависит от температуры. Обнаруженное в наших образцах резкое уменьшение сопротивления образца с ростом температуры (рис.4 б) объясняется эффектом слабой локализации. Хотя в графене, как правило, наблюдается слабая антилокализация, но если есть переходы между долинами, то возникает слабая локализация. В образце в виде меандра значительную роль играет рассеяние на границах (за счет их протяженности). Такое короткодействующее рассеяние на границе может вызывать междолинные переходы, и, следовательно, приводить к слабой локализации. Как видно на рис. 5 при приложении перпендикулярного магнитного поля сопротивление быстро уменьшается и формируется пик магнетосопротивления при $B = 0$, амплитуда которого также падает с температурой. Уменьшение сопротивления образцов графена с повышением температуры в интервале от 1.5 до 40 К, или при увеличении магнитного поля от 0 до 0.5 Тл может быть объяснено подавлением эффекта слабой локализации.

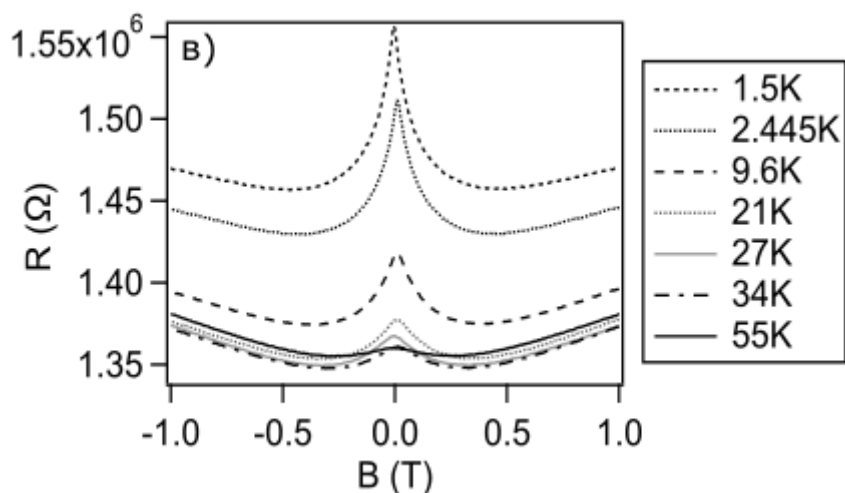


Рис. 5. Измерения магнетосопротивления в графене при разных температурах.

Измерения терагерцовой фотопроводимости также выполнялись на р-п переходах в графене, полученном при помощи метода сублимации. Образцы были изготовлены в виде вставленных друг в друга двух гребенок с длинными зубчиками (рис. 6 а), причем одна из гребенок была облучена ультрафиолетом, что привело к изменению типа проводимости в ней.

На таких структурах была измерена зависимость тока от напряжения, которая для обеих полярностей описывается зависимостью $I \propto V^{1.16}$. Соответствие ВАХ нашего образца графена с р-п переходом и ВАХ для однородных образцов графена указывает, что область р-п перехода по существу состоит из плоской зоны с собственной проводимостью, т.е. образуется р-и-п структура. Такая модель была теоретически рас-

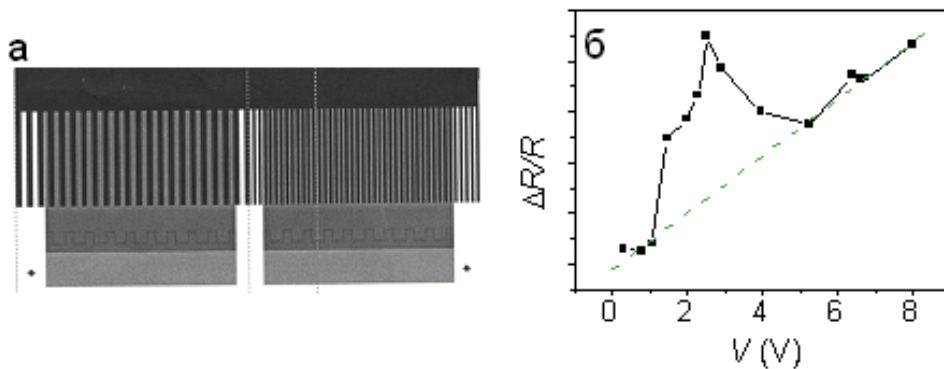


Рис. 6. а) Изображение образца графена с латеральными р-п переходами, возникшими на границе между частями графена с разным типом проводимости. Темные полосы имеют р-тип легирования, светлые - п-тип. Ширина полосок равна 100 мкм для одного прибора (на рис. слева) и 50 мкм для другого. б) Относительное изменение сопротивления образца графена с р-п переходом как функция приложенного напряжения.

смотрена в [8], где были рассчитаны ВАХ р-і-п структур в графене, которые находятся в хорошем согласии с измеренными нами экспериментальными кривыми.

Исследования влияния терагерцового излучения на сопротивление образцов графена с р-п переходами показали, что при освещении р-п перехода терагерцовым излучением ($\lambda=280$ мкм), появляется сигнал фотопроводимости при приложении электрического напряжения к структуре. На рис. 6 б) отложена зависимость относительного изменения сопротивления под действием излучения от напряжения на структуре. В отсутствие напряжения сигнал не появляется, что согласуется с выводом о том, что поглощение в структуре происходит в і-области. Вблизи напряжения смещения 2 В обнаружен максимум фотопроводимости, что свидетельствует о наличии резонанса. Известно, что частоты плазмонных колебаний в графене лежат в терагерцовой области. Изменение частоты плазмона происходит при развертке электрического напряжения, которое меняет параметры системы, такие как ширина полоски между р- и п- областями и концентрация носителей в і-области, от которых зависит частота плазмона [9]. Поэтому мы интерпретируем этот резонанс как плазмонное усиление болометрической фотопроводимости в условиях резонансного поглощения падающего излучения, когда частота излучения совпадает с плазмонной частотой.

Основные результаты и выводы работы.

1. В ходе выполнения работы были изготовлены образцы монослойного и двухслойного графена методом микромеханического отшелушивания. Учитывая микронные размеры образцов, контакты к ним были изготовлены методом литографии.
2. Проведен анализ методов очистки таких образцов от примесей, который выявил, что отжиг при температуре 300 °С предпочтительнее для удаления кулоновских

- примесей, а очистка в атомно-силовом микроскопе приводит к повышению подвижности и уменьшает количество короткодействующих дефектов.
3. Проведено экспериментальное исследование образцов двухслойного графена различной степени легирования в широком диапазоне магнитных полей и концентраций. В сильнолегированном образце двухслойного графена в узкой области затворных напряжений, когда уровень Ферми находится вблизи дна зоны, было обнаружено положительное магнетосопротивление, отсутствующее в чистом образце. Проведенная подгонка показала, что положительное МС хорошо описывается формулой Друде для систем с двумя типами носителей. Расчеты свидетельствуют, что такое поведение может быть связано с проявлением изгиба дна зонной структуры в виде «мексиканской шляпы».
 4. Измерения магнетосопротивления двухслойного графена при высоких концентрациях дырок выявили положительное магнетосопротивление, не зависящее ни от степени легирования образцов, ни от их геометрических размеров. Аналогичные измерения при высокой концентрации электронов продемонстрировали наличие слабого отрицательного магнетосопротивления, анализ температурной зависимости которого показал, что обнаруженное МС не является следствием электрон-электронного взаимодействия.
 5. Экспериментальные измерения для различных графеновых монослоев дают качественно различное поведение магнетосопротивления для образцов с различной зависимостью проводимости от напряжения на затворе. Это различие приписывается различным механизмам рассеяния – дальнедействующему (кулоновскому) и короткодействующему. Теория магнетотранспорта в графене, разработанная для случая короткодействующего рассеяния, качественно хорошо согласуется с нашими данными для образцов в окрестностях точки Дирака, где короткодействующее рассеяние играет существенную роль. Все три части кривой магнетосопротивления, предсказанные теоретически, наблюдаются экспериментально.
 6. Результаты экспериментального исследования магнетосопротивления в узких образцах двухслойного графена в точке электронейтральности и ее окрестностях подтвердили теоретические представления о магнетосопротивлении систем с двумя типами носителей. Из анализа экспериментальных данных магнетосопротивления были найдены: длина электронно-дырочной рекомбинации, подвижность и электронно-дырочный дисбаланс в зависимости от напряжения на затворе (концентрации носителей заряда). Показано, что для достижения количественного совпадения теоретических расчетов с результатами измерений в образцах конечного размера необходимо ввести добавочное постоянное сопротивление и учесть подмешивание холловского сопротивления вдали от точки нейтральности, либо считать, что концентрация носителей неравномерно распределена в плоскости образца.

7. На основе анализа магнетотранспортных свойств графена для усиления зависимости сопротивления от температуры была предложена форма образца в виде меандра.
8. Исследована температурная зависимость фотопроводимости графена в виде меандра на SiC, полученного методом сублимации, при разных длинах волн. Показано, что при частотах 1, 2 и 3 ТГц форма зависимости сигнала от температуры одинакова и повторяет форму производной сопротивления от температуры. Это свидетельствует о том, что причиной фотопроводимости является болометрический эффект.
9. Исследования в образцах с р-п переходом показали, что сигнал терагерцовой фотопроводимости связан с болометрическим эффектом. Измерения зависимости амплитуды сигнала от напряжения смещения позволяют предположить, что имеется усиление фотопроводимости на плазмонной частоте.

Основные публикации по теме диссертации.

A1. Г.Ю. Васильева, П.С. Алексеев, Ю.Л. Иванов, Ю.Б. Васильев, D. Smirnov, H. Schmidt, R.J. Haug, F. Gouider, G. Nachtwei. Особенности магнетосопротивления монослойного графена при рассеянии на короткодействующем потенциале // Письма в ЖЭТФ – 2012. – N96. – С. 519-522.

A2. Yu.B. Vasilyev, G.Yu. Vasileva, Yu.L. Ivanov, S. Novikov and S.N. Danilov. Temperature-dependent terahertz photoconductivity in epitaxial graphene // Appl. Phys. Lett. – 2014. – N105. – С. 171105.

A3. G.Yu. Vasileva, P.S. Alekseev, Yu.L. Ivanov, Yu.B. Vasilyev, D. Smirnov, H. Schmidt, R.J. Haug, F. Gouider, and G. Nachtwei. Magnetoresistance of monolayer graphene at high carrier densities //21st International Symposium “NANOSTRUCTURES: PHYSICS AND TECHNOLOGY”, St Petersburg, Russia, June 24–28, 2013, p.155-156.

A4. G. Yu. Vasileva, D. Smirnov, Yu. B. Vasilyev, P. S. Alekseev, Yu. L. Ivanov, A. P. Dmitriev, V. Yu. Kachorovskii, H. Schmidt, A. Heine, and R. J. Haug, Magnetotransport study of the energy band in bilayer graphene //20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-20) and 16th International Conference on Modulated Semiconductor Structures(MSS-16), Abstracts (vol.2) 1-5 July 2013. Wroclaw University of Technology, Poland, p.328

A5. Г.Ю. Васильева, А.С. Алексеев, D. Smirnov, Ю.Б. Васильев, А.П. Дмитриев, В.Ю. Качоровский, H. Schmidt, A. Heine, R.J. Haug, Ю.Л. Иванов, Положительное магнетосопротивление в графене вдали от точки Дирака. // XI Российская конференция по физике полупроводников, Санкт-Петербург, 16–20 сентября 2013, с. 127.

A6. G.Yu. Vasileva, P.S. Alekseev, Yu.L. Ivanov, Yu. B. Vasilyev, D. Smirnov, H. Schmidt, A.P. Dmitriev, V.Yu. Kachorovskii, F. Gouider, G. Nachtwei, R.J. Haug, Magnetoresistance of monolayer graphene with short-range scattering. //Winter school, Mauterndorf, Austria, 2014.

A7. G.Yu. Vasileva, Yu.L. Ivanov, S. Novikov, N. Lebedeva, M. Goethlich, F Gouider, G. Nachtwei, and Yu.B. Vasilyev, Terahertz photoconductivity in epitaxial graphene with Corbino geometry. //Proceedings 22nd International Symposium “NANOSTRUCTURES: PHYSICS AND TECHNOLOGY”, St Petersburg, Russia, June 23–27, 2014 p.74-75.

A8. G.Yu. Vasileva, Yu.L. Ivanov, D. Smirnov, R. Haug, and Yu.B. Vasilyev. Linear magnetoresistance near the Dirac point in graphene bilayers. //Proceedings 23rd International Symposium “NANOSTRUCTURES: PHYSICS AND TECHNOLOGY”, St Petersburg, Russia, June 22–26, 2015 p.191-192.

Используемая литература:

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films. //Science – 2004. – N 306. – C. 666.
2. McCann, E., and V. Fal’ko. Landau-level degeneracy and Quantum Hall Effect in a Graphene Bilayer //Phys. Rev. Lett. – 2006. – N 96. – C. 086805.
3. Castro E. V., Novoselov K. S., Morozov S. V., Peres N. M. R., Lopes dos Santos J. M. B., Nilsson J., Guinea F., Geim A. K., and Castro Neto A. H. Biased Bilayer Graphene: Semiconductor with a Gap Tunable by the Electric Field Effect. // Phys. Rev. Lett. – 2007. – N 99. – C. 216802.
4. Bostwick A., Ohta T., Seyller T., Horn K., and Rotenberg E. Quasiparticle dynamics in graphene.//Nature Physics – 2007. – N 3. – C36.
5. Nomura K., MacDonald A.H. Quantum Transport of Massless Dirac Fermions. //Phys.Rev.Lett – 2007. – N 98. – C 076602.
6. Alekseev P.S., Dmitriev A.P., Gornyi I.V., and Kachorovskii V.Yu. Strong magnetoresistance of disorder graphene.// Phys. Rev. B – 2013. – N 87. – C. 165432.
7. Alekseev P.S., Dmitriev A.P., Gornyi I.V., and Kachorovskii V.Yu. Narozhny B.N., Schuett M., and Titov M. Magnetoresistance in two-component systems. //Phys. Rev. Lett. – 2015. – N 114. – C. 156601.
8. Ryzhii V., Semenikhin I., Ryzhii M., Svintsov D., Vyurkov V., Satou A. and Otsuji T. Double injection in graphene p-i-n structures.//Journal of Applied Physics – 2013. – N 113. – C. 244505.
9. Echtermeyer T J, Britnell L, Jasnós P K, Lombardo A, Gorbachev R V, Grigorenko A N, Geim A K, Ferrari A C and Novoselov K S. Strong plasmonic enhancement of photovoltage in graphene. //Nature Communication – 2011. – N 2. – C. 458.