

На правах рукописи



Стрыгин Иван Сергеевич

**Магнетотранспортные явления в гетероструктурах
GaAs/AlAs с латеральной периодической модуляцией**

Специальность 01.04.10 —
«физика полупроводников»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: Быков Алексей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Вальков Валерий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук — обособленное подразделение ФИЦ, главный научный сотрудник

Лавров Александр Николаевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится «08» октября 2019 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук: <https://www.isp.nsc.ru/institut/dissertatsionnyj-sovet/zasedaniya/strygin-ivan-sergeevich>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Погосов Артур Григорьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Системы с двумерным электронным газом (ДЭГ) исследуются уже более полувека. Интерес к этим системам связан прежде всего с важностью фундаментальных физических явлений, наблюдаемых в таких системах, а также с возможностью их практического применения. Наиболее эффективным методом исследования этих систем остаются низкотемпературные магнетотранспортные измерения. Одной из первых систем с ДЭГ является кремниевый МОП транзистор, служащий основой для современной микроэлектроники. Именно в нем были обнаружены, ставшие уже классическими, эффект Шубникова-де Гааза (ШдГ) в ДЭГ [1] и квантовый эффект Холла [2]. Дальнейшее развитие технологий привело к созданию высокоподвижного ДЭГ на основе гетероперехода GaAs/AlGaAs. В таких структурах был открыт дробный квантовый эффект Холла [3], и они стали активно применяться в высокочастотной микроэлектронике.

Открытие целочисленного и дробного квантовых эффектов Холла пробудило интерес исследователей к изучению двумерных систем в сильных квантующих магнитных полях, когда под уровнем Ферми ε_F находится всего несколько уровней Ландау. В таких системах ширина уровней Ландау $\Gamma = \hbar/\tau_q$ меньше расстояния $\hbar\omega_c$ между ними, что соответствует условию $\omega_c\tau_q \gg 1$. Здесь τ_q — квантовое время жизни, ω_c — циклотронная частота. Долгое время именно такие двумерные системы являлись основным объектом исследований.

Около двадцати лет назад фокус внимания исследователей сместился в область магнитных полей, когда ниже уровня Ферми лежит большое количество уровней Ландау, а фактор заполнения $N = 2\varepsilon_F/\hbar\omega_c \gg 1$. В таких системах ширина уровней Ландау сравнима с расстоянием между ними ($\omega_c\tau_q \lesssim 1$). Однако первые значимые магнетотранспортные явления в системах с большими факторами заполнения были открыты значительно раньше. Одним из таких явлений являются соизмеримые осцилляции (СО) сопротивления в одномерном периодическом потенциале [4].

Данные осцилляции периодичны в обратном магнитном поле, а положение их максимумов определяется через период сверхрешетки a соотношением $2R_c/a = (i + 1/4)$, где R_c — циклотронный радиус, i — целое число. Было показано, что возникновение СО может быть объяснено как с точки зрения квазиклассики, так и с помощью квантовой механики. Квазиклассическое обоснование было дано в работе [5], и заключается оно в возникновении резонанса между движением электронов по циклотронной орбите и движением в электрическом поле, которое появляется при введении в систему периодического потенциала. Квантовомеханическая интерпретация объясняет наличие СО снятием вырождения уровней Ландау

по отношению к координате центра орбиты [6; 7]. Это приводит к возникновению зон Ландау. Ширина зон Ландау меняется в зависимости от значения магнитного поля. Она равна нулю в минимумах CO и принимает максимальное значение в максимумах CO .

В работе [8] исследовалось влияние зон Ландау на осцилляции ШдГ. Появление зон Ландау в этой работе было обусловлено одномерной модуляцией магнитного поля. Было установлено, что амплитуда осцилляций ШдГ возрастает там, где ширина зон Ландау равна нулю. В то же время осцилляции ШдГ подавлены при значениях магнитных полей, соответствующих максимальной ширине зон Ландау. Данный эффект, однако, не является специфическим для зон Ландау, которые возникли благодаря модуляции магнитного поля. Позднее в работе [9] было показано, что в одномерном периодическом потенциале амплитуда осцилляций ШдГ также увеличивается в минимумах CO и уменьшается в максимумах.

CO были также обнаружены и в двумерной электронной системе в квадратной решетке антиоточек [10]. Однако в отличие от CO , наблюдаемых в одномерном периодическом потенциале, CO в антиоточечной системе по сей день объясняются только с точки зрения квазиклассики. CO в таких системах обусловлены возникновением пиннигованных орбит и убегающих траекторий в классически сильных магнитных полях, которые вносят вклад в появление соизмеримых максимумов сопротивления [11; 12].

Спустя почти десятилетие после открытия CO сопротивления, были обнаружены гигантские осцилляции магнетосопротивления (ГОМ, ω/ω_c - осцилляции), индуцированные микроволновым полем [13]. Именно открытие ГОМ пробудило массовый интерес к исследованию двумерных систем с большими факторами заполнения [14]. Вскоре было показано, что сопротивление в минимумах ГОМ может принимать и значение близкое к нулевому [15].

Затем был открыт ряд нелинейных магнетотранспортных явлений, возникающих в присутствии постоянного внешнего поля E . При больших значениях поля, когда $eER_c \gg \hbar\omega_c$, возникает туннелирование Зинера (ТЗ) между уровнями Ландау. Оно приводит к возникновению осцилляций магнетосопротивления [16]. При $\omega_c\tau_{tr} \gg 1$, где τ_{tr} — транспортное время релаксации, выполняется условие $\sigma_{xy} \gg \sigma_{xx}$. Поэтому в образцах с геометрией мостика Холла ТЗ обеспечивается полем Холла E_H , а не тянущим полем E_x , поскольку $E_H \gg E_x$ при $\sigma_{xy} \gg \sigma_{xx}$. Когда значение электрического поля мало и ТЗ невозможно, то наблюдаются явления, связанные с энергетическими переходами электронов внутри одного уровня Ландау. К таким явлениям относят состояния с нулевым дифференциальным сопротивлением [17].

Большая часть магнетотранспортных явлений в системах как с большими, так и с малыми факторами заполнения, была открыта в высокоподвижном ДЭГ, полученном на основе гетероперехода GaAs/AlGaAs.

Высокая подвижность носителей в гетеропереходе GaAs/AlGaAs достигается за счет пространственного разделения ДЭГ и области легирования. Это приводит к подавлению рассеяния на примесном потенциале и, как следствие, к увеличению подвижности. Однако такой подход имеет свой недостаток. Чем больше расстояние между ДЭГ и легирующим слоем, тем больше подвижность носителей, однако тем меньше их концентрация в яме. Поэтому для таких структур невозможно получить одновременно высокие значения подвижности и концентрации, а ведь именно произведение этих параметров определяет проводимость системы. Также, при достижении определенного значения концентрации происходит заполнение второй подзоны размерного квантования, и электронный газ перестает быть двумерным.

Указанные выше недостатки были устранены в структуре, основанной на короткопериодной сверхрешетке (КПСР) GaAs/AlAs, предложенной в работе [18]. Отличительной особенностью этой структуры является наличие X -электронов, локализованных возле легирующих слоев кремния. X -электроны сглаживают рассеивающий потенциал ионизованных примесей, подавляя рассеяние и, тем самым, увеличивая подвижность. Это означает, что в такой структуре возможно достижение высоких значений подвижности и концентрации электронов одновременно, а следовательно, и более высоких по сравнению с GaAs/AlGaAs гетеропереходом значений проводимости. Заполнение второй подзоны размерного квантования можно контролировать, задавая нужную ширину центральной GaAs-ямы. Поэтому гетероструктура GaAs/AlAs является удобным объектом исследования фундаментальных магнетотранспортных явлений в высокоподвижном ДЭГ, значительно расширяющим экспериментальные возможности в данном направлении.

Несмотря на довольно активное изучение как магнетотранспортных явлений во внешних микроволновом и электрических полях, так и магнетотранспортных явлений, возникающих в периодическом потенциале, влияние периодического потенциала на неравновесные явления в ДЭГ до сих пор не изучено. Остаются открытыми вопросы о том, как возникновение зон Ландау в периодическом потенциале сказывается на ω/ω_c - осцилляциях и на осцилляциях, индуцированных внешним постоянным электрическим полем, а также о роли периодического потенциала в формировании состояний с нулевым сопротивлением и нулевым дифференциальным сопротивлением.

Целью данной работы является экспериментальное изучение магнетотранспортных явлений в одномерном периодическом потенциале в высокоподвижном ДЭГ на основе гетероструктуры GaAs/AlAs при больших факторах заполнения. Конкретными задачами являются установление роли одномерного периодического потенциала в формировании состояний с нулевым дифференциальным сопротивлением и состояний с нулевым

сопротивлением при облучении микроволновым полем, а также характеристика ω/ω_c - осцилляций и осцилляций, индуцированных полем Холла, в присутствии одномерного периодического потенциала.

Научная новизна работы. Обнаружены состояния с нулевым дифференциальным сопротивлением в ДЭГ с одномерным периодическим потенциалом, которые возникают в минимумах СО.

Установлено, что сильное электрическое поле существенно влияет на СО. Появляются узлы биений в которых фаза осцилляций меняется на π .

Показано, что под действием микроволнового излучения магнетосопротивление ДЭГ в минимумах СО изменяется существеннее, чем в максимумах. Показано также, что в минимумах СО под действием микроволнового поля наблюдаются состояния с нулевым сопротивлением.

Научная и практическая ценность работы. Показано, что квантовые ямы на основе гетероструктуры GaAs/AlAs, с нанесенной на поверхность образца металлической решеткой, могут быть использованы для изучения магнетотранспорта в одномерном периодическом потенциале. Решетки могут служить как для отражения света, который при попадании на открытые участки образца вызывает увеличение концентрации в этих областях, так и в качестве барьера Шотки. Оба способа приводят к пространственной модуляции концентрации и возникновению одномерного периодического потенциала.

Предложен способ вычисления квантового времени жизни τ_q в системах, где присутствуют одновременно одномерный периодический потенциал и внешнее постоянное электрическое поле.

Предложена модель, описывающая квантовое время жизни τ_q в системах с одномерной периодической модуляцией, позволяющая учесть влияние изменения ширины уровней Ландау на магнетотранспорт.

Методология и методы исследования заключаются в измерении магнетосопротивления образцов с геометрией мостика Холла с нанесенной латеральной металлической сверхрешеткой при низких температурах в линейном и нелинейном режимах, а также при наличии внешнего микроволнового излучения.

Положения, выносимые на защиту:

1. При больших факторах заполнения двумерный электронный газ с одномерной периодической модуляцией переходит в состояние с нулевым дифференциальным сопротивлением под действием внешнего постоянного электрического поля в минимумах соизмеримых осцилляций.
2. В двумерных электронных системах с одномерным периодическим потенциалом при больших факторах заполнения внешнее постоянное электрическое поле приводит к возникновению модуляции

соизмеримых осцилляций. Существуют значения магнитных полей, в которых фаза соизмеримых осцилляций изменяется на 180 градусов.

3. Модуль знакопеременного микроволнового фотосопротивления в двумерных электронных системах с одномерным периодическим потенциалом при больших факторах заполнения падает в максимумах соизмеримых осцилляций.
4. Индуцированные микроволновым полем состояния с нулевым сопротивлением в двумерных системах с одномерной периодической модуляцией потенциала при больших факторах заполнения наблюдаются в минимумах соизмеримых осцилляций.

Достоверность обеспечивается воспроизводимостью экспериментальных результатов работы на разных образцах и согласованностью экспериментальной картины, наблюдаемой в данной работе, с существующими теоретическими работами по данной тематике.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях

1. XIX Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников (Екатеринбург - Новоуральск, 20 - 25 февраля 2012 г.)
2. XX Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников (Екатеринбург - Новоуральск, 17 - 22 февраля 2014 г.)
3. XXII Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников (Екатеринбург - Алапаевск, 19 - 24 февраля 2018 г.)

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 8 работ [A1-A8], в том числе 5 журнальных статей.

Личный вклад автора заключался в участии в постановке задач, проведении экспериментов и самосогласованного расчета электростатического потенциала и волновых функций в гетероструктуре GaAs/AlAs, обработке и интерпретации экспериментальных результатов, написании научных статей и подготовки их к публикации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы. Работа изложена на 129 страницах текста, содержит 60 рисунков и список цитируемой литературы из 88 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, излагаются выносимые на защиту положения, дается краткая аннотация диссертационной работы.

Первая глава является обзорной и состоит из шести частей. Магнетотранспортные явления, рассматриваемые в данной главе, наблюдаются в

двумерных системах с большим фактором заполнения. Первая часть главы посвящена транспортным свойствам ДЭГ в магнитном поле. Вторая часть описывает способы получения ДЭГ в полупроводниковых структурах. В ней рассказывается о кремниевом МОП-транзисторе, о селективно-легированном гетеропереходе GaAs/AlGaAs и о селективно-легированной гетероструктуре GaAs/AlAs, которая была предложена в работе [18]. Излагаются особенности ДЭГ в каждой из этих структур. Объясняется, каким образом ДЭГ в гетероструктуре GaAs/AlAs позволяет получить большие значения проводимости по сравнению с традиционным гетеропереходом GaAs/AlGaAs.

В третьей части рассказывается про СО в одномерном латеральном периодическом потенциале. Впервые СО экспериментально обнаружены в работе [4]. Данные осцилляции, как и осцилляции ШдГ, периодичны в обратном магнитном поле, а их период зависит от периода a модуляции потенциала. Сразу же после обнаружения СО в работе [5] было дано квазиклассическое обоснование данного явления, а в работах [6; 7] квантовомеханическое, которое заключалось в возникновении зон Ландау и зонной проводимости в двумерной системе с одномерной модуляцией потенциала. Отмечено, что положение минимумов СО соответствует значениям магнитного поля, при которых ширина зон Ландау нулевая. В свою очередь, максимумы СО достигаются при максимальном значении ширины зон Ландау. В этой части помимо работ, посвященных изучению непосредственно СО, приводятся результаты экспериментального и теоретического исследования влияния одномерного периодического потенциала на осцилляции ШдГ. В заключении также кратко приводится содержание работ, посвященных исследованию СО сопротивления в системе с периодическим латеральным потенциалом в виде решетки из антиоточек.

Четвертая часть посвящена индуцированным микроволновым полем осцилляциям сопротивления. Рассмотрена работа [13], в которой авторы докладывают об осцилляциях сопротивления, наблюдаемых при облучении образцов с ДЭГ микроволновым полем. Период этих осцилляций определяется отношением ω/ω_c . В данной работе было предложено простое обоснование для наблюдаемого явления. Далее рассматривается работа [15], где показано, что сопротивление в минимумах ω/ω_c - осцилляций может достигать нулевого значения. В этой части также представлены различные теоретические модели, описывающие ω/ω_c - осцилляции. Среди них — работа [19], в которой предлагается модель, основанная на возникновении осциллирующей добавки к неравновесной функции распределения во внешнем электрическом и микроволновом полях. Эта модель объясняет возникновение ω/ω_c - осцилляций и хорошо описывает положение их максимумов и минимумов.

В пятой части рассмотрены нелинейные магнетотранспортные явления. Описан механизм ТЗ между уровнями Ландау, который приводит к

возникновению осцилляций сопротивления, индуцированных полем Холла [16]. Далее приводятся экспериментальные результаты исследования нелинейных явлений в слабых электрических полях. Среди них выделяется работа [17], в которой впервые экспериментально обнаружены состояния с нулевым дифференциальным сопротивлением. Что касается теоретических исследований в области нелинейного магнетотранспорта, то помимо работы [19], результаты которой релевантны в области слабых электрических полей, здесь также уделено внимание работе [20], где построена более полная теория, включающая в себя случаи слабых и сильных электрических полей.

Шестая часть содержит обзор научной литературы, посвященной исследованию неравновесных магнетотранспортных явлений в двумерных системах с латеральной периодической модуляцией. В обзоре показано, что в данный момент не обнаружено экспериментальных данных, касающихся исследования неравновесных явлений в одномерном латеральном периодическом потенциале. Существующие работы посвящены неравновесным магнетотранспортным явлениям в двумерной системе с периодической решеткой из антиоточек. Приведены примеры работ, где исследуется поведение ω/ω_c - осцилляций в таких системах, а также нелинейный магнетотранспорт.

В конце главы сформулированы научные задачи, на решение которых направлена диссертационная работа.

Вторая глава посвящена описанию технологического процесса изготовления образцов и методике экспериментов, используемых в данной работе. Глава состоит из четырех частей. Первая часть рассказывает о процессе выращивания гетероструктуры GaAs/AlAs, на основе которой изготавливались экспериментальные образцы. Для этого использовался метод молекулярно-лучевой эпитаксии, основные этапы которого описаны в этой части. Также приведено схематическое изображение разреза этой гетероструктуры. Вторая часть излагает технологическую процедуру изготовления холловских мостиков на основе гетероструктуры GaAs/AlAs. В этой части поэтапно описан процесс фотолитографии и жидкостного травления, с помощью которых создавались мезоструктуры, и кратко изложен процесс нанесения металлических решеток с помощью электронной литографии. Третья часть посвящена методике магнетотранспортных измерений при облучении образца с ДЭГ микроволновым полем, а также магнетотранспортных измерений в нелинейном режиме. В ней приведена схема экспериментальной установки и схема измерений. В четвертой части перечислены типы гетероструктур GaAs/AlAs, которые использовались для изготовления холловских мостиков, и их транспортные параметры: концентрация и подвижность носителей. Кроме того, приведены экспериментальные зависимости, которые показывают, как изменяется

транспортное время релаксации и квантовое время жизни в гетероструктуре GaAs/AlAs при увеличении концентрации электронов в яме.

В третьей главе описывается самосогласованный расчет уравнений Шредингера (УШ) и Пуассона (УП), для получения полной картины электростатического потенциала и волновых функций Γ - и X -электронов в гетероструктуре GaAs/AlAs. Глава состоит из пяти частей. В первой части приведен общий алгоритм решения самосогласованной задачи, показана связь между решениями уравнений Шредингера и Пуассона. Вторая часть посвящена численному решению УШ. Помимо алгоритма решения, здесь описывается проблематика постановки правильных граничных условий для численной задачи, а также приводится адаптированная для УШ разностная схема Рунге-Кутты, которая и использовалась при решении. В третьей части описывается методика численного расчета электростатического потенциала. Показано, что в виду неопределенности граничных условий для УП, следует использовать теорему Гаусса для нахождения потенциала. В четвертой части приведенные выше методики объединяются для решения самосогласованной задачи в контексте гетероструктуры GaAs/AlAs. Приведены способы оптимизации расчета, описана возможность использования аналитического решения УШ в областях КПСР. В пятой части показаны результаты самосогласованного расчета. Согласно результатам, уровень энергии размерного квантования для X -электронов лежит выше уровня Ферми. Это означает, что X -электроны действительно не образуют проводящий канал, а эффект экранировки рассеивающего потенциала X -электронами достигается за счет скопления X -электронов в локальных провалах потенциала.

Четвертая глава состоит из двух частей, и в ней приводятся результаты экспериментального изучения нелинейного магнетотранспорта в одномерном периодическом потенциале.

Первая часть этой главы посвящена результатам экспериментально-го исследования магнетотранспортных явлений в ДЭГ в слабом внешнем электрическом поле. Эксперименты проводились при температуре $T = 4.2$ К. Металлическая решетка с периодом $a = 400$ нм, нанесенная на образец для создания периодического потенциала, выступала в роли затвора. Изменение напряжения на затворе V_g , позволяло контролировать амплитуду периодической модуляции. Прежде всего было показано, что в образцах с нанесенной решеткой действительно наблюдаются СО при разных значениях затворного напряжения V_g (рис. 1). Более того, даже при $V_g = 0$ СО хорошо видны, поскольку само по себе нанесение металлической решетки на образец создает возмущение потенциала.

При протекании через образец постоянного тока величиной $I_{dc} = 25$ мкА и при нулевом затворном напряжении наблюдаются состояния с нулевым дифференциальным сопротивлением. На рис. 2 показано, что состояния с нулевым дифференциальным сопротивлением наблюдаются в

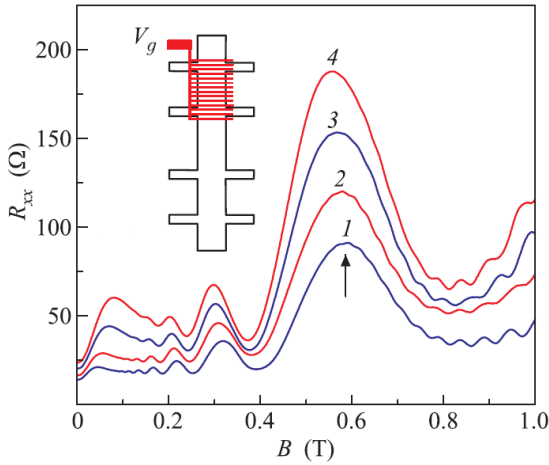


Рис. 1 — Зависимости сопротивления R_{xx} от B , измеренные на мостике с решеткой при $T = 4.2$ К для различных V_g : 1 — $V_g = -1.2$ В, 2 — $V_g = -1.325$ В, 3 — $V_g = -1.45$ В, 4 — $V_g = -1.525$ В. Стрелкой указано положение первого максимума СО. На вставке изображена упрощенная схема образца, на один сегмент которого нанесена латеральная решетка.

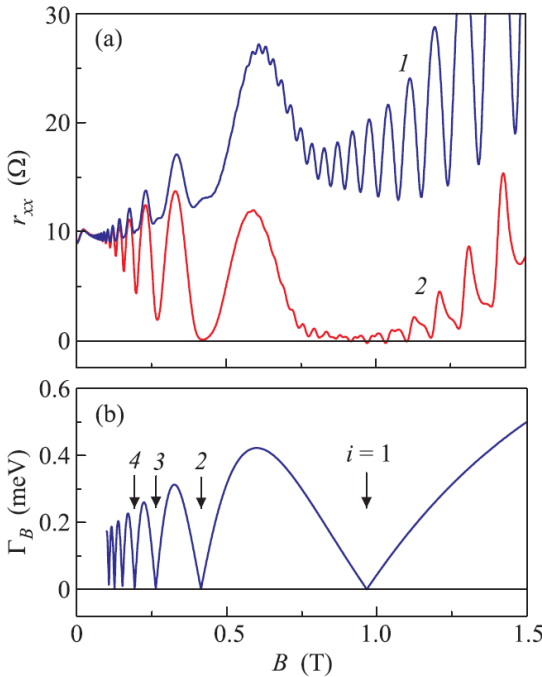
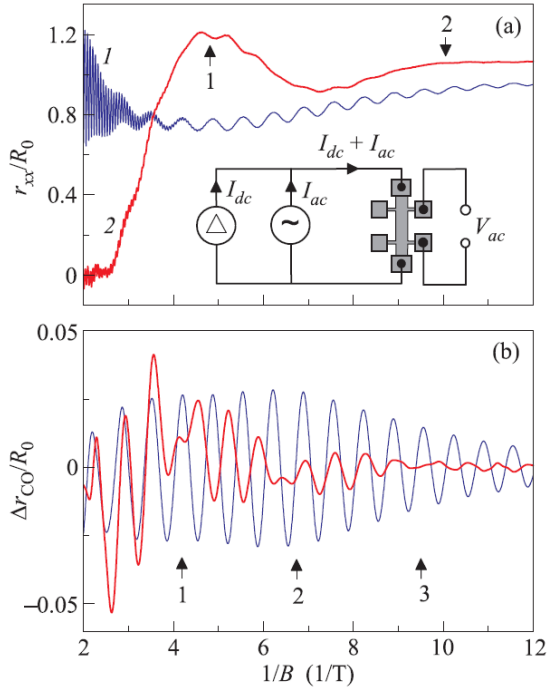


Рис. 2 — (а) — Зависимости дифференциального сопротивления $r_{xx}(B)$, измеренные при $T = 4.2$ К и $V_g = 0$ для образцов с латеральной сверхрешеткой при различных значениях постоянного тока I_{dc} : 1 — $I_{dc} = 0$, 2 — $I_{dc} = 25$ мкА. (б) — Расчетная зависимость ширины зон Ландау Γ_B . Стрелки указывают минимумы СО. $a = 400$ нм.

минимумах СО, что соответствует нулевой ширине зон Ландау. Установлено, что при подаче на затвор отрицательного напряжения эти состояния разрушаются. С помощью теории, представленной в работах [19; 21], показано, что данное поведение обусловлено уменьшением квантового времени жизни τ_q при увеличении амплитуды периодической модуляции. Для

Рис. 3 — (а) — Зависимость r_{xx}/R_0 от $1/B$, измеренная на мостике с решеткой при $T = 1.6$ К, для $I_{dc} = 0$ (кривая 1) и $I_{dc} = 80$ мкА (кривая 2). Стрелками указаны максимумы осцилляций, индуцированных полем Холла, с номерами 1 и 2. На вставке изображена схема измерения сопротивления $r_{xx} = V_{ac}/I_{ac}$. (b) — Зависимость вклада СО в дифференциальное сопротивление Δr_{CO} , нормированного на сопротивление Друде R_0 , от $1/B$ в образце с латеральной решеткой. Тонкая линия — $I_{dc} = 0$. Толстая линия — $I_{dc} = 80$ мкА. Стрелками указаны узлы биений.



определения τ_q использовались экспериментальные зависимости дифференциального сопротивления r_{xx} от величины постоянного тока I_{dc} при фиксированном значении магнитного поля, которое соответствовало минимуму СО. При таком значении магнитного поля ширина зон Ландау равна нулю, что делает возможным использование теории [19; 21], разработанной для описания нелинейных эффектов в ДЭГ, невозмущенном периодическим потенциалом.

Во второй части главы приведены результаты экспериментального изучения ТЗ между уровнями Ландау в ДЭГ с одномерным периодическим потенциалом. Экспериментальные данные (рис. 3(a)) были получены при температуре $T = 1.6$ К, а период металлической решетки составлял $a = 200$ нм. Установлено, что наличие сильного внешнего постоянного электрического поля приводит к модуляции СО. Этот результат изображен на рис. 3(b), где показана зависимость вклада СО в дифференциальное сопротивление Δr_{CO} , нормированного на сопротивление Друде R_0 , от $1/B$. На рис. 3(b) стрелками отмечены точки, где фаза осцилляций меняется на π .

Далее показывается, что подобные биения могут быть описаны в рамках существующей теории [20] для магнетотранспорта в сильных электрических полях, если ввести эффективное квантовое время жизни $\tau_q^* = \tau_q^0 J_0(2\pi V_B/\hbar\omega_c)$, где τ_q^0 — квантовое время жизни в ДЭГ, невозмущенном периодическим потенциалом, $|V_B|$ — полуширина зон Ландау. Подобное

предположение допустимо лишь тогда, когда функция Бесселя $J_0 > 0$, и для образцов, используемых в экспериментах, это условие выполняется при $B > 0.04$ Тл. В этом случае такая модуляция τ_q^0 приводит лишь к дополнительному уширению уровней Ландау. В качестве подтверждения обоснованности данного предположения приводятся результаты расчетной зависимости Δr_{CO} . При этом наблюдается хорошее совпадение между расчетной и экспериментальной кривыми.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию магнетотранспортных явлений в ДЭГ с одномерным периодическим потенциалом при облучении микроволновым полем. Глава состоит из двух частей.

В первой из них описано, как введение одномерного периодического потенциала влияет на сопротивление в присутствии микроволнового поля. Эксперименты проводились при температуре $T = 4.2$ К. Металлическая решетка имела период $a = 400$ нм. Было установлено, что в минимумах СО сопротивление изменяется существенно, чем в максимумах. При малых частотах микроволнового поля, когда ω/ω_c - осцилляции еще не наблюдались, фотосопротивление $\Delta\rho_{xx}^\omega = \rho_{xx}^\omega - \rho_{xx}$ имело лишь небольшие всплески в минимумах СО. Однако наиболее заметно влияние периодического потенциала на сопротивление было обнаружено при больших частотах. На рис. 4 изображены экспериментальные зависимости сопротивления в образце со сверхрешеткой при облучении микроволновым полем с частотой $\omega/2\pi = 142$ ГГц и без него. При отсутствии решетки облучение ДЭГ микроволновым полем на данной частоте также вызывает появление ω/ω_c - осцилляции. Как видно из рис. 4, ω/ω_c - осцилляции промодулированы таким образом, что в минимумах СО сопротивление изменяется существенно, его значение стремится достичь величины сопротивления ω/ω_c - осцилляций в исходном ДЭГ. При этом в максимумах СО значение сопротивления остается практически неизменным.

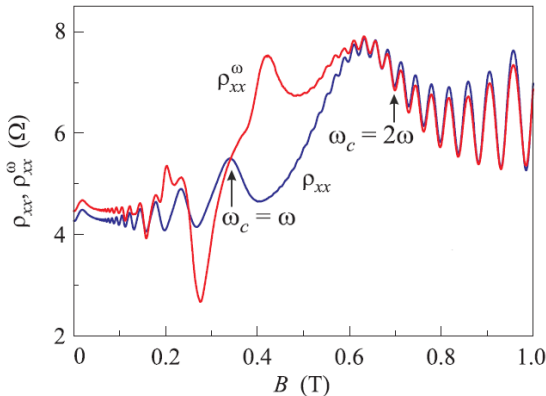
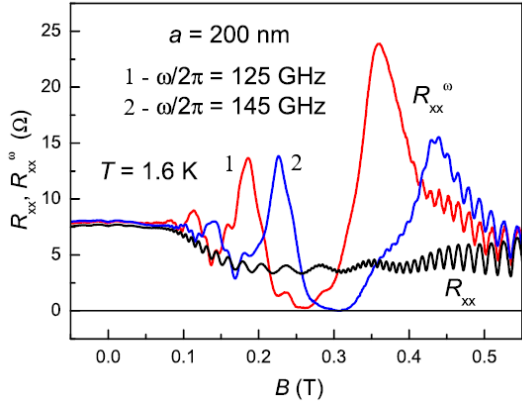


Рис. 4 — Зависимости сопротивления, измеренные в образце с латеральной решеткой, с облучением микроволновым полем (ρ_{xx}^ω) и без облучения (ρ_{xx}). Частота микроволнового поля $\omega/2\pi = 142$ ГГц, температура $T = 4.2$ К.

Рис. 5 — Зависимости сопротивления в образце со сверхрешеткой ($V_g = 0$, $a = 200$ нм) при температуре $T = 1.6$ К без облучения (кривая R_{xx}) и с облучением на частотах $\omega/2\pi = 125$ ГГц (кривая 1) и $\omega/2\pi = 145$ ГГц (кривая 2).



Во второй части экспериментально показано, что в образцах с ДЭГ в одномерном периодическом потенциале при облучении микроволновым полем можно достичь состояний с нулевым сопротивлением. Эти состояния наблюдаются в минимумах СО. Эксперименты проводились при температуре $T = 1.6$ К. Использовались образцы с периодами металлической решетки $a = 200$ нм и $a = 500$ нм. Решетка служила в качестве затвора, поэтому, с помощью изменения затворного напряжения V_g , можно было управлять величиной периодического потенциала. Состояния с нулевым сопротивлением (рис. 5, кривая 1) наблюдались в решетке с периодом $a = 200$ нм, при $V_g = 0$ и частоте излучения $\omega/2\pi = 145$ ГГц. Установлено, что при частоте $\omega/2\pi = 125$ ГГц и ниже (рис. 5, кривая 2) состояния с нулевым сопротивлением разрушаются. При этом в исходных образцах без периодического потенциала состояния с нулевым сопротивлением наблюдались даже при частоте $\omega/2\pi = 110$ ГГц. Подача на затвор отрицательного напряжения, т.е. увеличение амплитуды потенциала, также приводит к разрушению этих состояний.

В образце с периодом металлической решетки $a = 500$ нм состояния с нулевым сопротивлением не наблюдались даже при $V_g = 0$. Основной причиной отсутствия этих состояний в образцах с такой решеткой, ровно как и их разрушения при подаче на затвор отрицательного напряжения в образцах с периодом $a = 200$ нм, является уменьшение квантового времени жизни τ_q при увеличении амплитуды периодического потенциала. В решетке с периодом 500 нм величина амплитуды периодической модуляции при $V_g = 0$ составляла $V_0 = 0.51$ мВ. В то же время этот параметр для решетки с периодом $a = 200$ нм равен $V_0 = 0.16$ мВ.

В заключении изложены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты и выводы диссертационной работы состоят в следующем:

1. Исследованы магнетотранспортные явления в ДЭГ на основе селективно-легированной гетероструктуры GaAs/AlAs со сверхрешеточными барьерами в присутствии одномерного периодического потенциала. Показано, что в этих гетероструктурах металлическая решетка, нанесенная на образец может использоваться для создания одномерного периодического потенциала. В таких структурах обнаружены соизмеримые осцилляции магнетосопротивления.
2. Исследован соизмеримый нелинейный магнетотранспорт в слабых электрических полях при температуре $T = 4.2$ К. Обнаружены состояния с нулевым дифференциальным сопротивлением. Показано, что такие состояния существуют в минимумах соизмеримых осцилляций и разрушаются в максимумах. Эти состояния также исчезают при увеличении амплитуды одномерного потенциала за счет подачи на металлическую решетку напряжения. Установлено, что причиной такого поведения является уменьшение квантового времени жизни при увеличении амплитуды периодического потенциала.
3. Установлено, что в сильных электрических полях туннелирование Зинера между уровнями Ландау приводит к модуляции соизмеримых осцилляций сопротивления. Существуют значения магнитных полей, в которых фаза соизмеримых осцилляций изменяется на π .
4. Показано, что учесть влияние на магнетотранспорт возникающих в одномерном периодическом потенциале зон Ландау можно, введя эффективное квантовое время жизни τ_q^* , которое зависит от ширины зон Ландау.
5. Исследован магнетотранспорт ДЭГ при облучении микроволновым полем с частотой от 1.5 до 150 ГГц в одномерном периодическом потенциале при температуре $T = 4.2$ К. Показано, что в одномерном потенциале наблюдается модуляция ω/ω_c - осцилляций: в минимумах соизмеримых осцилляций сопротивление изменяется существенно, чем в максимумах.
6. Обнаружены состояния с нулевым сопротивлением при облучении ДЭГ микроволновым полем в одномерном периодическом потенциале при температуре $T = 1.6$ К. Установлено, что эти состояния, также как и состояния с нулевым дифференциальным сопротивлением, возникают в минимумах соизмеримых осцилляций и разрушаются при увеличении амплитуды периодической модуляции. Показано, что состояния с нулевым сопротивлением наблюдаются в образцах с периодом металлической решетки $a = 200$ нм. Однако эти состояния не удалось обнаружить в образцах с $a = 500$ нм, поскольку амплитуда периодического потенциала в этих образцах значительно выше.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях

- A1 *Дмитриев, Д.* Транспортное время релаксации и квантовое время жизни в селективно-легированных гетероструктурах GaAs/AlAs / Д. В. Дмитриев, И. С. Стрыгин, А. А. Быков, С. А. Виткалов // Письма в ЖЭТФ. — 2012. — Т. 95, № 8. — С. 467—471.
- A2 *Дмитриев, Д.* Транспортное время рассеяния и квантовое время жизни в гетероструктурах GaAs/AlAs / Д. Дмитриев, И. С. Стрыгин, А. А. Быков // Программа и тезисы докладов. XIX Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников. — Екатеринбург, 2012 — С. 99.
- A3 *Быков, А. А.* Интерференция соизмеримых и индуцированных микроволновым излучением осцилляций магнетосопротивления двумерного электронного газа в одномерной латеральной сверхрешетке / А. А. Быков, И. С. Стрыгин, Е. Е. Родякина, В. Майер, С. А. Виткалов // Письма в ЖЭТФ. — 2015. — Т. 101, № 10. — С. 781—786.
- A4 *Bykov, A. A.* Microwave-induced zero-resistance state in two-dimensional electron systems with unidirectional periodic modulation / A. A. Bykov, I. S. Strygin, A. V. Goran, A. K. Kalagin, E. E. Rodyakina, A. V. Latyshev // Applied Physics Letters. — 2016. — Т. 108. — С. 012103.
- A5 *Быков, А. А.* Нулевое дифференциальное сопротивление двумерного электронного газа в одномерном периодическом потенциале при больших факторах заполнения / А. А. Быков, И. С. Стрыгин, А. В. Горан, Е. Е. Родякина, В. Майер, С. А. Виткалов // Письма в ЖЭТФ. — 2016. — Т. 101, № 4. — С. 258—263.
- A6 *Быков, А. А.* Индуцированные микроволновым излучением состояния с нулевым сопротивлением в двумерной электронной системе с одномерной периодической модуляцией / А. А. Быков, И. С. Стрыгин, А. В. Горан, А. К. Калагин, Е. Е. Родякина, А. В. Лагышев // Программа и тезисы докладов. XXII Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников. — Екатеринбург, 2018. — С. 84.
- A7 *Стрыгин, И. С.* Нулевое дифференциальное сопротивление двумерного электронного газа в одномерном периодическом потенциале при больших факторах заполнения / И. С. Стрыгин, А. В. Горан, Е. Е. Родякина, А. А. Быков, В. Майер, С. А. Виткалов // Программа и тезисы докладов. XXII Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников. — Екатеринбург, 2018. — С. 158.

A8 *Быков, А. А.* Туннелирование Зинера между уровнями Ландау в двумерной электронной системе с одномерной периодической модуляцией / *А. А. Быков, И. С. Стрыгин, Е. Е. Родякина, С. А. Виткалов* // Письма в ЖЭТФ. — 2018. — Т. 108, № 2. — С. 108—113.

Список литературы

1. Magneto-oscillatory conductance in silicon surface / F. F. Fang [и др.] // Physical Review Letters. — 1966. — Т. 16, № 20. — С. 901.
2. *Klitzing, K. v.* New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance / *K. v. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper* // Physical Review Letters. — 1980. — Т. 45, № 6. — С. 494.
3. *Tsui, D. C.* Two-Dimensional Magnetotransport in the Extreme Quantum Limit / *D. C. Tsui, H. L. Stormer, A. C. Gossard* // Physical Review Letters. — 1982. — Т. 48, № 22. — С. 1559.
4. Magnetoresistance Oscillations in a Two-Dimensional Electron Gas Induced by a Submicrometer Periodic Potential / *D. Weiss* [и др.] // Europhysics Letters. — 1989. — Т. 8, № 2. — С. 179—184.
5. *Beenakker, C. W. J.* Guiding-Center-Drift Resonance in a Periodically Modulated Two-Dimensional Electron Gas / *C. W. J. Beenakker* // Physical Review Letters. — 1989. — Т. 62, № 17. — С. 2020—2023.
6. *Winkler, R. W.* Landau-Band conductivity in a Two-Dimensional Electron System Modulated by an Artificial One-Dimensional Superlattice Potential / *R. W. Winkler, J. P. Kotthaus, K. Ploog* // Physical Review Letters. — 1989. — Т. 62, № 10. — С. 1177—1180.
7. *Gerhardt, R. R.* Novel Magnetoresistance Oscillations in a Periodically Modulated Two-Dimensional Electron Gas / *R. R. Gerhardt, D. Weiss, K. v. Klitzing* // Physical Review Letters. — 1989. — Т. 62, № 10. — С. 1173—1176.
8. Magnetoresistance oscillations due to internal Landau band structure of a two-dimensional electron system in a periodic magnetic field / *K. W. Edmonds* [и др.] // Physical Review B. — 2001. — Т. 64. — 041303(R).
9. *Endo, A.* Modulation of the Shubnikov-de Haas Oscillation in Unidirectional Lateral Superlattices / *A. Endo, Y. Iye* // Journal of the Physical Society of Japan. — 2008. — Т. 77, № 5. — С. 054709.
10. Electron Pinball and Commensurate Orbits in a Periodic Array of Scatterers / *D. Weiss* [и др.] // Physical Review Letters. — 1991. — Т. 66, № 21. — С. 2790.

11. *Fleischmann, R.* Magnetoresistance Due to Chaos and Nonlinear Resonances in Lateral Surface Superlattices / R. Fleischmann, T. Geisel, R. Ketzmerick // Physical Review Letters. — 1992. — Т. 68, № 9. — С. 1367—1370.
12. Стохастическая динамика двумерных электронов в периодической решетке антиточек / Э. Баскин [и др.] // Письма в ЖЭТФ. — 1992. — Т. 55, № 11. — С. 649—652.
13. Shubnikov-de Haas-like oscillations in millimeterwave photoconductivity in a high-mobility two-dimensional electron gas / M. A. Zudov [и др.] // Physical Review B. — 2001. — Т. 64, № 20. — 201311(R).
14. Nonequilibrium phenomena in high Landau levels / I. A. Dmitriev [и др.] // Reviews of Modern Physics. — 2012. — Т. 84, № 4. — С. 1709—1763.
15. Zero-resistance states induced by electromagnetic-wave excitation in GaAs/AlGaAs heterostructures / R. G. Mani [и др.] // Nature. — 2002. — Т. 420. — С. 646—650.
16. Zener Tunneling Between Landau Orbits in a High-Mobility Two-Dimensional Electron Gas / C. L. Yang [и др.] // Physical Review Letters. — 2002. — Т. 89, № 7. — С. 076801.
17. Zero-Differential Resistance State of Two-Dimensional Electron Systems in Strong Magnetic Fields / A. A. Vykov [и др.] // Physical Review Letters. — 2007. — Т. 99. — С. 116801.
18. New Concept for the Reduction of Impurity Scattering in Remotely Doped GaAs Quantum Wells / K. J. Friedland [и др.] // Physical Review Letters. — 1996. — Т. 77, № 22. — С. 4616.
19. Theory of microwave-induced oscillations in the magnetoconductivity of a two-dimensional electron gas / I. A. Dmitriev [и др.] // Physical Review B. — 2005. — Т. 71. — С. 115316.
20. *Vavilov, M. G.* Nonlinear resistivity of a two-dimensional electron gas in a magnetic field / M. G. Vavilov, I. L. Aleiner, L. I. Glazman // Physical Review B. — 2007. — Т. 76. — С. 115331.
21. Effect of a dc electric field on the longitudinal resistance of two-dimensional electrons in a magnetic field / J. Zhang [и др.] // Physical Review B. — 2007. — Т. 75. — 081305(R).