

На правах рукописи

ЛАТЫШЕВ Александр Юрьевич



ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ
НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ГРАФИТА И
МНОГОСТЕННЫХ НАНОТРУБОК

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН,
Никитов Сергей Аполлонович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор,
Чернозатонский Леонид Александрович;

доктор физико-математических наук,
Романенко Анатолий Иванович.

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт спектроскопии РАН.

Защита состоится 25.12.2009 г., в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 002.231.01 при ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д.11, корп.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Автореферат разослан «23» ноября 2009г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, профессор



С.Н.Артеменко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Углерод, благодаря многообразию форм существования, является важнейшим природообразующим элементом, играющим важнейшую роль в живой и неживой природе. Уникальность углерода определяется возможностью его одновременного существования в различных кристаллических формах: алмаз (3D) и квазидвумерный графен (2D), квазиодномерные нанотрубки и карбины (1D), и нульмерные фуллерены (0D). Открытые в 1985 году фуллерены и позднее в 1991 году нанотрубки можно рассматривать как производные графена (монослоя графита), в котором для создания каркасной замкнутой структуры внесены структурные дефекты - пятиугольники для фуллеренов и большая кривизна графеновой поверхности для углеродных нанотрубок.

Как показали теоретические исследования, графен является единственным из кристаллических материалов, в котором носители имеют релятивистскую форму спектра, т.е. в переносе заряда участвуют дираковские фермионы, имеющие нулевую эффективную массу.

Поэтому с появлением технологии выделения свободных графеновых чешуек в 2005 году [1] начался настоящий бум экспериментальных исследований их физических свойств, обусловленный большой значимостью этих исследований как для фундаментальной науки, так и для практических целей - с графеном связано множество надежд в наноэлектронике.

Экспериментальное обнаружение в графене дираковских фермионов - безмассовых носителей с коническим спектром, открыло уникальную возможность исследовать некоторые аспекты релятивистской квантовой электродинамики в твердом теле.

В последнее время было обнаружено, что дираковские фермионы существуют и в тонких кристаллах графита нанометровой толщины [2,3]. Эти наблюдения открыли новый подход к исследованию дираковских фермионов, поскольку в графите дираковские фермионы не испытывают рассеяния на риплонах (ripple), молекулах абсорбированного газа и шероховатости подложки, что позволяет достичь меньших времен рассеяния, чем в свободном графене [4]. На подобных системах можно изучать туннелирование дираковских фермионов между слоями графена, а также их квантовую интерференцию. Однако подобные работы не проводились и поэтому являются актуальными.

Цель работы и основные задачи

Целью диссертационной работы являлось изучение транспортных свойств графита наноразмерной толщины и многостенных нанотрубок. В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие основные задачи исследований:

1. Исследование характера квантования Ландау носителей с помощью межслоевого туннелирования в графите.
2. Изучение эффекта Ааронова-Бома на колоннообразных дефектах в графите нанометровой толщины
3. Изучение эффекта Ааронова-Бома на многостенных углеродных нанотрубках в условиях близких к сильной локализации.

Для решения поставленных задач необходимо было разработать методики формирования наноразмерных графитовых структур.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Методом межслоевого туннелирования в графите определен вклад носителей со спектром квантования Ландау, характерным

- для дираковских фермионов с корневой зависимостью энергии от номера n уровня Ландау и величины магнитного поля. Показан когерентный характер туннелирования этих носителей с сохранением импульса при туннелировании.
2. Обнаружен осцилляционный вклад в магнетосопротивление монокристаллов графита нанометровой толщины с колоннообразными дефектами. Показано, что период осцилляций по потоку соответствует кванту потока на дефект, что указывает на вклад дираковских фермионов.
 3. Экспериментально продемонстрирован эффект Ааронова-Бома на многостенных углеродных нанотрубках в условиях, близких к режиму сильной локализации носителей. Установлена его специфика по сравнению с режимом слабой локализации носителей (период осцилляций по потоку вдвое больше, чем при слабой локализации).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Определение квантования Ландау в графите, характерного для дираковских фермионов методом межслоевого туннелирования.
2. Обнаружение периодических по полю осцилляций магнетосопротивления монокристаллов графита нанометровой толщины с колоннообразными дефектами с периодичностью квант потока на дефект.
3. Обнаружение эффекта Ааронова-Бома на многостенных углеродных нанотрубках в режиме, близком к сильной локализации носителей.

Достоверность

Полученные экспериментальные результаты и разработанные методики подтверждаются известными теоретическими моделями, а

также согласуются с результатами, опубликованными в отечественных и зарубежных работах.

Научная значимость работы.

В работе получены новые убедительные доказательства, подтверждающие участие дираковских фермионов в транспорте вдоль и поперек слоев в графите. Первое экспериментальное наблюдение эффекта Ааронова-Бома на многостенных углеродных нанотрубках в условиях, близких к сильной локализации носителей, пока не находит адекватного теоретического описания и указывает на возможность существования этого эффекта в условиях самой сильной локализации.

Практическая значимость работы связана с перспективой использования графена и структур на его основе в нанoeлектронике. В работе разработан метод получения тонких монокристаллов графита толщиной от 100 до 1 нм большой латеральной площади, с высоким структурным совершенством.

Личный вклад соискателя.

Все результаты, представленные в работе, получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии.

Апробация работы.

Результаты диссертации были доложены на российских и международных конференциях: 8th International Workshop on Fullerenes and Atomic Clusters (IWFAC'2007), St. Petersburg, Russia, July 2-6, 2007; на конференции “Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления”, 18 июня 2008 г., г. Троицк Московской области; International conference on theoretical physics, Dubna-Nano 2008, July 7-11, 2008; XIII Международный симпозиум по нанoфизике и нанoeлектронике, 16-20 марта 2009 г., Институт физики

микроструктур РАН, Нижний Новгород; 9th International Workshop on Fullerenes and Atomic Clusters (IWFAC'2009), July 6-10, St. Petersburg; School for young scientists on diagnostics of carbon nanostructures, July 8 2009, St. Petersburg; Втором московском международном форуме по нанотехнологиям, Москва, 6-8 октября 2009 г.; Втором московском международном конкурсе научных работ молодых ученых в области нанотехнологий, Москва, 7-8 октября 2009 г.; Шестом молодежном конкурсе ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, 19-20 октября 2009.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ (список приведен в конце автореферата), в том числе две статьи в ведущих российских и две статьи в зарубежных журналах, а также восемь публикаций – тезисы докладов на российских и международных конференциях. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации составил 33 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 96 страниц, 39 рисунков и список литературы, включающий 82 источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлены цели работы и дана ее общая характеристика, включая научную новизну и практическая значимость полученных результатов работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава является аналитическим обзором литературных данных по структуре и физическим свойствам графита, графена и углеродных нанотрубок.

В разделе 1.1 дается описание графена, его симметрии, кристаллической и зонной структуры. Показано, что следствием взаимопроникновения двух треугольных подрешеток в графене является существование носителей с коническим спектром (дираковских фермионов), имеющих нулевую эффективную массу. Их специфика проявляется в квантовании Ландау и в возможности проникать без отражения через потенциальный барьер.

В разделе 1.2 приводится обзор экспериментальных работ подтверждающих наличие дираковских фермионов в графите. Присутствие дираковских фермионов в графите было обнаружено при изучении оптического поглощения в ИК-диапазоне в магнитном поле, а также посредством угловой фотоэлектронной спектроскопии и сканирующей туннельной микроскопии в магнитных полях.

В разделе 1.3 приводится классификация углеродных нанотрубок, рассматриваются особенности электропереноса в них.

В разделе 1.4 сформулированы задачи диссертационной работы и подходы к их решению.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию квантования Ландау в графите. Рассмотрены особенности квантования Ландау в графене. Описаны методы изготовления структур типа «меза». Приведены методики измерений и проведен анализ экспериментальных результатов по туннелированию между слоями в условиях квантования Ландау.

В разделе 2.1 рассматривается явление квантования Ландау в двумерной системе и его особенности в графене. Показано, что из-за

линейности закона дисперсии, уровни Ландау в графене квантуются иначе. Во-первых, энергия уровней Ландау зависит от их номера как \sqrt{n} , поэтому уровни Ландау в нём не эквидистантны. Во-вторых, в графене существует двукратно вырожденный уровень с нулевой энергией при $n = 0$. Зависимость энергии уровня Ландау от магнитного поля имеет корневой характер

$$E_n = \text{sgn } n v_F \sqrt{2(e/c)\hbar |n| H}. \quad (1)$$

Рассмотрено межслоевое туннелирование в условиях квантования Ландау. При увеличении напряжения V_n на туннельном переходе

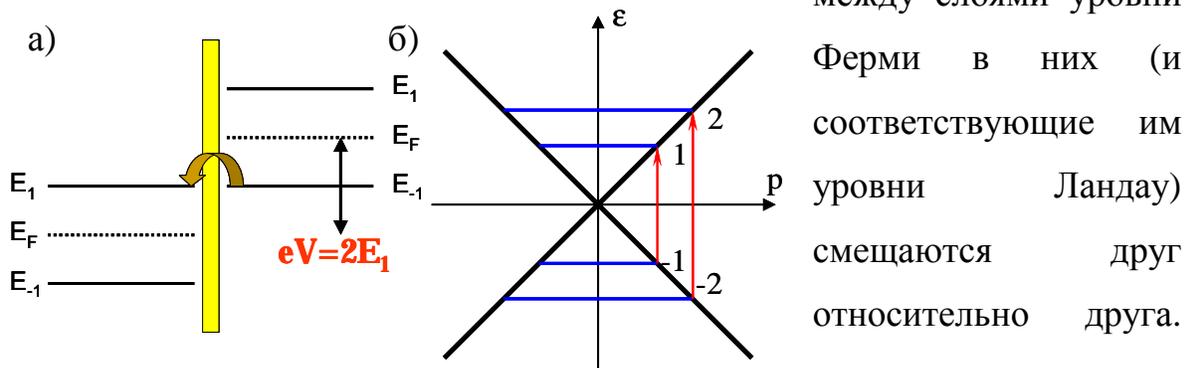


Рис.1. Схема межслоевого туннелирования в условиях квантования Ландау.

Эффективное туннелирование между слоями происходит при условии, когда уровень Ландау в валентной зоне сравнивается с соответствующим уровнем в зоне проводимости (Рис. 1а). Такому смещению соответствует увеличение туннельного тока и появление пика дифференциальной туннельной проводимости. При когерентном туннелировании импульс в плоскости слоев сохраняется, поэтому при переходе между уровнями Ландау возможны только те переходы, для которых $|\Delta n| = 0$ (Рис. 1б).

В разделе 2.2 сформулированы основные требования, предъявляемые к образцам графита для исследования поперечного

транспорта в магнитном поле, описана методика их формирования и приведены их основные характеристики.

Из монокристалла природного графита высокого качества были изготовлены структуры типа «меза», рассмотрены особенности ее формирования из графита и приведены характеристики полученных образцов графитовых «мез». На высокое качество кристаллов указывала большая анизотропия проводимости. При комнатной температуре она составляла 4000, а при температуре жидкого гелия около 30000. «Мезы» изготавливались методом двухстороннего травления тонких кристаллов графита в фокусированных ионных пучках на установке SMI 3050 с разрешением 10 нм. Установлено, что температурная зависимость сопротивления в «мезе» имеет характер типичный для туннельных переходов. Полученные структуры обладали площадью 1 мкм x 1 мкм, толщиной до 0,01 мкм (Рис.2.)

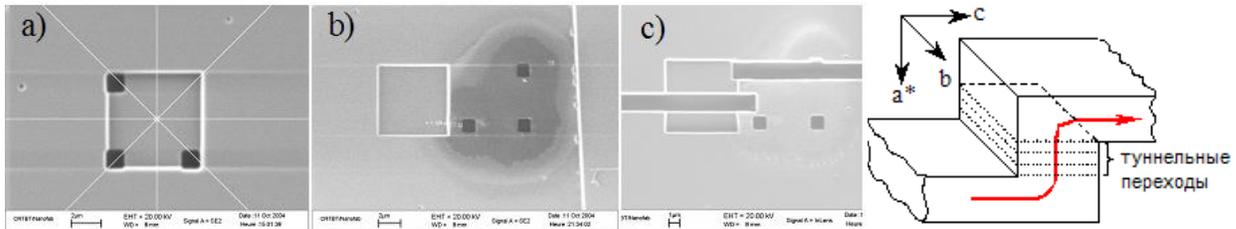


Рис.2. SEM изображение структуры на разных стадиях изготовления

В разделе 2.3 рассмотрен метод межслоевого туннелирования и его адаптация к спектроскопии графита. Приведено описание экспериментальной установки и условий эксперимента.

Метод межслоевого туннелирования представляет собой туннельную спектроскопию на естественных межслоевых барьерах, обусловленных слоистой структурой материала.

Экспериментальная установка позволяла измерять вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур, зависимости их сопротивления от температуры и магнитного поля в режиме заданного постоянного тока

или напряжения с предельной точностью измерений напряжения ~ 1 нВ. Установка обеспечивала автоматическую стабилизацию температуры, с точностью не хуже 0.01К. Туннельные спектры снимались при T 1,5 К, при H до 6 Тл, приложенным перпендикулярно плоскости слоев.

В разделе 2.4 приведены экспериментальные результаты исследования межслоевого туннелирования в условиях квантования Ландау в магнитных полях до 6 Тл параллельных оси c , при $T=1,4$ К.

Как рассматривалось в разделе 2.1, при напряжении смещения на переходе V_n , соответствующих условию

$$V_n = 2E_n/e, \quad (2)$$

где E_n энергия n уровня Ландау, можно ожидать пиков в спектре туннельной проводимости. Оценка дает для величины напряжения смещения V_n соответствующего переходу $(-1,1)$ в поле $H=1$ Тл $V_1 \approx 80$ мВ. Именно такой пик, наиболее ярко и воспроизводимо проявлялся на эксперименте (Рис.3а). Его положение зависело от H корневым образом

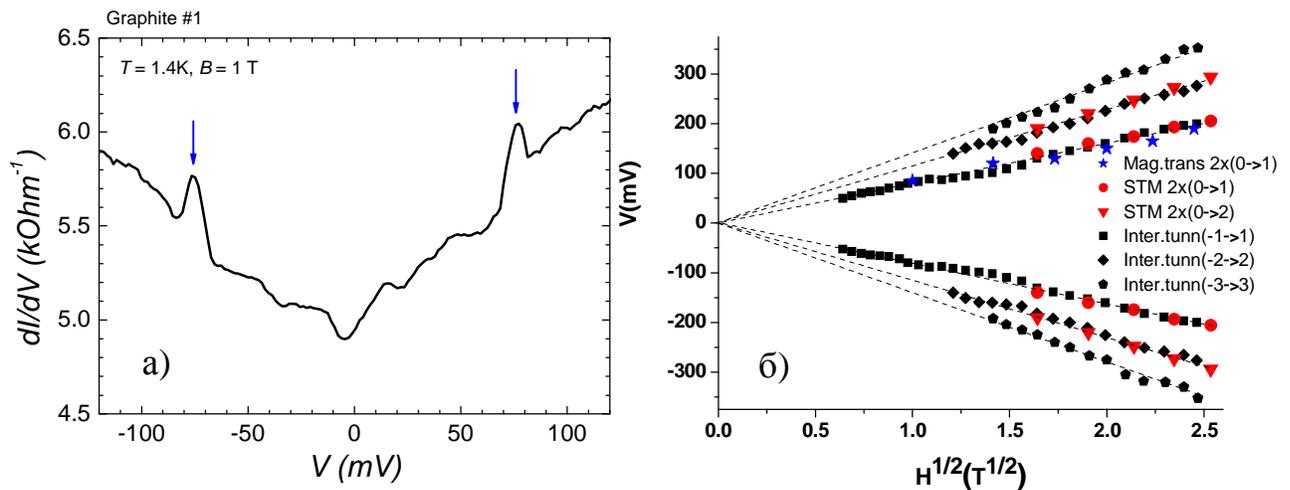


Рис.3. Межслоевой туннельный спектр в графите при $H=1$ Тл (а) и зависимость положения пиков от корня из магнитного поля (черны символы) (б). Штриховые прямые – теоретические зависимости согласно (1). Красные символы – данные STM [2], синие – оптические данные по поглощению в магнитом поле[3].

(Рис.3б), в соответствии с формулой (1). В полях, больших 2 Тл, наблюдались также пики соответствующие переходам (-2, 2), (-3,3). Их положение хорошо соответствует теоретической зависимости энергии уровня Ландау для дираковских фермионов. Полученные результаты хорошо согласуются с данными STM [2] и с оптическими данными по поглощению в ИК диапазоне в магнитном поле [3] (Рис.3). Отсутствие пиков, соответствующие переходам (-m, n) при $n \neq m$, свидетельствует о когерентности межслоевого туннелирования в графите.

В разделе 2.5 проведен анализ полученных спектров межслоевого туннелирования в магнитном поле на тонких мезах графита и сделаны промежуточные выводы: в графите нанометровой толщины обнаружены пики туннельной проводимости соответствующие переходам между уровнями Ландау дираковских фермионов

$$E_n = n_F \sqrt{2e\hbar|n|H} \text{ с } |\Delta n| = 0.$$

Третья глава посвящена исследованию магнетотранспорта в кристаллах графита нанометровой толщины с колоннообразными дефектами. Рассмотрена специфика эффекта Ааронова-Бома в графене, приведена методика приготовления образцов с колоннообразными дефектами и методика измерения их магнетосопротивления и описаны экспериментальные результаты.

В **разделе 3.1** рассматривается свойство дираковских фермионов, заключающееся в их способности проникать без отражения через потенциальный барьер [5]. Одним из следствий этого является отсутствие на графене эффекта слабой локализации, обусловленного интерференцией носителей на прямой и отраженной траекториях. Это свойство может проявиться также при интерференции на мезоскопическом кольце графена, содержащем магнитный поток (эффект Ааронова-Бома). Отсутствие рассеяния назад должно

приводить к подавлению осциллирующего вклада в магнетосопротивление с периодом $F_0/2$. Экспериментально этот эффект был изучен пока только в одной экспериментальной работе на мезоскопических кольцах из графена с внутренним диаметром 700 нм. Авторы этой работы, действительно, обнаружили наличие слабых осцилляций магнетосопротивления с периодом по потоку в кольце hc/e в то время как вклад $hc/2e$, связанный со слабой локализацией был сильно подавлен.

Учитывая, что эффект должен усиливаться при уменьшении диаметра кольца, была предложена идея реализовать интерференцию дираковских фермионов на системе нанотверстий, создаваемых облучением тяжелыми ионами.

В разделе 3.2 описана методика получения монокристаллов графита нанометровой толщины с колоннообразными дефектами. Тонкие кристаллы графита толщиной, 30-50 нм с латеральными размерами несколько сотен микрон получались отщеплением от монокристаллов естественного графита с помощью адгезионной ленты и последующем переносом на подложку.

Полученные монокристаллы графита нанометровой толщины облучались на линейном ускорителе тяжелыми ионами Хе с энергией 90 МэВ. Направление пучка ионов было параллельно оси с облучаемых кристаллов. В этих условиях ион оставляет сквозной колоннообразный трек. Аморфное вещество в колоннообразном дефекта обычно непроводящее или плохо проводящее, т.е. для носителей тока колоннообразный дефект представляет собой нанотверстие. Поскольку каждый ион создает идентичный колоннообразный дефект, облученный тонкий монокристалл можно рассматривать как ансамбль нанотверстий одинакового диаметра.

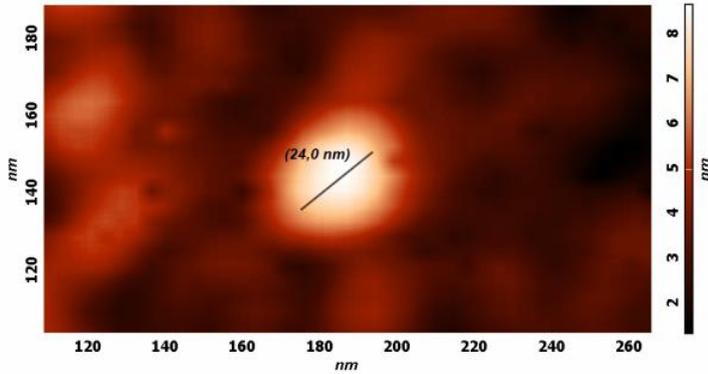


Рис.4. AFM изображение колоннообразного дефекта

Анализ поверхностной области образцов при помощи атомно-силового микроскопа позволил идентифицировать колоннообразный дефект по бугоркам выдавленного из них аморфного вещества. Оценка диаметра колоннообразного дефекта дала величину около 24 нм (Рис.4). Были получены образцы с тремя плотностями дефектов 10^9 , $3 \cdot 10^9$ и 10^{10} дефектов на см^2 .

В разделе 3.3 описываются результаты эксперимента по исследованию магнетотранспорта в полученных структурах. Измерения проводились в магнитных полях до 32 Тл приложенных

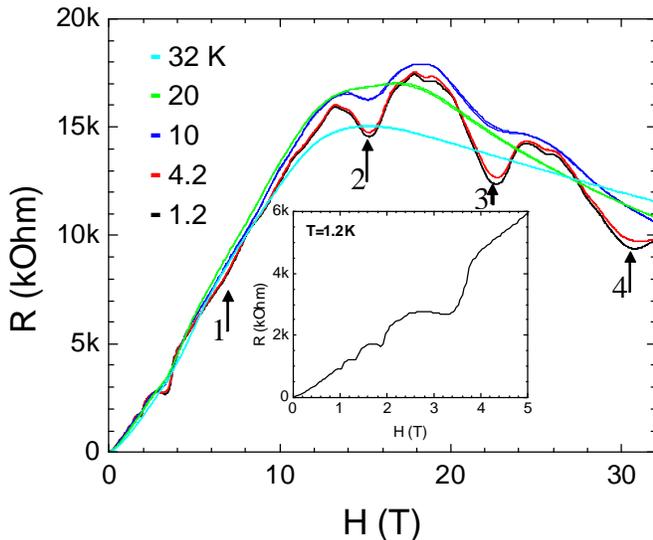


Рис.5. Периодические по полю осцилляции сопротивления образца с колоннообразными дефектами. На вставке показаны периодические по обратному полю осцилляции Шубникова де Гааза

параллельно оси c , при температурах до 1,2 К. На рис. 5 показана зависимость сопротивления R образца с плотностью дефектов 10^9 см^{-2} от магнитного поля H . В области полей, больших 10 Тл, видны три осцилляции с минимумами при 15, 22,5 и 30 Тл. Период этих осцилляций соответствует 7,5 Тл. Также

осцилляции с минимумами при 15, 22,5 и 30 Тл. Период этих осцилляций соответствует 7,5 Тл. Также

прослеживается минимум при 7,5 Тл, который значительно слабее. Зависимости $R(H)$ практически совпадали при развертке поля вверх и вниз, а также при изменении ориентации поля на противоположную, $H \rightarrow -H$. Установлено, что амплитуда осцилляций уменьшается с ростом температуры и они исчезают при температурах выше 20 К. Подобные крупномасштабные, периодические по полю осцилляции наблюдались и для двух других образцов с дозами облучения 310^9 и 10^{10} дефектов на см^2 , но с меньшей амплитудой.

Объяснить периодические по полю осцилляции магнетосопротивления можно следующим образом. Колоннообразный дефект рассматривают для носителей как полый цилиндр, пронизывающий всю толщину тонкого образца. В магнитном поле колоннообразный дефект представляет собой наноманит, двигаясь вокруг которого носители могут набирать фазу. Имея одинаковую площадь, все они пронизаны одинаковым магнитным потоком, поэтому носители,двигающиеся вокруг дефектов, набирают одинаковую дополнительную фазу. Экспериментальные данные соответствуют периоду по полю $\Delta H = 7,5$ Тл, что дает в пересчете на поток через колоннообразный дефект величину, близкую к $F_0 = hc/e = 4,1 \cdot 10^{-11}$ Тл см^2 .

Полученный период осцилляций хорошо согласуется с единственной работой по эффекту Ааронова-Бома на графене [6]. У авторов при внутреннем диаметре кольца графена 700 нм период осцилляций составлял 7 мТл. Учитывая, что диаметр нанодоверстий был в 30 раз меньше, период осцилляций, пропорциональный $1/D^2$, должен был быть примерно на три порядка больше, чем в [6], что соответствует наблюдаемому периоду 7,5 Тл. При этом относительная амплитуда осцилляций возросла в 30 раз.

В разделе 3.4 приведены промежуточные выводы: установлено, что периодичность осцилляций магнетосопротивления по потоку соответствует кванту потока на дефект, что указывает на интерференцию дираковских фермионов. Отметим, что этот эффект впервые наблюдался в графите на нанометровом масштабе длин.

Четвертая глава посвящена исследованию эффекта Ааронова-Бома на многостенных углеродных нанотрубках в режиме, близком к сильной локализации носителей.

В разделе 4.1 описывается эффект Ааронова-Бома на нанотрубках. Благодаря цилиндрической топологии на нанотрубках можно изучать квантово-интерференционные явления носителей в магнитном поле параллельном ее оси. Квантование потока в трубке приводит к осцилляциям магнетосопротивления с ростом продольного магнитного поля. Этот эффект изучался на нанотрубках в условиях баллистического транспорта. Период осцилляций по потоку составлял hc/e [7,8], в то время, как в режиме слабой локализации – $hc/2e$ [9]. Фактор $1/2$ появляется, как следствие интерференции на прямых и обратных траекториях. Интересным и пока неизученным оставался вопрос о характере квантовой интерференции в условиях перехода к режиму сильной локализации.

В разделе 4.2 описываются исследованные многостенные углеродные нанотрубки. Нанотрубки были получены CVD-методом в нанопорах Al_2O_3 . Внешний диаметр нанотрубок D определялся диаметром поры и составлял $D \approx 20$ нм, длина трубки ~ 1 мкм. Ориентация трубок была перпендикулярна поверхности слоя Al_2O_3 . Измерения проводились на двух отобранных по сопротивлению образцах, содержащих единичные нанотрубки с низкоомным контактным сопротивлением. На отобранных нанотрубках в области низких температур наблюдается переход к сильной локализации [10].

Он характеризуется переходом от степенного к экспоненциальному росту сопротивления с понижением температуры ниже ≈ 1 К. В этой области эффект Ааронова-Бома не изучался. Можно было ожидать результата, аналогичного случаю слабой локализации т.е. осцилляции магнетосопротивления с периодом по потоку $\Phi_0/2$ на сечение трубки.

В разделе 4.3 приведены результаты эксперимента по изучению эффекта Ааронова-Бома на многостенных углеродных нанотрубках в режиме, близком к сильной локализации носителей.

Измерения проводились в полях до 32 Тл, приложенных параллельно оси нанотрубки, при температурах до 1,2 К. При $T=1.2$ К на фоне монотонно растущего магнетосопротивления наблюдались его осцилляции (Рис.6). Осцилляции воспроизводились при развертке $R(H)$

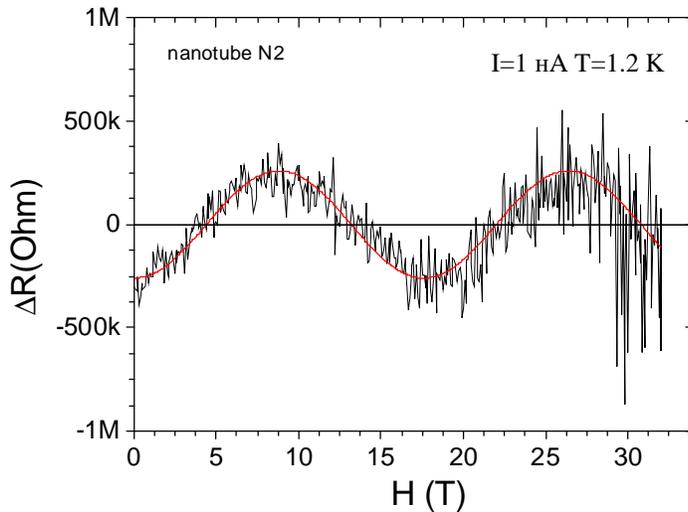


Рис.6. Осцилляция магнетосопротивления нанотрубки после вычитания монотонной части и косинусоида соответствующая

$$\text{функции } \Delta R = -A \cos(2\pi H/H_0),$$

$$\text{где } A=260 \text{ кОм, } H_0=17.6 \text{ Тл.}$$

с ростом и с уменьшением поля. Они также воспроизводились при повороте направления поля на 180° ($H \leftrightarrow -H$). Амплитуда осцилляций быстро спадает с ростом температуры и тока. Эффект исчезает при $T > 3$ К и токе $I > 10$ нА. Извлеченный из этого анализа период составляет около 18 Тл, что при пересчете на поток дает величину близкую hc/e .

Полученный экспериментально результат отражает необычную картину. В условиях, близких к сильной локализации, наблюдается период осцилляций Ааронова-Бома, по потоку вдвое больший, чем в

условиях слабой локализации, т.е. такой же, как и в баллистическом режиме. Теоретическое рассмотрение эффекта Ааронова-Бома в условиях сильной локализации и близких к ней в настоящее время отсутствует. Качественно можно сказать, что при переходе к сильной локализации в условиях, когда длина свободного пробега носителей остается больше периметра нанотрубки, носители могут совершать почти баллистическое движение по периметру, что определяет периодичность магнетосопротивления по потоку hc/e . В то же время продольное движение с понижением температуры испытывает переход к сильной локализации, обуславливающий рост сопротивления с понижением температуры.

В разделе 4.4 перечислены промежуточные выводы: в многостенных углеродных нанотрубках в условиях близких к сильной локализации период магнетосопротивления по потоку вдвое больше чем при слабой локализации

В **Заключение** приведены основные результаты диссертации.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. С помощью межслоевого туннелирования в графите обнаружены пики туннельной проводимости соответствующие переходам между уровнями Ландау дираковских фермионов $E_n = n_F \sqrt{2e\hbar|n|H}$ с $|\Delta n| = 0$.
2. В графите нанометровой толщины с колоннообразными дефектами диаметром 24 нм обнаружены периодические по полю осцилляции магнетосопротивления с периодом 7.5 Тл. Периодичность осцилляций магнетосопротивления по потоку соответствует кванту потока на дефект, что указывает на определяющий вклад дираковских фермионов.

3. Установлено, что в многостенных углеродных нанотрубках в условиях близких к сильной локализации период осцилляций магнетосопротивления по потоку вдвое больше, чем при слабой локализации.
4. На графите разработаны методики формирования слоистых наноструктур типа мезы, а также наноструктур с колоннообразными дефектами.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Yu. I. Latyshev; Z. Ya. Kosakovskaya; A. P. Orlov; A. Yu. Latyshev; V.V. Kolesov; P. Monceau; J. Marcus; Th. Fournier. Nonlinear Interlayer Transport in the Aligned Carbon Nanotube Films and Graphite. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. **16**, p. 344–351 (2008).
2. Yu.I. Latyshev, Z.Ya. Kosakovskaya, A.P. Orlov, A.Yu. Latyshev, V.V. Kolesov, P. Monceau, D. Vignolles. Nonlinear interlayer transport in the aligned carbon nanotube films and graphite. Journal of Physics: Conference Series. **129**, p. 012032 (2008).
3. Ю. И. Латышев, А. Ю. Латышев, А. П. Орлов, А. А. Щекин, В. А. Быков, П. Монсо, К. ван дер Бек, М. Конциковский, И. Моне. Периодические по полю осцилляции магнетосопротивления тонких монокристаллов графита с колоннообразными дефектами. Письма в ЖЭТФ. Том **90**, вып. 6, с. 526-530 (2009).
4. Ю. И. Латышев, А. П. Орлов, А. Ю. Латышев, Т. Л. Вейд, М. Конциковский, П. Монсо. Эффект Ааронова-Бома на многостенных углеродных нанотрубках в режиме, близком к сильной локализации носителей. Письма в ЖЭТФ. Том **90**, вып. 9, с. 672-675 (2009).

5. Yu.I. Latyshev, Z.Ya. Kosakovskaya, A.P. Orlov, A.Yu. Latyshev, V.V. Kolesov. Nonlinear interlayer transport in the aligned carbon nanotube films and graphite. Poster report on 8th Biennial International Workshop on Fullerenes and Atomic Clusters, July 2-7, 2007, St. Petersburg, Russia. Book of abstracts, p. 61.
6. Ю.И. Латышев, А.П. Орлов, А.Ю. Латышев, П. Монсо, Д. Виньоль. Межслоевая туннельная спектроскопия графита. Устный доклад на конференции Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления, 18 июня 2008 г., г. Троицк Московской области. Сборник тезисов, с. 10.
7. Yu.I. Latyshev, Z.Ya. Kosakovskaya, A.P. Orlov, A.Yu. Latyshev, and V.V. Kolesov. Nonlinear interlayer transport in the aligned carbon nanotube films and graphite. Poster presentation at the international conference on theoretical physics, Dubna-Nano 2008, July 7-11, 2008, Dubna. Books of abstracts, p. 64.
8. Ю.И. Латышев, А.П. Орлов, А.Ю. Латышев, Д. Виньоль. Межслоевая туннельная спектроскопия дираковских фермионов в графите. Устный доклад на XIII Международном симпозиуме по нанофизике и наноэлектронике, 16-20 марта 2009 г., Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород. Сборник тезисов докладов т.1, с.20-21.
9. Yu.I. latyshev, A.P. Orlov, A.Yu. Latyshev, D. Vignolles. Interlayer tunneling spectroscopy of Dirac fermions in graphite. Poster report on 9th Biennial International Workshop on Fullerenes and Atomic Clusters, July 6-10, 2009, St. Petersburg, Russia. Book of abstracts, p. 81.
10. A.Yu. Latyshev. Mesa Type Graphite Nanostructures for Interlayer Tunneling Spectroscopy of Graphene. Poster report on conference School for young scientists on diagnostics of carbon nanostructures, July 8 2009, St. Petersburg, Russia. Book of abstracts, p. 20.

11. Yu.I. Latyshev, A.Yu. Latyshev, E.G. Shustin, N.V. Isaev, A.A. Shekin, V.A. Bykov. Novel method of production of graphene films of large area in plasma discharge. Poster report on The Second Nanotechnology International Forum Rusnanotech 09, 6-8 October 2009, Moscow, Russia. Book of abstracts, p. 374-375.
12. A.Yu. Latyshev, Yu.I. Latyshev, A.P. Orlov, C. Fugeras, P. Monceau. Production of graphene films with thickness less than 10 nm by thinning of graphite single crystals in oxygen discharge. Poster report on The Second International Competition of Scientific Papers in Nanotechnology for Young Researchers , 6-8 October 2009, Moscow, Russia. Book of abstracts, p. 67-68.

Цитированная литература

1. Novoselov K.S., Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene / Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Katsnelson M. I., Grigorieva I. V., Dubonos S. V., Firsov A. A. // Nature. – 2005. – V. 438 – p. 197-200.
2. Li G., Observation of Landau levels of Dirac fermions in graphite / Li G., Andrei E. // Nature Physics. – 2007. – V. 3 – p. 623-627.
3. Orlita M., Dirac Fermions at the H Point of Graphite: Magnetotransmission Studies / Orlita M., Faugeras C., Martinez G., Maude D. K., Sadowski M. L., Potemski M // Physical Review Letters. – 2008. – V. 100 – p. 136403.
4. Neugebauer P., How perfect can graphene be / Neugebauer P., Orlita M., Fugeras C., Barra A.-L., Potemski M. // Physical review letters. – 2009. – V. 103 – p. 136403.
5. Katsnelson M. I., Chiral tunnelling and the Klein paradox / Katsnelson M. I., Novoselov K.S., Geim A.K. // Nature Physics. – 2006.- V. 2 – p. 620-625.

6. Russo S., Observation of Aharonov-Bohm conductance oscillations in a graphene ring // Russo S., Oostinga J., Wehenkel D., Heersche H., Sobhani S. S., Vandersypen L. M. K., Morpurgo A. F. // *Physical Review B*. – 2008. – V. 77 – p. 085413.
7. Lassagne B., Aharonov-Bohm Conductance Modulation in Ballistic Carbon Nanotubes / Lassagne B., Cleuziou J-P., Nanot S., Escoffier W., Avriller R., Roche S., Forró L., Raquet B., BrotoPhys J.-M. // *Physical Review Letters*. – 2007. – V. 98 – p. 176802.
8. Fedorov G., Magnetically Induced Field Effect in Carbon Nanotube Devices / Fedorov G., Tselev A., Jimenez D., Latil S., Kalugin N.G., Barbara P., Smirnov D., Roche S. // *Nano Letters*. – 2007. – V. 7 – p.960-964.
9. Schoenenberger C., Interference and Interaction in multi-wall carbon nanotubes / Schoenenberger C., Bachtold A., Strunk C., Salvétat J.-P., Forró L. // *Applied Physics A*. – 1999. – V. 69 – p. 283-295.
10. Dayen J.-F., Transition from Coulomb blockade to insulator regime in multiwall carbon nanotubes / Dayen J.-F., Jehl X., Wade T. L., Sanquer M., Wegrowe J.-E. // *Physica Status Solidi (b)*. – 2006. – V. 243 – p. 3413-3417.