

ОТЗЫВ

официального оппонента
на диссертацию **ВАСИЛЬЕВОЙ Галины Юрьевны**
**«Особенности магнетосопротивления и терагерцовой
фотопроводимости в графене»**, представленной на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.10 – «Физика полупроводников».

Актуальность темы представленной к защите диссертации связана с исследованиями нового материала для электроники – аллотропной модификации углерода – графена. Несмотря на имеющееся большое число работ по графену, изучение его свойств на сегодняшний день представляет большое поле деятельности. Причина такого интереса связана с тем, что в графене можно изучать эффекты, которые невозможно наблюдать в обычных полупроводниковых системах. Кроме этого, графен, как углеродный материал, рассматривается в качестве базового элемента для развития коммерческой электроники и созданию на его основе различных оптоэлектронных приборов в ближайшем будущем.

Структура диссертации (объем 147 страниц, 59 рисунков, одна таблица). Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения с основными выводами и списка цитируемой литературы (147 наименований). Диссертация изложена четко и логично. В ней с достаточной полнотой приведены результаты научной работы автора.

Схема изложения: Во введении сформулированы задачи и цели проведенных исследований. Здесь же представлены обоснование актуальности темы диссертации и научная новизна полученных результатов с их практической и теоретической ценностью. Приведен список конференций и семинаров, где обсуждалась работа, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе содержится обзор литературы по теме диссертации. Представлены основные свойства монослойного и двухслойного графена с их кристаллической и зонной структурами. А также особенности ряда эффектов (квантовый эффект Холла и осцилляции Шубникова-де Газа) в нем. Приведен обзор результатов исследований фотопроводимости в терагерцовой области спектра, которые имеются на данный момент.

Во второй главе представлены методы получения графена с описанием экспериментальной установки. Подробно изложен процесс изготовления образцов графена методом микромеханического отшелушивания графита. Описаны методика измерения и все основные компоненты установок как для магнетотранспортных, так и для терагерцевых исследований.

Третья глава содержит результаты измерений магнетосопротивления двухслойного графена на подложке Si/SiO₂ при разных температурах и затворных напряжениях.

В четвертой главе представлены результаты исследований магнетосопротивления монослойного графена в результате рассеяния на короткодействующем потенциале. Нормированное магнетосопротивление при различных магнитных полях демонстрирует различные зависимости от линейной до квадратно-корневой в зависимости от величины магнитного поля. Сравнение полученных данных показывает хорошее качественное согласие теории с экспериментом.

Пятая глава посвящена исследованию магнетотранспорта в двух-компонентных системах с одинаковым числом электронов и дырок. Такая система исследовалась на основе двухслойного графена вблизи точки электронейтральности. При подгонке данных оценены параметры носителей заряда.

В шестой главе приводятся результаты изучения терагерцовой фотопроводимости на образцах графена в форме меандра, изготовленного методом высокотемпературной сублимации на поверхности карбида кремния. Показано, что механизм наблюдаемой фотопроводимости связан с болометрическим эффектом.

В конце каждой главы автором представлены краткие выводы к ней.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Для монослойного графена впервые обнаружена квадратно-корневая зависимость магнетосопротивления в слабых магнитных полях, что связано с наличием короткодействующего потенциала рассеяния в условиях линейной дисперсии.
2. Для двухслойного графена в транспортных измерениях впервые обнаружены особенности зонной структуры в виде «мексиканской шляпы».
3. Обнаружено положительное магнетосопротивление в двухслойном графене при высокой концентрации дырок, которое нечувствительно к степени легирования образцов. Оно не меняется при изменении концентрации и температуры, т.е. является универсальным.
4. В образцах графена, изготовленных методом сублимации SiC в форме меандра, получен сильный сигнал терагерцовой фотопроводимости, механизм которой обусловлен болометрическим эффектом. При этом наблюдается усиление болометрической фотопроводимости в p-n переходе.

Научная и практическая значимость работы.

Исследованиями в монослойных образцах графена вблизи точки электронейтральности показано, что зависимость сопротивления от величины магнитного поля определяется типом рассеивающего потенциала. При этом для образцов графена с короткодействующим потенциалом с увеличением магнитного поля сопротивление растет как квадратный корень.

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 двухслойном графене могут быть использованы для создания датчиков магнитного поля.

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

На образцах графена наблюдается терагерцовая фотопроводимость, связанная с болометрическим эффектом. Эти результаты указывают на возможность создания новых компактных детекторов в терагерцовом диапазоне спектра заинтересованными организациями (например, ОКБ «АСТРОН» и др.).

Достоверность и апробация результатов.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается комплексным использованием современных экспериментальных методов с их высокой точностью, воспроизводимостью получаемых результатов, применением современной аппаратуры и технологий. Результаты работы хорошо согласуются с современными теоретическими представлениями. Они неоднократно обсуждались на семинарах и докладывались на международных и всероссийских конференциях. Таким образом, обоснованность и достоверность полученных результатов не вызывает сомнения.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 научных работах автора, из них две – в реферируемых журналах и 6 – в материалах международных и российских конференций.

По диссертационной работе нужно сделать некоторые **замечания и вопросы.**

1. В пятой главе представлены результаты исследования магнетосопротивления образца двухслойного графена, состоящего из 3-х секций различной ширины. Видно, что зависимости сопротивления от напряжения на затворе не одинаковые для различных секций. Как вы можете это объяснить?

2. В двухслойном графене при приложении электрического поля между слоями открывается щель между валентной зоной и зоной проводимости. Может ли образоваться запрещенная зона при отсутствии внешнего электрического поля?

3. В тексте диссертации встречаются неточности, опечатки, недостаточно корректно построенные фразы. В частности на стр. 44 используется термин «закоротка контакта с затвором». На стр. 76 вместо

«в атмосфере He» написано «в атмосфере He₂».

Однако эти недостатки не снижают научной и практической значимости диссертационной работы.

Автореферат верно отражает содержание диссертации, опубликованные работы соответствуют ее содержанию. Основные результаты опубликованы в печати и докладывались на совещаниях и конференциях.

Представленная диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Васильева Галина Юрьевна, несомненно заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 — «Физика полупроводников».

Официальный оппонент

Лебедев Виктор Михайлович

ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики

НИЦ «Курчатовский институт»

доктор технических наук, старший научный сотрудник,

старший научный сотрудник Отдела исследования конденсированного состояния

Тел. 8-81371-46684

E-mail: lebedev@pnpi.spb.ru

_____/В.М. Лебедев/

25 сентября 2015 г.