

На правах рукописи

Пичугин Константин Николаевич

**ЭФФЕКТЫ КВАНТОВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В
ЭЛЕКТРОННОМ ТРАНСПОРТЕ ЧЕРЕЗ ДВУМЕРНЫЕ
НАНОСТРУКТУРЫ**

01.04.07 — физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск 2007

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В.Киренского СО РАН,
г. Красноярск

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Садреев А. Ф.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Вальков В.В.

кандидат физико-математических наук,
Белошапкин В.В.

Ведущая организация: Институт физики полупроводников СО РАН,
г. Новосибирск

Защита состоится " ____ " _____ 2007 года в ____ часов на засе-
дании диссертационного совета Д 003.055.02 при Институте физики им.
Л.В.Киренского СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок,
Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, главный корпус.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им.
Л.В. Киренского СО РАН.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2007 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Втюрин А.Н.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Благодаря достижениям нанотехнологии с использованием методов молекулярно-лучевой эпитаксии и литографии [1] появилась возможность создавать различные искусственные структуры с физически контролируруемыми параметрами. Технологически наноустройства достигли такого уровня по масштабам длин и энергий, когда квантовые эффекты доминируют в процессах проводимости. Типичные размеры таких устройств изменяются от нанометра до микрометра.

При очень низких температурах (обычно несколько mK), неупругое рассеяние значительно подавлено и длина фазовой когерентности электронов может стать больше размера системы. В таком режиме электрон сохраняет фазовую когерентность по всему образцу. Идеализированный образец становится электронным волноводом и его транспортные свойства определяются исключительно геометрией системы, конфигурацией примесей и законами квантовой механики. Эти условия создают возможность разработки новых электронных устройств.

Идея использования квантовой интерференции для создания электронных устройств сравнительно нова. Было предложено несколько устройств, использующих магнитное или электростатическое поле для управления интерференцией [2, 3]. В связи с этим, изучение влияния управляющих полей на транспортные свойства структур представляет определённый интерес. Хорошо известный квантовый эффект осцилляций Ааронова-Бома (ОАБ) [4] является примером использования постоянного магнитного поля для управления транспортом электронов. В экспериментах А. Yasoby *at al.* [5, 6] для управления разностью фаз интерферирующих путей используются как электрическое, так и магнитное поле.

Волновая природа электрона при квантовом рассмотрении имеет непосредственную аналогию с другими волновыми процессами (электромагнитными, акустическими и т.д.). Например, уравнения, описывающие электрон в двумерных наноструктурах в квантовом баллистическом режиме, эквивалентны уравнениям распространения электромагнитного ТМ поля в плоскопараллельных волноводах. Эта эквивалентность открывает возможность тестирования *квантовых электронных устройств* в макроскопических волноводных системах [7]. И наоборот, искать известные электромагнитные эффекты в квантовых наносистемах.

Возможность изготовления устройств, с эффективной размерностью мень-

ше трёх, таких, как квантовые плёнки (2D), квантовые проволоки (1D) и квантовые точки (0D), открыла способ проявления эффектов низкоразмерной физики в процессах проводимости. В этих системах уже открыты интереснейшие эффекты, такие, как квантование проводимости, резонансное туннелирование, квантовый эффект Холла, незатухающий ток (persistent current), универсальные флуктуации проводимости, кулоновская блокада и т.д.

Ещё одно новое направление в баллистическом электронном транспорте, называемое "спин-поляризованным транспортом", развивается сейчас очень быстро. Хотя это направление происходит еще от квантового описания твердого тела, лишь недавно современные методы изготовления микронных и нано-электронных устройств позволили исследовать баллистический, когерентный транспорт электронов. Главный интерес к спиновой поляризации электронов вызван возможностью использовать спиновые состояния электрона как носителя битов информации с последующей обработкой и передачей этой информации (спинтроника). Однако само явление спин-поляризованного транспорта также представляет фундаментальный физический интерес, так как приводит к множеству интересных особенностей в проводимости наноустройств (эффект спинового транзистора [8], эффект Ааронова-Кашера и т.д.).

Цель работы. Целью кандидатской диссертации являлось изучение с помощью методов компьютерного моделирования некоторых эффектов квантовой интерференции в электронном транспорте в двумерных наносистемах с учётом и без учёта спин-орбитального взаимодействия. Управление интерференцией осуществлялось с помощью изменения электрического и магнитного полей. Интерференционные явления исследовались на примере эффекта осцилляций Ааронова-Бома и эффекта связанного состояния в континууме в двумерных кольцах, осцилляций проводимости при прохождении электрона через две щели в экране (*double-slit* эксперимент), а также на примере поляризационных эффектов в транспорте электронов через двумерную крест-структуру при учёте спин-орбитального взаимодействия Рашбы.

Основные задачи работы. Для достижения сформулированных выше целей были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать транспортные свойства двумерных структур с кольцевой геометрией:
 - а) исследовать зависимости осцилляций проводимости Ааронова-Бома

(ОАБ) от геометрии образца (отношения ширины рукавов к радиусу);

- б) изучить зависимости поведения ОАБ от энергии Ферми;
 - в) проанализировать образование вихревых токовых состояний в образце и рассмотреть их влияние на ОАБ;
 - г) на примере одномерного кольца аналитически исследовать связанные состояния в континууме в пространстве параметров энергия–магнитное поле;
 - д) изучить свойства связанных состояний в континууме в двумерном кольце;
2. Численно рассмотреть транспортные свойства двумерной структуры, моделирующей *double-slit* интерференционный эксперимент группы А. Уасобу [6]:
- а) исследовать осцилляции проводимости, обусловленные изменением потенциала управляющего электрода, в зависимости от особенностей геометрии эксперимента, а именно – от формы квантовых точечных контактов (прямоугольная и закруглённая), а также изучить роль экрана между эмиттером и коллектором;
 - б) провести анализ зависимости поведения токовых линий от потенциала управляющего электрода и особенностей геометрии эксперимента;
3. Исследовать влияние спин-орбитального взаимодействия Рашбы на проводимость и поляризационные свойства двумерной крестообразной структуры:
- а) изучить зависимости поляризационных свойств рассеянного электрона от энергии Ферми при условии, что падающий электрон был не поляризован;
 - б) провести анализ зависимости азимутальной асимметрии в процессе рассеяния поляризованного электрона; вычислить соответствующее сопротивление Холла (отношение возникающей разности потенциалов перпендикулярно направлению тока к силе тока).

Научная новизна и практическая ценность. Основные теоретические результаты, изложенные в диссертационной работе, сформулированные

в защищаемых положениях и выводах определяют научную новизну диссертационных исследований.

Впервые систематически, методами компьютерного моделирования, были исследованы осцилляции Ааронова-Бома в двумерных системах. Показано, что в двумерных кольцах даже в простой одночастичной модели без учёта примесей, кулоновских и спин-орбитальных взаимодействий, осцилляции проводимости Ааронова-Бома становятся непериодичнымим. Область квазипериодических осцилляций зависит от соотношения между четырьмя характерными масштабами: шириной рукавов кольца, радиусом кольца, магнитной длиной и длиной волны Ферми.

Показано, что в двумерных кольцах при некоторых значениях энергии Ферми и магнитного поля образуются связанные состояния в континууме (ССК). При исследовании этих ССК впервые применён метод эффективного гамильтониана. Показано, что матрица рассеяния неаналитически зависит от физических параметров в точке ССК, а вид волновой функции зависит от пути в пространстве параметров, по которому система приближается к точке ССК.

Предложено объяснение возникновению неожиданных результатов при наблюдении осцилляций проводимости в интерференционном *double-slit* эксперименте А. Yacoby *et al* (А. Yacoby, M. Heiblum, V. Umansky, H. Shtrikman, D. Mahalu. Unexpected periodicity in an electronic double slit interference experiment. // Phys. Rev. Lett. **73**, №23, 3149-3152 (1994)). При численном исследовании свойств структуры, моделирующей эксперимент, были обнаружены многократные отражения от стенок структуры, интерферирующие с прямыми волнами. При этом токовые линии начинают сильно отличаться от прямых линий, что и является причиной того, что простая одномерная формула, используемая при обработке результатов эксперимента, перестаёт адекватно описывать свойства системы.

Теоретически исследована двумерная четырёхтерминальная система с учётом спин-орбитального взаимодействия Рашбы. Показано, что спин-орбитальное взаимодействие Рашбы в двумерных проводниках может приводить к возникновению разности потенциалов перпендикулярно направлению тока. То есть, к эффекту, подобному эффекту Холла.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинаре отдела теоретической физики и на конференции молодых учёных. По результатам диссертации опубликовано 6 работ.

Личный вклад автора состоит в разработке численных схем, моделирующих электронный транспорт в двумерных структурах, составлении компьютерных программ, получении и анализе численных результатов, сопоставлении результатов с аналитическими решениями, которые, как правило, могут быть получены в одномерных моделях.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объём работы составляет 112 страниц, включающих 34 рисунка и список литературы из 108 наименований.

II. ОБЗОР СОДЕРЖАНИЯ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели исследования, показана научная новизна и практическая значимость результатов работы, описана структура диссертации.

В первой главе проводится краткий обзор экспериментальных и теоретических работ по изучению квантовых интерференционных эффектов, исследованию которых посвящена диссертационная работа. Описываются характерные масштабы длины в твёрдотельных устройствах, связанных с проводимостью. Объясняется возникновение эффективных размерностей и масштабного квантования. Приводится формализм Буттикера-Ландауера, используемый для нахождения проводимости. Также в первой главе проводится краткий обзор эффектов, связанных со спин-орбитальным взаимодействием Рашибы в двумерных устройствах. Описывается суть эффекта осцилляций проводимости Ааронова-Бома, приводится краткий обзор литературы по осцилляциям Ааронова-Бома в одномерных и двумерных кольцах. Обсуждается эксперимент, проведённый группой А.Уасобу, по наблюдению интерференции электрона на экране с двумя щелями. Делается краткий обзор эффекта связанного состояния в континууме.

Во второй главе описывается методика численного моделирования. Формулируется математическая постановка задачи. Приведены решаемое уравнение и управляющие параметры в безразмерном виде. В явном виде записаны матрица рассеяния и проводимость системы. Введены понятия траекторий Бома или линий тока, а также способ описания системы с помощью эффективного Гамильтониана.

Основными особенностями математической модели являются следующие: решается двумерная стационарная задача рассеяния квантовой частицы со спином $1/2$ (электрона); исследуются зависимости решения задачи рассеяния

от параметров (энергии Ферми, магнитного поля, геометрии и т.д.); используется одночастичное нерелятивистское приближение; влияние температуры не учитывается; геометрические границы двумерного устройства моделируются в приближении *hard wall* (условия Дирихле на границах); потенциал внутри структуры полагается равным нулю; для численных расчётов используется метод конечных разностей на квадратной решётке; магнитное поле учитывается с помощью подстановки Пайерлса.

При исследовании систем, описанных в главах 3 и 4 спин-орбитальное взаимодействие не учитывается. Пятая глава посвящена изучению систем со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы в ограниченной области рассеяния. Влияние на транспортные свойства магнитного поля, перпендикулярного плоскости структуры, исследовалось только при изучении кольцевых структур (глава 3).

Третья глава посвящена особенностям транспортных свойств кольцевых структур. А именно – осцилляциям Ааронова-Бома и связанным состояниям в континууме в двумерных кольцах.

При решении задачи о транспорте электрона в магнитном поле через одномерное кольцо оказывается, что проводимость устройства периодична по магнитному полю. Причём период осцилляций проводимости равен магнитному полю, соответствующему одному кванту магнитного потока $\Phi_0 = \frac{2\pi\hbar c}{|e|}$ через площадь кольца. Этот эффект осцилляций проводимости в магнитном поле известен как эффект Ааронова-Бома [4]. В экспериментах по наблюдению осцилляций Ааронова-Бома (ОАБ) в двумерных нанокольцах при большом отношении площади к площади кольца наблюдаются нерегулярные осцилляции проводимости. Предположение Альтшулера [9] о примесном происхождении наблюдаемой неперодичности подтвердилось плохо, так как теория предсказывает полное исчезновение основной гармоник в пределе "грязного" проводника.

В статье [10] Дуглас Стоун отметил, что в реальных экспериментах магнитное поле существует не только внутри кольца, но и в рукавах. Поэтому электроны проходящие по внутреннему и внешнему периметру приобретают разную фазу от магнитного поля, так как траектории захватывают разный магнитный поток. Соответственно, фундаментальный период ОАБ будет наблюдаться только в случае если отношение площади дырки к площади рукавов будет существенно больше единицы.

Рассуждение Стоуна верно, однако в этом рассуждении пропущен ещё один масштаб длины – длина волны Ферми. Важность этого масштаба для

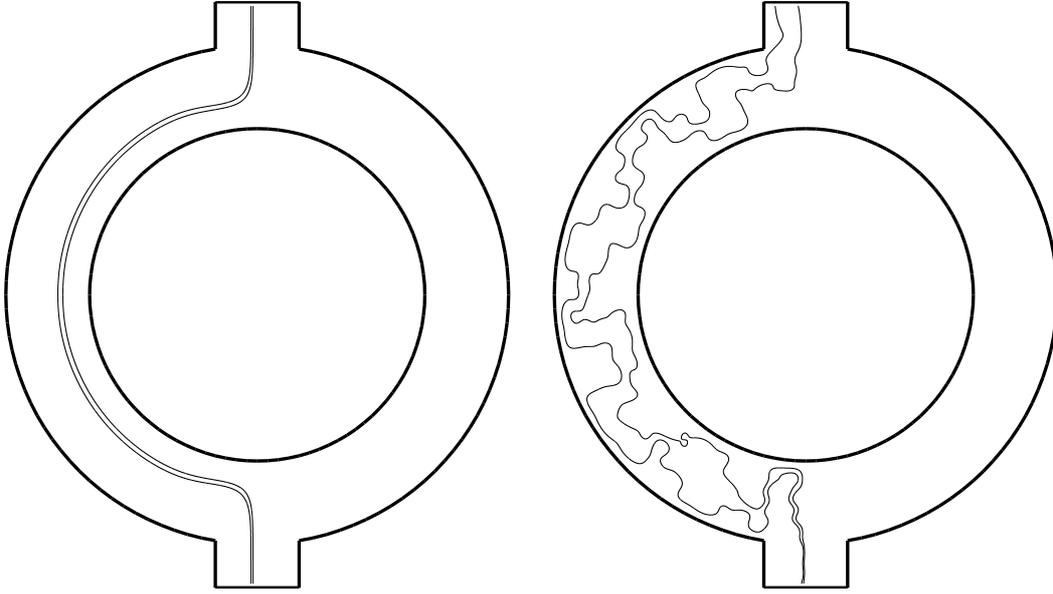


Рис. 1: Линии тока при энергиях $\epsilon = 20$ (одноканальный режим) слева $\epsilon = 200$ (четырёхканальный режим) справа.

регулярности осцилляций Ааронова-Бома подтверждаются следующими рассуждениями. В условиях, когда длина волны Ферми много меньше, чем ширина рукавов кольца в картине тока через устройство неизбежно возникают множественные вихревые структуры. Область ядра вихря недоступна для тока проводимости вследствие закона сохранения вероятности, поэтому возникает неустойчивость токовых линий к начальным условиям – две близкие траектории могут расходиться на значительные расстояния и, соответственно, захватывать разные магнитные потоки. При этом даже малое изменение магнитного поля приводит к перестройке вихревой структуры тока. С другой стороны в сильном магнитном поле (когда диаметр классической орбиты $D_B = 2k_F L_B = 2\frac{\sqrt{2m^* E} c}{eB}$ (L_B – магнитная длина) меньше ширины рукавов) в проводимости преобладают краевые эффекты – эффективная ширина рукавов кольца уменьшается, что приводит к регуляризации осцилляций.

Численные исследования эффекта осцилляций проводимости Ааронова-Бома подтвердили приведённые выше рассуждения (рис. 1). Область регулярных осцилляций зависит от соотношения между четырьмя характерными масштабами: шириной рукавов кольца, средним радиусом кольца, магнитной длиной и длиной волны Ферми.

Обычно решения уравнения Шрёдингера с локальным потенциалом

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(x) \right] \psi(x) = E\psi(x),$$

$\lim_{x \rightarrow \infty} V(x) = 0$, являются дискретными для отрицательных энергий и непрерывными для положительных энергий. Соответственно решения являются локализованными или связанными для $E < 0$ и размазанными по всему пространству для $E > 0$. В 1929 г. фон Нейман и Вигнер [11] предположили, что могут существовать и дискретные положительные уровни энергии с локализованными собственными функциями. Ими были найдены ряд конкретных потенциалов, имеющих связанные состояния в континууме (ССК).

Закрытая квантовая система характеризуется дискретным спектром собственных энергий и набором собственных состояний. "Открытие" квантовой системы за счет присоединения к нему электронных волноводов с заданной зоной проводимости приводит к тому, что та часть собственных состояний закрытой квантовой системы, спектр которых принадлежит зоне проводимости, становятся делокализованными. Формулировка ССК состоит в восстановлении связанных состояний с дискретными энергиями, расположенными в зоне проводимости волноводов. Обширный анализ показал, что такие состояния могут существовать при определенных значениях спектра закрытой системы, варьирование которого легко осуществить изменением потенциала, изменением приложенного магнитного поля или настройкой других физических параметров системы.

Исследования точно решаемой задачи о квантовом транспорте электрона через одномерное кольцо показали наличие особых точек в пространстве параметров энергия-магнитное поле. В этих особых точках волновая функция рассеяния становится неоднозначной и приобретает вид $\psi = \alpha f + \psi_p$, где α – произвольный коэффициент, ψ_p – транспортное решение, а f – решение уравнения Шрёдингера, локализованное только внутри кольца (решения f и ψ_p ортогональны). В окрестности особых точек волновая функция рассеяния однозначно определена и имеет два главных вклада: от решений f и ψ_p . Причём предел волновой функции рассеяния ψ при стремлении параметров к особой точке равен $\alpha f + \psi_p$, но коэффициент α теперь определяется однозначно и зависит от пути в пространстве параметров по которому берётся предел.

Задачу о транспорте через двумерное кольцо невозможно решить аналитически, поэтому для исследования был применён метод эффективного Гамильтониана. Получаемые при этом уравнения очень похожи на уравнения в

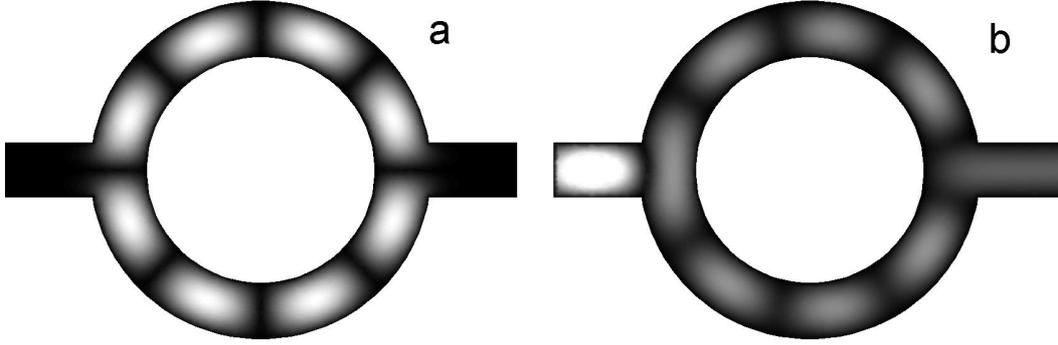


Рис. 2: Модуль волновой функции локализованного (слева) и транспортного (справа) решения уравнения Шрёдингера для открытого кольца.

одномерном кольце. Точно также в особых точках волновая функция рассеяния становится неоднозначной с произвольным коэффициентом α , локализованным и транспортным решением уравнения Шрёдингера (рис. 2). Наше рассмотрение показывает, что ССК является собственным вектором неэрмитового эффективного Гамильтониана H_{eff} и соответствующее собственное значение в этой точке становится реальным и совпадает с энергией падающей частицы.

В **четвёртой главе** обсуждаются результаты эксперимента группы А. Ясубу [6] в двумерной полупроводниковой структуре по наблюдению интерференции электрона через экран с двумя щелями.

В этом эксперименте управление разностью фаз интерферирующих траекторий осуществлялось с помощью приложенного потенциала на электрод, расположенный вблизи одной из щелей экрана (рис. 3). При квазиклассическом, одномерном рассмотрении прохождения электрона через структуру, разность фаз интерферирующих путей равна $\Delta\phi = w(k_F - k'_F) = wk_F [1 - \sqrt{1 - (V_g/V_{dep})}]$. Здесь w – ширина электрода, k'_F и k_F – волновой вектор Ферми под электродом и в остальной области образца соответственно, а V_{dep} – потенциал на электроде необходимый, чтобы достигнуть нулевого значения k'_F под электродом. Если рисовать зависимость проводимости устройства не от значения приложенного потенциала, а от величины $N_v = \frac{\Delta\phi}{2\pi}$, то должны получиться осцилляции с периодом 1.

Действительно, в эксперименте [6] наблюдались осцилляции проводимости, но фурье анализ этого периодического сигнала показал наличие низкочастотной компоненты – примерно в два раза ниже основной гармоники. В своей статье [6] авторы рассмотрели некоторые возможные механизмы такого поведения (геометрические эффекты, влияние более высоких подзон, спин-

орбитальное взаимодействие), и пришли к заключению, что не один из них не может претендовать на объяснение наблюдаемого эффекта.

Квазиклассический метод исследования двумерных систем на основе одномерных траекторий очень прост и показал свою полезность в ряде работ. Тем не менее, геометрия, используемая в эксперименте группы А. Уасобу, сложна и остаются сомнения в правомерности применения подобного подхода. Поэтому было проведено исследование зависимости проводимости образца от напряжения на управляющем электроде методом численного моделирования. С помощью линий тока вероятности – квантового аналога понятия траектории – стало возможным качественно оценить какой вклад вносит каждая траектория в проводимость образца и законность приведённой выше одномерной формулы.

Проведённый численный эксперимент показал, что для справедливости квазиклассической формулы очень важно, чтобы энергия отражённых от стенок устройства волн сразу отводилась в стоковые контакты. В противном случае отражённые волны интерферируют с прямыми, что приводит к значительному искривлению линий тока и одномерное приближение перестаёт работать.

В **пятой главе** показывается возможность появления в двумерных наноструктурах эффекта аналогичного эффекту Холла, но индуцированного не магнитным полем, а спин-орбитальным взаимодействием Рашбы.

Спин-орбитальное взаимодействие оказывает поляризующее воздействие на процесс рассеяния. Хорошо известно, что неполяризованный пучёк ядер, имеющих спин, становится поляризованным при рассеянии на ядре с нулевым спином. С другой стороны, поляризованный падающий пучёк теряет азимутальную симметрию в процессе такого рассеяния (см. [12], гл. 17). Аналогичные процессы можно ожидать и при прохождении электронов через двумерные наноструктуры. Одним из проявлений этого эффекта можно считать появление разности потенциалов поперек основного потока электронов – эффект, подобный эффекту Холла, но индуцированный спин-орбитальным

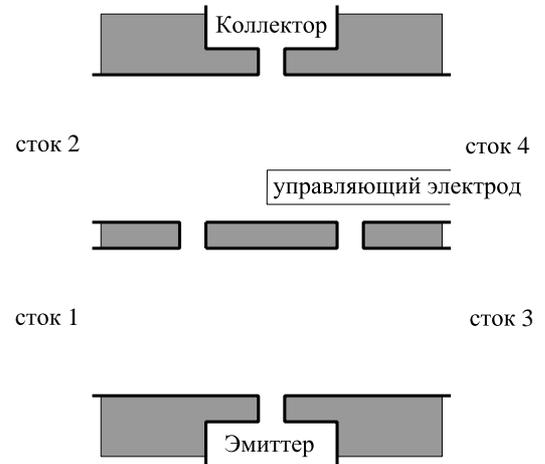


Рис. 3: Геометрия, моделирующая эксперимент группы А. Уасобу [6].

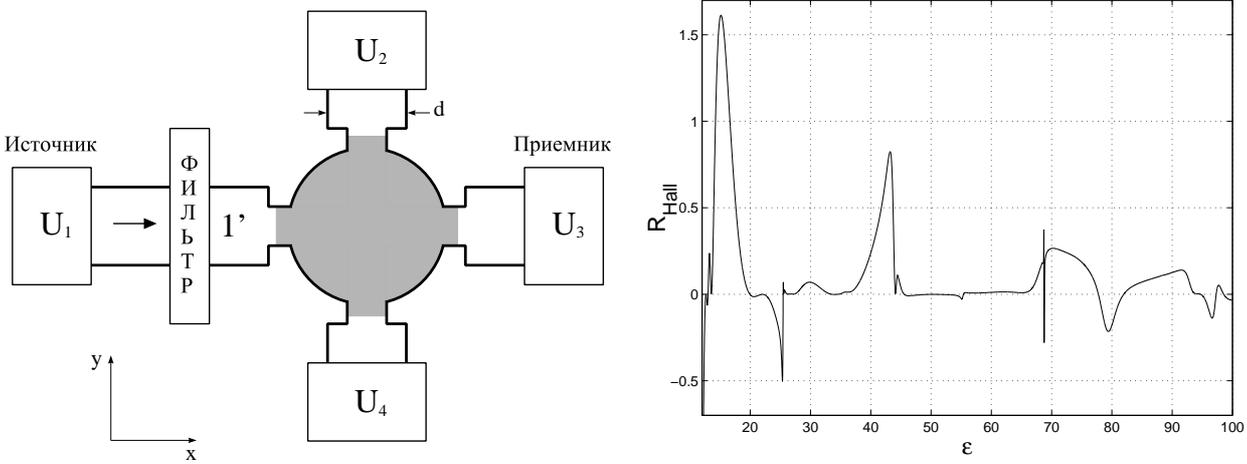


Рис. 4: Модифицированная геометрия слева (спин-орбитальное взаимодействие существует только в серой области) и зависимость сопротивления Холла (в единицах e^2/h) от энергии Ферми (в единицах $\hbar^2/2m^*d^2$, d – ширина волноводов) для электрона, поляризованного по оси z , справа.

взаимодействием.

Простейшим устройством для наблюдения эффекта поляризации изначально неполяризованного потока электронов и аналога эффекта Холла является крестообразная структура, состоящая из двух волноводов пересекающихся под прямым углом. Для этой структуры было вычислено сопротивление Холла – отношение возникающей разности потенциалов поперёк направлению тока к силе тока при условии, что на структуре рассеивается поляризованный электрон. Но при выборе параметров, соответствующих реальным в экспериментах на двумерных наноструктурах, значение сопротивления Холла оказалось малым – порядка $10^{-3}e^2/h$.

Для увеличения сопротивления Холла была предложена модифицированная геометрия (рис. 4 слева). В ней использованы: квантовые точечные контакты (QPC), позволяющие более ярко проявить асимметрию процесса рассеяния; круглая рассеивающая область (форма рассеивающей области способствует формированию квазисвязанных состояний с большим орбитальным моментом, то есть с большой пространственной неоднородностью). Как и ожидалось, сопротивление Холла увеличилось (см. рис. 4 справа).

В **заключении** сформулированы основные результаты работы и краткие выводы.

III. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ АВТОРОМ НА ЗАЩИТУ

Впервые систематически, методами компьютерного моделирования, исследованы осцилляции Ааронова-Бома в двумерных нанокольцах. На основе анализа данных, получены следующие результаты:

1. В реальных экспериментах по наблюдению осцилляций Ааронова-Бома в полупроводниковых гетероструктурах рукава колец имеют конечную ширину, сравнимую с радиусом кольца, а магнитное поле проникает также и в рукава кольца. В теоретически исследуемой модели указанные особенности проявляются прежде всего в том, что электронный транспорт становится многоканальным и электронные траектории могут захватывать разный магнитный поток. Это приводит к тому, что разность фаз интерферирующих путей становится сложной, непериодической функцией магнитного поля, а осцилляции проводимости Ааронова-Бома перестают быть периодическими.
2. В случае, когда длина волны Ферми больше ширины рукавов кольца, осцилляции Ааронова-Бома остаются квазипериодическими во всём диапазоне изменений магнитного поля.
3. При увеличении числа каналов, участвующих в транспорте, картина токовых линий в образце претерпевает переход от ламинарного течения тока к возникновению решётки вихрей и, далее, к хаотической вихревой структуре. Из-за образования множества вихрей линии тока вероятности электрона становятся неустойчивы к начальным условиям. При этом включение даже малого магнитного потока приводит к существенной деформации структуры токовых линий. Всё это служит причиной того, что даже близкие интерферирующие пути в кольце приобретают разную добавочную фазу от магнитного поля, что и приводит к нерегулярным ОАБ.

При рассмотрении связанных состояний в континууме (ССК) в двумерных кольцах впервые применён метод эффективного гамильтониана. С его помощью получены следующие результаты:

1. Показано, что связанные состояния в континууме соответствуют дополнительному вырождению: в непрерывном энергетическом спектре появляется уровень, принадлежащий дискретному спектру задачи. Показано,

что матрица рассеяния неаналитически зависит от физических параметров (энергии и магнитного поля) в точке ССК.

2. Показано, что вблизи точки ССК в пространстве параметров волновая функция главным образом состоит из суперпозиции частного, нелокализованного решения уравнения Шрёдингера и решения, ортогонального континууму и, поэтому, локализованного в области рассеяния.
3. Численными методами исследованы области в пространстве параметров, близкие к точке ССК в двумерных кольцах в одноканальном режиме. Получены зависимости коэффициентов суперпозиции главных составляющих в волновой функции.

Предложено объяснение возникновению неожиданных результатов при наблюдении осцилляций проводимости в интерференционном *double-slit* эксперименте А. Уасобу *et al* [6]. В процессе исследования выяснилось, что:

1. При анализе результатов численного моделирования эксперимента А. Уасобу также, как и в реальном эксперименте, появилось несоответствие между вычисленным значением проводимости и предсказаниями, основанными на одномерном рассмотрении системы.
2. Были численно исследованы несколько геометрий, моделирующих эксперимент группы А. Уасобу. Показано, что использование экрана существенно меняет зависимость проводимости от потенциала на управляющем электроде по сравнению с предсказаниями одномерной формулы.
3. Показано, что из-за многократных отражений от стенок структуры токовые линии начинают сильно отличаться от прямых линий, что и является причиной того, что простая одномерная формула перестаёт адекватно описывать свойства системы.

При исследовании квантового транспорта через двумерную крестообразную структуру с учётом спин-орбитального взаимодействия Рашбы выяснилось:

1. Спин-орбитальное взаимодействие Рашбы в двумерных проводниках может приводить к возникновению разности потенциалов перпендикулярно направлению тока. То есть, к эффекту, подобному эффекту Холла, но в отсутствии магнитного поля.

2. Сопротивление Холла имеет ярко выраженные пики в областях, близких к значениям энергий квазисвязанных состояний. Вблизи резонансов происходит значительная перестройка волновой функции, что приводит к появлению сильных токов внутри системы и усилению асимметрии процесса рассеяния.
3. Показано, что максимальное сопротивление Холла можно значительно увеличить, если модифицировать геометрию системы: использовать квантовые точечные контакты и форму области рассеяния, благоприятствующую возникновению большого орбитального момента (то есть сильной азимутальной неоднородности).

IV. КРАТКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Показана важность значения длины волны Ферми для регулярности осцилляций Ааронова-Бома (ОАБ). При уменьшении длины волны Ферми, картина токовых линий в образце претерпевает переход от ламинарного течения тока к возникновению решётки вихрей и, далее, к хаотической вихревой структуре. Из-за образования множества вихрей линии тока вероятности электрона становятся неустойчивы к начальным условиям. При этом включение даже малого магнитного потока приводит к существенной деформации структуры токовых линий. Всё это служит причиной того, что даже близкие интерферирующие пути в кольце приобретают разную добавочную фазу от магнитного поля, что и приводит к нерегулярным ОАБ.
2. Для двумерного кольца на основе формализма эффективного гамильтониана рассмотрены связанные состояния в континууме. Показано, что такие состояния являются собственными состояниями эффективного гамильтониана с вещественными собственными значениями. Связанные состояния локализованы внутри структуры, ортогональны распространяющимся состояниям континуума и, поэтому, могут быть добавлены с произвольным коэффициентом к транспортному решению, не изменяя матрицу рассеяния. При этом конкретный вид волновой функции электрона зависит от пути в пространстве параметров, по которому система приближается к точке связанного состояния в континууме.
3. Исследования методами компьютерного моделирования показали, что неожиданные результаты при анализе осцилляций проводимости в интерференционном *double-slit* эксперименте группы А. Уасобу (А. Уасобу,

М. Heiblum, V. Umansky, H. Shtrikman, D. Mahalu. Unexpected periodicity in an electronic double slit interference experiment. // *Phys. Rev. Lett.* **73**, №23, 3149-3152 (1994)), являются следствием неприменимости одномерной модели из-за специфической геометрии эксперимента.

4. Показано, что спин-орбитальное взаимодействие Рашбы в двумерных мезоскопических структурах может приводить к эффекту, аналогичному эффекту Холла, но в отсутствии магнитного поля.
5. Показано, что в случае использования точечных квантовых контактов величину сопротивления Холла, индуцированного спин-орбитальным взаимодействием, можно значительно увеличить.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. К.Н. Пичугин, А.Ф. Садреев. Нерегулярные осцилляции Ааронова-Бома в кольцах с конечной шириной. // *ЖЭТФ.*- 1996.- Т.109, №2.- С.546-561.
2. K.N. Pichugin, A.F. Sadreev. Irregular Aharonov-Bohm oscillations of conductance in two-dimensional rings. // *Phys. Rev. B* **56**, №15, 9662-9673 (1997).
3. A.-P. Jauho, K.N. Pichugin, A.F. Sadreev. Simulations of interference effects in gated two-dimensional ballistic electron systems. // *Phys. Rev. B* **60**, №11, 8191-8198 (1999).
4. E.N. Bulgakov, K.N. Pichugin, A.F. Sadreev, P. Středa, P. Šeba. Hall-Like Effect Induced by Spin-Orbit Interaction. // *Phys. Rev. Lett* **83**, №2, 376-379 (1999).
5. K. Pichugin, P. Středa, P. Šeba, A. F. Sadreev. Resonance behaviour of the Hall-like effect induced by spin-orbit interaction in a four-terminal junction. // *Physica E* **6**, №1-4, 727-730 (2000).
6. E.N. Bulgakov, K.N. Pichugin, A.F. Sadreev, and I. Rotter, Bound states in the continuum in open Aharonov-Bohm rings. // *Письма в ЖЭТФ.*- 2006.- Т.84, №8.- С.508-513.

Список цитируемой литературы

- [1] H. Sakaki. *Molecular Beam Epitaxy for the Formation of Nanostructures* in Physics of nanostructures, ed. J.H. Davies, A.R. Long, pp.1-20 (1992).
- [2] F. Sols, M. Macucci, V. Ravoili and K. Hess. On the possibility of transistor action based on quantum interference phenomena. // *Appl. Phys. Lett.* **54**, №4, 350-352 (1989); Theory for a quantum modulated transistor. // *J. Appl. Phys.* **66**, №6, 3892-3906 (1989).
- [3] F.A. Buot. Mesoscopic physics and nanoelectronics: nanoscience and nanotechnology. // *Phys. Rep.* **234**, 73-174 (1993).
- [4] Y. Aharonov and D. Bohm. Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory. // *Phys. Rev.* **115**, 485-491 (1959).
- [5] A. Yacoby, U. Sivan, C.P. Umbach, J.M.Hong. Interference and dephasing by electron-electron interaction on length scales shorter than the elastic mean free path. // *Phys. Rev. Lett.* **66**, №14, 1938-1941 (1991).
- [6] A. Yacoby, M. Heiblum, V. Umansky, H. Shtrikman, D. Mahalu. Unexpected periodicity in an electronic double slit interference experiment. // *Phys. Rev. Lett.* **73**, №23, 3149-3152 (1994).
- [7] Х.-Ю. Штокман, *Квантовый хаос: введение*. - Москва: Физматлит, 2004.- 376с.
- [8] S. Datta and B. Das. Electronic analog of the electro-optic modulator. // *Appl. Phys. Lett.* **56**, 665-667 (1990).
- [9] Б.Л. Альтшулер, А.Г. Аронов, Б.З. Спивак. Эффект Ааронова-Бома в неупорядоченных проводниках. // *Письма в ЖЭТФ*.- 1981.- Т.33, №2.- С.101-103.
- [10] A.D. Stone. Magnetoresistance fluctuations in mesoscopic wires and rings. // *Phys. Rev. Lett.* **54**, №2, 2692-2695 (1985).
- [11] J. von Neumann and E. Wigner. Über merkwürdige diskrete Eigenwerte. // *Phys. Z.* **30**, 465-467 (1929).
- [12] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Квантовая механика (нерелятивистская теория)*. - Москва: Наука, 1974.- 768с.

Подписано к печати 11.05.2007
Тираж 70 экз., у.-п.л.:1. Заказ №32

Отпечатано в типографии Института физики СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, ИФ СО РАН