

На правах рукописи

Жданов Евгений Юрьевич

**Магнетотранспортные явления в латерально структурированных
и подвешенных GaAs/AlGaAs-гетеропереходах
с двумерным электронным газом**

1.3.11 — физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2026

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

Научный руководитель: Погосов Артур Григорьевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты: Якунин Михаил Викторович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

Лавров Александр Николаевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Защита состоится 29 сентября 2026 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.134.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. 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/obrazovanie/dissertatsionnyj-sovet/zasedaniya/>.

Автореферат разослан “_____” _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Погосов Артур Григорьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Гетероструктуры GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом (ДЭГ) широко используются для экспериментального исследования электронного транспорта в полупроводниках. Высокая подвижность электронов, возможность точного управления геометрией проводящего канала и развитые методы низкотемпературных магнетотранспортных измерений делают такие системы удобным объектом для исследования как квантовых, так и квазиклассических явлений переноса [1,2]. К числу фундаментальных эффектов, наблюдаемых в ДЭГ, относятся осцилляции Шубникова–де Гааза (ОШдГ), целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла (КЭХ), баллистические и интерференционные явления, а также неравновесный транспорт в сильных магнитных и электрических полях [3–7].

Особый интерес представляют латерально структурированные системы, в которых размеры проводящей области сравнимы с длиной свободного пробега электронов. В этом случае транспорт перестаёт быть локальным в обычном друдевском смысле и начинает определяться геометрией образца, характером границ, искусственным потенциалом и классической динамикой электронных траекторий. Одной из наиболее наглядных реализаций такого режима являются решётки антиточек, представляющие собой периодические массивы искусственных рассеивателей. В слабых магнитных полях в таких структурах возникают соизмеримые осцилляции магнетосопротивления, связанные с геометрическими резонансами между циклотронным диаметром и периодом решётки [8–10]. Эти системы служат твердотельной реализацией электронных биллиардов Синая и позволяют исследовать баллистический транспорт, динамический хаос, эффекты памяти и нелинейный отклик ДЭГ [11–14].

Важное направление развития связано с созданием свободно подвешенных полупроводниковых мембран, содержащих ДЭГ. Отрыв от подложки с высокой диэлектрической проницаемостью приводит к появлению механических степеней свободы, изменению электростатического окружения, ослаблению теплоотвода и усилению электрон-электронного взаимодействия [15–20]. Подвешенные мембраны с ДЭГ представляют собой уникальную модельную систему, в которой электрон-электронное взаимодействие естественным образом усиливается за счёт снижения диэлектрического экранирования окружающей средой. В отличие от обычного ДЭГ в неподвешенных гетероструктурах, где взаимодействие относительно легко ослабить, например путём напыления экранирующего затвора, подвешенные мембраны с ДЭГ предоставляют редкую на практике возможность перейти к режимам с более сильным электрон-электронным взаимодействием. Такая конфигурация открывает новые возможности для исследования явлений, обусловленных электрон-электронным взаимодействием, в диапазоне параметров, практически недоступном для неподвешенных гетеро-

структур. Поэтому подвешенные структуры представляют интерес не только как основа наноэлектромеханических систем, но и как самостоятельная физическая платформа для изучения электронного транспорта в условиях, существенно отличающихся от обычных гетероструктур, встроенных в массив полупроводника.

Таким образом, исследование магнетотранспорта в таких латерально структурированных и, в особенности, подвешенных гетероструктурах с ДЭГ является актуальным.

Степень разработанности темы. Транспортные свойства ДЭГ в гетероструктурах GaAs/AlGaAs достаточно хорошо изучены в широкой области температур и магнитных полей [1, 6]. В то же время свойства ДЭГ в подвешенных структурах такого типа практически не изучены. Не ясно, сохраняется ли после отрыва мембран от подложки высокое качество ДЭГ, достаточное для реализации баллистического транспорта, ОШдГ и КЭХ, а также какие новые механизмы рассеяния и релаксации возникают после подвешивания.

Для обычных неподвешенных структур разработаны стандартные подходы к анализу ОШдГ, основанные на факторе Дингла и связи амплитуды осцилляций с квантовым временем рассеяния [21–23]. Для описания уширения уровней Ландау используются модели, основанные на самосогласованном борновском приближении и его модификациях, а также квазиклассические подходы, применимые в случае гладкого потенциала беспорядка и хорошо разделённых уровней Ландау [24–26]. Вместе с тем переходная область умеренных магнитных полей, где ОШдГ имеют большую амплитуду, но режим КЭХ ещё не сформирован, не получила столь же универсального теоретического описания, особенно для микроструктур с выраженным баллистическим вкладом в слабых полях.

Баллистический транспорт в неподвешенных гетероструктурах с ДЭГ также является развитым направлением. Для квадратных и других периодических массивов искусственных рассеивателей известны соизмеримые осцилляции, связанные с устойчивыми классическими траекториями, а также нелинейные эффекты, обусловленные разрушением таких траекторий в электрическом поле [8–11]. Однако большинство работ выполнено на неподвешенных структурах. Влияние отрыва мембран от подложки на устойчивость баллистических траекторий, температурное подавление соизмеримых осцилляций, нелинейный отклик и термоэдс вообще не исследовано. Для свободно подвешенных полупроводниковых наноструктур с ДЭГ к началу настоящего исследования были известны отдельные работы, посвящённые магнетотранспорту, однако полная картина КЭХ в планарных подвешенных GaAs/AlGaAs-мембранах оставалась недостаточно выясненной [15–17].

Механические свойства подвешенных полупроводниковых мембран представляют самостоятельный интерес, поскольку определяют их жёсткость, уро-

вень возникающих механических напряжений и характер связи между электрическими и механическими степенями свободы. Методика локального надавливания кантилевером атомно-силового микроскопа хорошо развита для двумерных материалов и тонких мембран [27–29]. Вместе с тем применимость такого подхода к относительно толстым проводящим GaAs/AlGaAs-мембранам с ДЭГ требует отдельной проверки, поскольку их жёсткость может быть сравнима с жёсткостью кантилевера АСМ или превышать её. При этом экспериментальное определение жёсткости подвешенной мембраны с ДЭГ одновременно служит прямой проверкой факта её подвешенности.

Следовательно, несмотря на значительный объём накопленных знаний о ДЭГ, баллистическом транспорте, ОШдГ и КЭХ, остаётся ряд открытых вопросов, связанных именно с сочетанием высокой подвижности, латерального структурирования и отрыва от подложки. Настоящая диссертационная работа направлена на экспериментальное исследование этих вопросов и на построение физически мотивированного описания наблюдаемых магнетотранспортных явлений.

Цель и задачи работы.

Целью диссертационной работы является установление физических закономерностей магнетотранспорта в латерально структурированных и свободно подвешенных GaAs/AlGaAs-гетеропереходах с ДЭГ в слабых, умеренных и сильных магнитных полях.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать и реализовать экспериментальные структуры для исследования магнетотранспорта в высокоподвижном ДЭГ, включая холловские мостики, решётки антиточек и свободно подвешенные GaAs/AlGaAs-мембраны, и провести контроль их геометрических, транспортных и механических параметров.
2. Исследовать слабополевой баллистический магнетотранспорт в структурах с периодическими решётками антиточек, включая плотные треугольные массивы и квадратные решётки, установить влияние геометрии искусственных рассеивателей на форму магнетосопротивления и на этой основе провести прямое сравнение неподвешенных и подвешенных структур с ДЭГ, определив, сохраняются ли после отрыва мембран от подложки соизмеримые осцилляции, большая длина свободного пробега и характерные признаки баллистического режима.
3. Исследовать нелинейный отклик подвешенных и неподвешенных структур с решётками антиточек при пропускании постоянного тока и определить, сводится ли подавление соизмеримых осцилляций к джоулеву разогреву и дрейфу электронных орбит или требует учёта дополнительных

механизмов, обусловленных подвешиванием.

4. Исследовать баллистическую термоэдс в подвешенных решётках антиточек и сопоставить термоэлектрический отклик с магнетосопротивлением в области соизмеримых осцилляций.
5. Изучить ОШДГ большой амплитуды с V-образными минимумами в микроскопических холловских мостиках с высокоподвижным ДЭГ и разработать феноменологическую модель, позволяющую количественно описывать форму осцилляций, положительный фон магнетосопротивления и температурную эволюцию экспериментальных зависимостей.
6. Определить квантовое время рассеяния τ_q и транспортное время релаксации τ_{tr} из экспериментальных зависимостей магнетосопротивления в области умеренных магнитных полей и установить температурное поведение этих параметров.
7. Исследовать КЭХ в подвешенных холловских мостиках различной геометрии, выявить влияние границы между подвешенной и неподвешенной областями на распространение краевых токовых каналов и определить условия восстановления бездиссипативного режима транспорта.
8. Исследовать пробой КЭХ в полностью подвешенных структурах и установить роль ослабленного теплоотвода в устойчивости квантового режима к пропусканию тока.

Научная новизна.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. В плотной треугольной решётке антиточек обнаружено кусочно-параболическое отрицательное магнетосопротивление в слабых магнитных полях. Показано, что зависимость $R_{xx}(B)$ разделяется на несколько участков, хорошо описываемых квадратичными полиномами, а переходные области между ними существенно уже самих участков. Установлено, что такая структура магнетосопротивления сохраняется при изменении состояния ДЭГ и масштабируется с сопротивлением в нулевом магнитном поле.
2. Показано, что перевод GaAs/AlGaAs-гетероструктур с высокоподвижным ДЭГ в состояние свободно подвешенных мембран не разрушает баллистический режим электронного транспорта. После отрыва мембран от подложки сохраняются слабополевое баллистическое магнетосопротивление и соизмеримые осцилляции в квадратных решётках антиточек, что указывает на сохранение длины свободного пробега, достаточной для реализации геометрических резонансов.

3. Установлено, что нелинейное подавление соизмеримых осцилляций в подвешенных структурах существенно отличается от поведения неподвешенных образцов и не описывается универсально ни через выделяемую мощность, ни через приложенное электрическое поле. Это указывает на участие дополнительных механизмов, связанных с изменением неравновесной функции распределения электронов и особенностями электрон-электронного взаимодействия после подвешивания.
4. Исследована баллистическая термоэдс в подвешенных решётках антиточек. Показано, что термоэлектрический отклик в области соизмеримых осцилляций сохраняет связь производной проводимости по энергии, что согласуется с правилом Мотта и указывает на доминирование диффузионного вклада в термоэдс.
5. Разработана феноменологическая модель магнетосопротивления, описывающая ОШдГ большой амплитуды с V-образными минимумами в высокоподвижном ДЭГ. Модель включает гауссово уширение уровней Ландау, зависящее от магнитного поля, масштабирование эффективного времени релаксации с плотностью состояний и осцилляции уровня Ферми при фиксированной концентрации электронов. Показано, что учёт осцилляций уровня Ферми необходим для воспроизведения V-образной формы минимумов, а масштабирование времени релаксации с плотностью состояний обеспечивает правильную абсолютную амплитуду магнетосопротивления и положительный фон.
6. Показано, что предложенная модель позволяет извлекать τ_q и τ_{tr} в микроструктурах, где стандартный низкополевой анализ транспортных параметров затруднён баллистическим вкладом. Установлено, что при повышении температуры τ_q остаётся практически неизменным, тогда как τ_{tr} уменьшается, что согласуется с усилением релаксации импульса на акустических фононах.
7. Установлено, что граница между подвешенной и неподвешенной областями приводит к обратному рассеянию краевых токовых каналов в режиме КЭХ. В структурах, где такая граница проходит через измеряемый участок холловского мостика, плато холловского сопротивления сопровождаются конечным продольным сопротивлением. Перенос границы подтрава за пределы активной области мостика восстанавливает бездиссипативный режим с одновременным квантованием R_{xy} и занулением R_{xx} .
8. Исследован пробой КЭХ в подвешенных холловских мостиках. Показано, что критический ток пробоя в подвешенных структурах существенно ниже, чем в неподвешенных GaAs/AlGaAs-гетероструктурах аналогичной

геометрии, что указывает на определяющую роль ослабленного теплоотвода и локального электронного разогрева.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы определяется тем, что в ней последовательно исследованы несколько режимов магнетотранспорта в одной физической платформе — высокоподвижном ДЭГ, латерально структурированном и, в части образцов, отделённом от подложки. Полученные результаты расширяют представления о баллистическом транспорте в системах с искусственными рассеивателями, о влиянии подвешивания на нелинейный отклик ДЭГ, о связи термоэдс с соизмеримыми осцилляциями, а также о распространении краевых токовых каналов в подвешенных мембранах.

Существенным результатом является феноменологическое описание ОШдГ большой амплитуды с V-образными минимумами. Предложенная модель связывает форму и амплитуду осцилляций с плотностью состояний, осцилляциями уровня Ферми и двумя физически содержательными параметрами рассеяния — τ_q и τ_{tr} . Такой подход дополняет стандартный анализ ОШдГ и особенно важен для микроструктур, где низкополевое сопротивление содержит баллистический вклад и не может напрямую использоваться для определения друдевского сопротивления ДЭГ.

Практическая значимость работы связана с развитием технологии и диагностики свободно подвешенных GaAs/AlGaAs-мембран с высокоподвижным ДЭГ. Показано, что такие структуры могут сохранять признаки высококачественного электронного транспорта, включая баллистическое магнетосопротивление, соизмеримые осцилляции, ОШдГ и КЭХ. Одновременно установлено, что положение границы подтрава и ослабленный теплоотвод являются критическими факторами, влияющими на бездиссипативный транспорт по краевым каналам и на пробой КЭХ. Эти результаты следует учитывать при проектировании подвешенных полупроводниковых микро- и наноструктур, наномеханических систем и устройств, в которых используются квантовые или баллистические режимы транспорта.

Кроме того, продемонстрированная применимость методики надавливания кантилевером АСМ для исследования упругих свойств относительно толстых проводящих GaAs/AlGaAs-мембран обеспечивает дополнительный метод контроля механического состояния подвешенных структур. Это важно для интерпретации транспортных измерений, поскольку остаточные напряжения, механические деформации и локальные пьезоэлектрические поля могут влиять на электростатический потенциал ДЭГ.

Методология и методы исследования. Объектами исследования являлись GaAs/AlGaAs-гетероструктуры с высокоподвижным ДЭГ, холловские мостики различной геометрии, решётки антиточек и свободно подвешенные по-

лупроводниковые мембраны. В работе использовались структуры, изготовленные на основе модуляционно-легированных гетероструктур, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Латеральная геометрия образцов задавалась методами оптической и электронной литографии, а искусственные рассеиватели формировались плазмохимическим травлением. Подвешенные области получались селективным удалением жертвенного слоя.

Основным экспериментальным методом являлись низкотемпературные магнетотранспортные измерения в многоконтактной геометрии. Продольное и холловское сопротивления измерялись методом синхронного детектирования в магнитном поле, направленном перпендикулярно плоскости ДЭГ. Измерения проводились как в линейном режиме при малом переменном токе, так и в нелинейном режиме при добавлении небольшого постоянного тока. Для анализа параметров ДЭГ использовались низкополевые холловские измерения, период ОШдГ, температурные зависимости магнетосопротивления и сравнение структур до и после подвешивания. Для исследования термоэлектрического отклика применялись измерения магнетополевой зависимости термоэдс в структурах с решётками антиточек. Механические свойства подвешенных мембран исследовались методом атомно-силовой микроскопии в режиме локального надавливания кантилевером. Геометрия и качество изготовленных структур контролировались методами оптической и сканирующей электронной микроскопии.

Положения, выносимые на защиту.

1. Мембраны с ДЭГ на основе GaAs/AlGaAs, оторванные от подложки, демонстрируют выраженные осцилляции магнетосопротивления и термоэдс, обусловленные геометрическими резонансами при совпадении циклотронного диаметра электронов с характерными размерами латеральной структуризации. В отличие от исходных неподвешенных структур, в подавлении осцилляций тянущим электрическим полем помимо эффектов разогрева и дрейфа в скрещенных полях, существенную роль играет более быстрая релаксация неравновесной функции распределения, обусловленная усилением электрон-электронного взаимодействия после отрыва структур от подложки.
2. ОШдГ большой амплитуды с V-образными минимумами в высокоподвижном ДЭГ описываются количественно при помощи феноменологической модели, включающей гауссово уширение уровней Ландау, масштабирование эффективного времени релаксации с плотностью состояний и осцилляции уровня Ферми при фиксированной концентрации электронов. Указанная модель содержит всего два подгоночных параметра — квантовое время рассеяния τ_q и транспортное время релаксации τ_{tr} , которые могут быть надёжно определены из сопоставления расчёта с экспериментом, в том числе в микроструктурах, где стандартный слабополевой анализ за-

труднён баллистическим вкладом.

3. В режиме КЭХ граница между подвешенной и неподвешенной областями приводит к обратному рассеянию краевых токовых каналов. Если граница подтрава проходит через измеряемый участок мостика, квантование холловского сопротивления сопровождается конечным R_{xx} ; при вынесении этой границы за пределы активной области восстанавливается бездиссипативный режим транспорта с одновременным квантованием R_{xy} и занулением R_{xx} .
4. В подвешенных холловских мостиках, характеризующихся ослабленным теплоотводом в подложку, пробой КЭХ происходит при существенно меньших токах, чем в неподвешенных GaAs/AlGaAs-гетероструктурах аналогичной геометрии.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием стандартных и воспроизводимых методик низкотемпературных магнетотранспортных измерений, четырёхзондовой схемы регистрации продольного и холловского сопротивлений, контролем линейности отклика при малых измерительных токах, а также сопоставлением данных, полученных на образцах различной геометрии и в разных режимах измерений. Существенным элементом проверки является прямое сравнение подвешенных и неподвешенных структур, позволяющее отделять эффекты отрыва от подложки от разброса параметров отдельных образцов.

Апробация результатов

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на конкурсах молодых учёных и конкурсе научных работ ИФП СО РАН, лабораторных и институтских семинарах, на заседаниях учёного совета ИФП СО РАН, а также на следующих российских и международных конференциях: China-Russia-Mongolia-Belarus International Conference on Advanced Science and Technology (Харбин, Китай, 2026), XXVI Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников (Екатеринбург, 2026), Нанозифика и нанозлектроника. XXIX симпозиум (Нижний Новгород, 2025), XIV российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск, 2019), XIII российская конференция по физике полупроводников (Екатеринбург, 2017), XXI Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников (Екатеринбург, 2016), XII российская конференция по физике полупроводников (Звенигород, 2015), The 3rd International Conference «Mesoscopic Structures: Fundamental and Applications» (Новосибирск, 2015), 2nd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint-Petersburg OPEN 2015» (Санкт-Петербург, 2015), XI российская конференция по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2013), The 7th Russian-French workshop

on Nanosciences and Nanotechnologies (Новосибирск, 2013), 20th International Conference on High Magnetic Fields in semiconductor Physics (Шамони, Франция, 2012), 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (Цюрих, Швейцария, 2012), X российская конференция по физике полупроводников (Нижний Новгород, 2011), Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2011).

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 8 рецензируемых научных публикациях, включая 6 статей в научных журналах, входящих в перечень ВАК [A1–A6], и 2 работы в сериях трудов научных конференций [A7–A8]. Кроме того, результаты работы представлены в двух главах коллективных монографий [A9–A10] и 14 тезисах докладов на российских и международных конференциях [A11–A24].

Личный вклад автора.

Личный вклад автора заключался в участии в постановке задач исследования, разработке дизайна экспериментальных образцов и выполнении технологических процедур по изготовлению латерально структурированных и подвешенных GaAs/AlGaAs-мембран. Автором самостоятельно выполнены подготовка и проведение низкотемпературных магнетотранспортных и термоэлектрических измерений. Автор принимал непосредственное участие в обработке экспериментальных данных, численном моделировании и феноменологическом анализе магнетосопротивления, интерпретации полученных результатов, подготовке научных публикаций и представлении результатов работы на научных конференциях и семинарах.

Вклад автора в статьи [A1–A4, A6–A8], а также раздел 3 статьи [A5] является определяющим.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 124 страницы, включая 31 рисунок и список литературы из 102 наименований.

Содержание работы

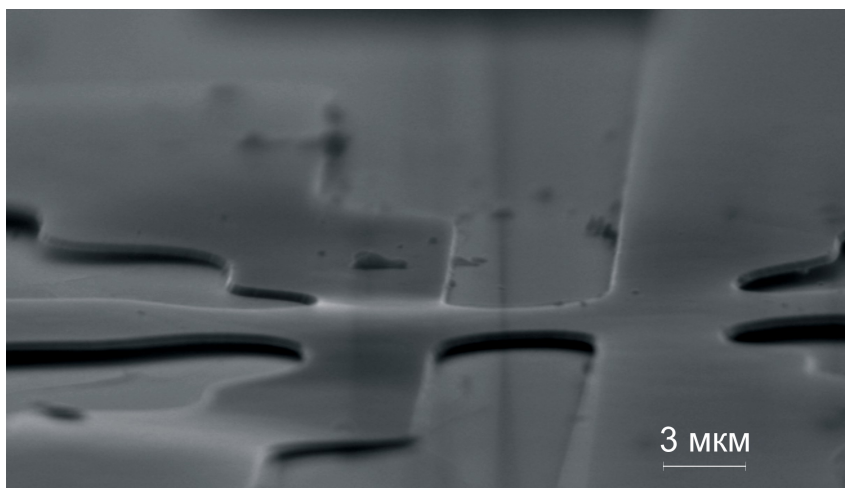
Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, охарактеризована степень разработанности темы. Указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, описаны методология и методы исследования. Представлены положения, выносимые на защиту, сведения о достоверности и апробации результатов, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, а также о структуре и объёме диссертации.

Первая глава «Обзор литературы» носит обзорный характер. В ней рассмотрены основные физические представления, необходимые для анализа магнетотранспорта в латерально структурированных и подвешенных GaAs/AlGaAs-гетеропереходах с ДЭГ. Рассмотрены баллистический электронный транспорт и геометрические резонансы в структурах, размеры которых сравнимы с длиной свободного пробега электронов. Особое внимание уделено решёткам антиточек как твердотельной реализации электронных биллиардов Синая. Обсуждаются устойчивые классические траектории, динамический хаос, соизмеримые осцилляции магнетосопротивления и нелинейные эффекты, возникающие при воздействии продольного электрического поля. Отдельно изложены основные представления об ОШДГ в двумерных электронных системах. Рассмотрены связь амплитуды осцилляций с уширением уровней Ландау и квантовым временем рассеяния, стандартный анализ Дингла, а также ограничения существующих моделей при описании ОШДГ большой амплитуды в высокоподвижных микроструктурах. В заключительной части главы рассмотрены КЭХ и модель краевых токовых каналов. Обсуждаются условия формирования бездиссипативного режима транспорта и роль локализованных состояний. На основе анализа литературы сформулированы предпосылки для экспериментального исследования баллистического транспорта, ОШДГ и КЭХ в свободно подвешенных GaAs/AlGaAs-мембранах с ДЭГ.

Во **второй главе** описываются экспериментальные образцы и методы исследования. Экспериментальные образцы изготавливались на основе модуляционно-легированных гетероструктур GaAs/AlGaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. В использованных структурах ДЭГ формировался в квантовой яме GaAs толщиной 13 нм, расположенной между короткопериодными AlAs/GaAs-сверхрешётками (рис. 1а). Легирующие Si- δ -слои были пространственно отделены от квантовой ямы спейсерными слоями, что уменьшало рассеяние электронов на ионизованных донорах и обеспечивало гладкий характер потенциала беспорядка. Дополнительное сглаживание флуктуаций примесного потенциала связано с присутствием тяжёлых X-электронов в AlAs/GaAs-сверхрешётках, локализованных вблизи δ -легированных слоёв, которые эффективно экранируют потенциал ионизованных доноров. При этом

X-электроны не вносят измеримого вклада в параллельную проводимость [30]. Типичные параметры ДЭГ в исследованных структурах составляли $n \approx 7 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и $\mu \approx 2 \times 10^6 \text{ см}^2/(\text{Вс})$ при $T = 4,2 \text{ К}$.

GaAs	4.8нм
δ-Si	
GaAs	5нм
Сверхрешетка GaAs/AlAs	32.8нм
δ-Si	
Сверхрешетка GaAs/AlAs	32.8нм
Квантовая яма GaAs	13нм
Сверхрешетка GaAs/AlAs	32.8нм
δ-Si	
Сверхрешетка GaAs/AlAs	38.4нм
Жертвенный слой AlAs	400 нм
Подложка GaAs	



а. Схема гетероструктуры.

б. Подвешенный холловский мостик.

Рис. 1: Экспериментальные структуры на основе GaAs/AlGaAs-гетероструктур с ДЭГ: а — схематическое изображение используемой гетероструктуры с квантовой ямой, AlAs/GaAs-сверхрешётками и δ -легированием; б — СЭМ-изображение подвешенного холловского мостика.

Латеральное структурирование использовалось для задания геометрии проводящей области ДЭГ и формирования искусственного периодического потенциала. В зависимости от характерного размера элементов применялись два литографических подхода. Микронная топология образцов — холловские мостики, контактные области, подвешиваемые участки и структуры для механических измерений — задавалась методами оптической литографии. Нанометровые элементы, прежде всего решётки антиточек, формировались методом электронной литографии с последующим анизотропным плазмохимическим травлением. При этом использовалось неглубокое плазмохимическое травление верхней части гетероструктуры на глубину порядка 70 нм. Эта глубина была меньше полной толщины мембраны и не достигала квантовой ямы с ДЭГ. При этом травление достигало области легирования и приводило к локальному обеднению электронного газа под вытравленной областью.

Описанные выше структуры изготавливались как в неподвешенном, так и в подвешенном состоянии. Подвешенные области формировались методом селективного удаления жертвенного слоя. После формирования латеральной геометрии образца проводилось жидкостное травление в водных растворах HF и HCl: травитель через открытые участки достигал жертвенного слоя и селективно удалял его, практически не воздействуя на соседние GaAs/AlGaAs-слои.

Режим травления подбирался так, чтобы обеспечить отделение заданной части мембраны от подложки и одновременно сохранить механическую целостность узких перемычек, контактных областей и проводящих каналов. На рис. 1б показано СЭМ-изображение подвешенного холловского мостика, иллюстрирующее отрыв структуры от подложки.

Магнетотранспортные измерения проводились в многоконтактной конфигурации в магнитном поле, направленном перпендикулярно плоскости ДЭГ. В зависимости от серии образцов и исследуемого диапазона температур использовались криомагнитные системы с ^4He - или ^3He -вставкой, а также криомагнитная система Oxford Instruments Teslatron РТ. Измерения в субкельвиновой области выполнялись в криомагнитной системе MagnCryo фирмы RTI с ^3He -вставкой и сверхпроводящим соленоидом до 11 Тл. Для исследования высокоамплитудных ОШдГ в микромостиках использовалась система Teslatron РТ. В линейном режиме через образец пропусклся малый переменный ток, а напряжения регистрировались методом синхронного детектирования. Для исследования нелинейного отклика к малому переменному измерительному току добавлялся дополнительный постоянный ток. Для исследования термоэлектрического отклика проводились измерения термоэдс в структурах с решётками антиточек. Температурный градиент вдоль образца создавался переменным током частоты ω ; поскольку джоулев нагрев пропорционален квадрату тока, возникающая термоэдс осциллирует на двойной частоте 2ω и регистрировалась методом синхронного детектирования.

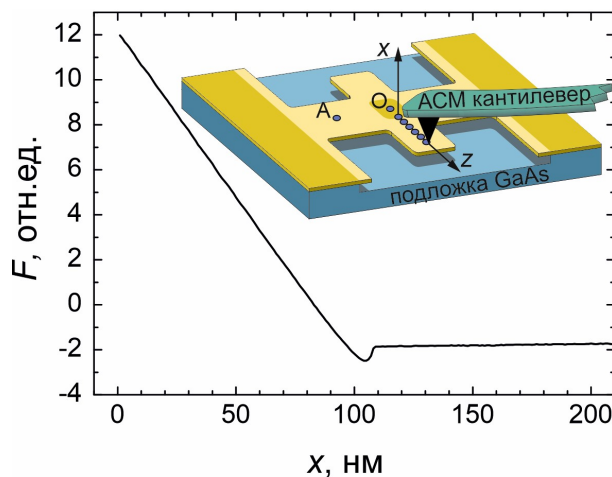


Рис. 2: Зависимость силы, действующей на кантилевер АСМ, от величины его смещения при подводе к поверхности подвешенной мембраны. На вставке показаны точки, в которых производилось нажатие кантилевером.

Для изучения механических свойств подвешенных мембран использовалась методика надавливания кантилевером атомно-силового микроскопа (АСМ). Для механических измерений были сформированы подвешенные мембраны крестообразной формы, содержащие балки как с одним закреплённым

концом, так и с двумя закреплёнными концами. Кантилевер АСМ последовательно прижимался к различным точкам подвешенной мембраны. Типичная зависимость силы F от смещения кантилевера x приведена на рис. 2. После касания поверхности мембраны наблюдается линейный рост силы, соответствующий упругой деформации системы «кантилевер – мембрана». Из наклона линейного участка зависимости $F(x)$ определялась эффективная жёсткость системы, а из сравнения со стандартной теорией упругости для изгиба тонких балок [31, 32] были получены абсолютные значения жёсткости структур порядка десятков и сотен Н/м.

В третьей главе изучаются баллистические явления и термоэдс в слабых магнитных полях. Показано, что в плотных массивах антиточек электронный транспорт определяется сетью узких проводящих каналов между соседними антиточками. На примере треугольной решётки показано, что это приводит к наблюдению кусочно-параболического магнетосопротивления. Показано, что кусочно-параболическая структура магнетосопротивления сохраняется при изменении концентрации и подвижности электронов и масштабируется с сопротивлением в нулевом магнитном поле.

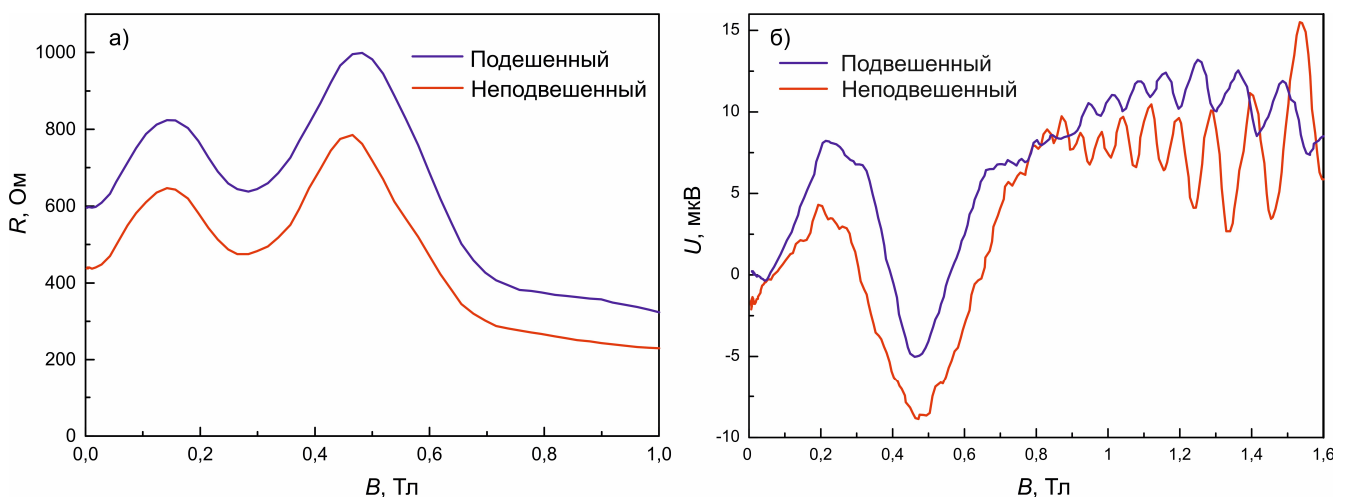


Рис. 3: Соизмеримые осцилляции в холловских мостиках с квадратной решёткой антиточек периода $d = 600$ нм и диаметром антиточек $2a = 200$ нм до и после подвешивания при температуре $T = 4,2$ К: а) магнетосопротивление; б) магнетополевая зависимость термоэдс.

Для неплотных решёток антиточек с периодом $d = 600$ нм и диаметром антиточек $2a = 200$ нм подробно изучено магнетосопротивление и термоэдс как до, так и после отрыва мембран от подложки. На рис. 3, а показано магнетосопротивление структуры с квадратной решёткой антиточек до и после подвешивания. В обоих состояниях наблюдаются соизмеримые осцилляции, причём их положение и амплитуда изменяются слабо. При концентрации $n \approx 7 \times 10^{11}$ см $^{-2}$ главный максимум при $B \approx 0,48$ Тл соответствует условию соизмеримости $2R_c \approx d$, где R_c — циклотронный радиус, при котором возникают

убегающие траектории вдоль рядов антиоточек [10]. Показано также, что температурное подавление соизмеримых осцилляций происходит схожим образом в подвешенных и неподвешенных структурах. Наиболее существенное отличие подвешенных структур от неподвешенных проявляется в нелинейном режиме при пропускании постоянного тока. Показано, что соизмеримые осцилляции в подвешенных образцах оказываются более устойчивыми к воздействию постоянного тока. Этот результат нельзя объяснить ослабленным теплоотводом: если бы доминировал разогрев, подвешенные структуры должны были бы демонстрировать более быстрое подавление осцилляций. Нельзя объяснить его и дрейфом в скрещенных полях, поскольку при одинаковом электрическом поле дрейфовый вклад должен быть близким для подвешенного и неподвешенного состояний. Для объяснения большей устойчивости соизмеримых осцилляций в подвешенных структурах была предложена интерпретация, связанная с изменением неравновесной функции распределения электронов и усилением электрон-электронного взаимодействия после отрыва структур от подложки.

На рис. 3, б показана баллистическая термоэдс неподвешенного и подвешенного холловских мостиков с решёткой антиоточек периода $d = 600$ нм при температуре $T = 4,2$ К. S-образные особенности наблюдаются в тех же магнитных полях, где в магнетосопротивлении возникают соизмеримые осцилляции. Такое поведение естественно следует из правила Мотта, согласно которому диффузионная термоэдс определяется логарифмической производной проводимости по энергии на уровне Ферми. После подвешивания амплитуда и форма термоэлектрических особенностей существенно не изменяются. Следовательно, баллистический режим сохраняется не только в электрическом транспорте, но и в термоэлектрическом отклике.

В **четвёртой главе** изучаются ОШдГ в умеренных магнитных полях. Измерения проводились в структурах на основе GaAs/AlGaAs-гетеропереходов с концентрацией электронов порядка $n \approx 7 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и подвижностью $\mu \approx 2 \times 10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}$. Ширина исследованного микромостика составляла $W = 2$ мкм, расстояние между потенциальными контактами — $L = 6$ мкм.

На рис. 4, а приведены экспериментальные зависимости продольного магнетосопротивления при температурах от 2 до 15 К. В слабых магнитных полях наблюдается существенный баллистический пик, поэтому сопротивление при $B \rightarrow 0$ не может быть непосредственно использовано для определения друдевского транспортного времени релаксации ДЭГ. В области магнитных полей от примерно 0,5 до 3,5 Тл наблюдаются ОШдГ большой амплитуды с характерными V-образными минимумами. При чётных факторах заполнения минимумы сопротивления в достаточно сильных полях приближаются к нулю, однако в исследованном диапазоне полей не формируются протяжённые области зануления, характерные для полностью развитого режима КЭХ.

Для описания экспериментальных зависимостей предложена феномено-

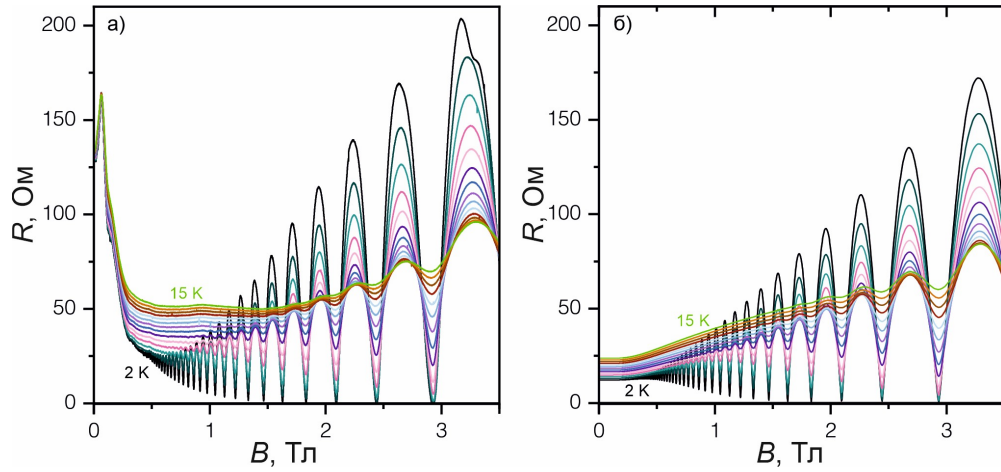


Рис. 4: Магнетосопротивление микроскопического холловского мостика с высокоподвижным ДЭГ при различных температурах: а) эксперимент; б) расчёт по феноменологической модели. Видны ОШдГ большой амплитуды с V-образными минимумами

логическая модель магнетосопротивления, являющаяся комбинацией трёх физических предположений. Во-первых, плотность состояний в магнитном поле описывается системой уровней Ландау с гауссовым уширением [26], характерным для гладкого потенциала беспорядка в высокоподвижном ДЭГ. Во-вторых, эффективное время релаксации в магнитном поле считается зависящим от энергии и масштабируется с плотностью состояний [22]. В-третьих, при расчёте учитываются осцилляции уровня Ферми с магнитным полем при фиксированной концентрации электронов [33]. Последнее обстоятельство существенно для воспроизведения V-образной формы минимумов ОШдГ.

Модель содержит два подгоночных параметра: транспортное время релаксации импульса τ_{tr} и квантовое время рассеяния τ_q . Расчётные кривые, приведённые на рис. 4, б, воспроизводят основные особенности эксперимента: V-образные минимумы, большую амплитуду осцилляций, температурное подавление ОШдГ и плавный положительный фон магнетосопротивления.

Для количественной проверки модели были сравнены огибающие экспериментальных и расчётных осцилляций при различных температурах. Как видно из рис. 5, модель воспроизводит не только положение минимумов и максимумов, но и абсолютную амплитуду осцилляций. В широком диапазоне магнитных полей и температур отклонение расчёта от эксперимента не превышает 10%. Исключение составляют область низких температур и сильных магнитных полей, где становится существенным спиновое расщепление уровней Ландау, не учитываемое в использованной модели. Однако даже в этой области расхождение между экспериментальными и расчётными значениями не превышает 30%.

Из сопоставления расчёта с экспериментом определены температурные зависимости τ_{tr} и τ_q . Важным следствием такого подхода является возмож-

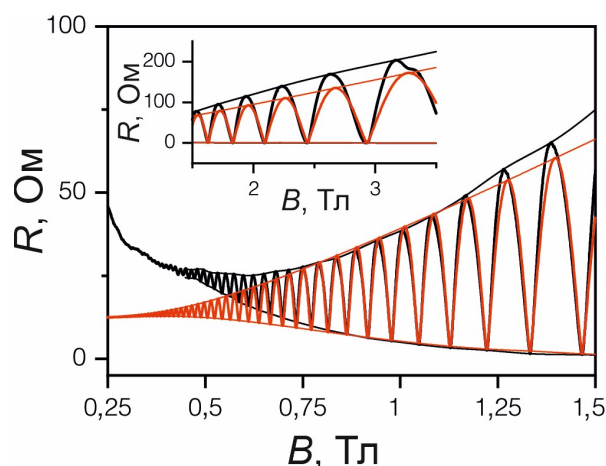


Рис. 5: Экспериментальные и рассчитанные огибающие ОШдГ при $T = 2$ К. Сравнение показывает, что модель воспроизводит абсолютную амплитуду осцилляций

ность извлекать оба параметра даже в микроструктурах, где слабополевое сопротивление содержит выраженный баллистический пик и поэтому не позволяет напрямую определить друдевское сопротивление ДЭГ. Показано, что при повышении температуры квантовое время рассеяния остаётся практически неизменным, тогда как транспортное время релаксации уменьшается. Такое поведение соответствует различной физической природе этих времён: τ_q определяется уширением уровней Ландау, связанным преимущественно с упругим рассеянием на статическом беспорядке, а τ_{tr} уменьшается при усилении рассеяния на акустических фононах.

Пятая глава посвящена изучению КЭХ в сильных магнитных полях. Магнетосопротивление в сильных магнитных полях изучено для подвешенных структур двух разных типов, геометрия которых показана на рис. 6.

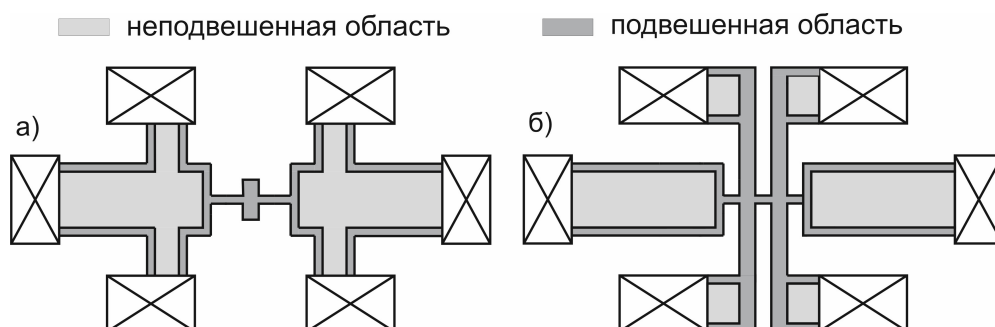


Рис. 6: Схематическое изображение подвешенных холловских мостиков двух типов. В образцах типа I а) граница подтравки проходит внутри области между потенциальными контактами, в образцах типа II — б) вынесена за пределы измеряемой области

Результаты для мостика типа I приведены на рис. 7а. После удаления жертвенного слоя сохраняются хорошо выраженные ОШдГ и плато холлов-

ского сопротивления, однако в областях целочисленных факторов заполнения продольное сопротивление не обращается в нуль. Это означает, что в структурах типа I сохраняются признаки квантующего магнетотранспорта, однако полноценный бездиссипативный режим краевого транспорта не достигается. Такое поведение обусловлено положением границы подвешенной области внутри измеряемой части мостика. Возникающая здесь неоднородность потенциала вызывает частичное обратное рассеяние краевых каналов. Ключевая проверка этой интерпретации получена на структурах типа II (рис. 7б). В этих образцах подвешенная область полностью охватывает измеряемый участок холловского мостика, а граница подтравы вынесена за пределы области между потенциальными контактами. В результате краевые каналы, соответствующие целочисленным факторам заполнения, не пересекают переходную область между подвешенной и неподвешенной частями мембраны. При вынесении границы подвешенной области за пределы участка между потенциальными контактами в подвешенных структурах той же серии наблюдается полноценный режим целочисленного КЭХ: продольное сопротивление обращается в нуль, а холловское сопротивление демонстрирует квантованные плато.

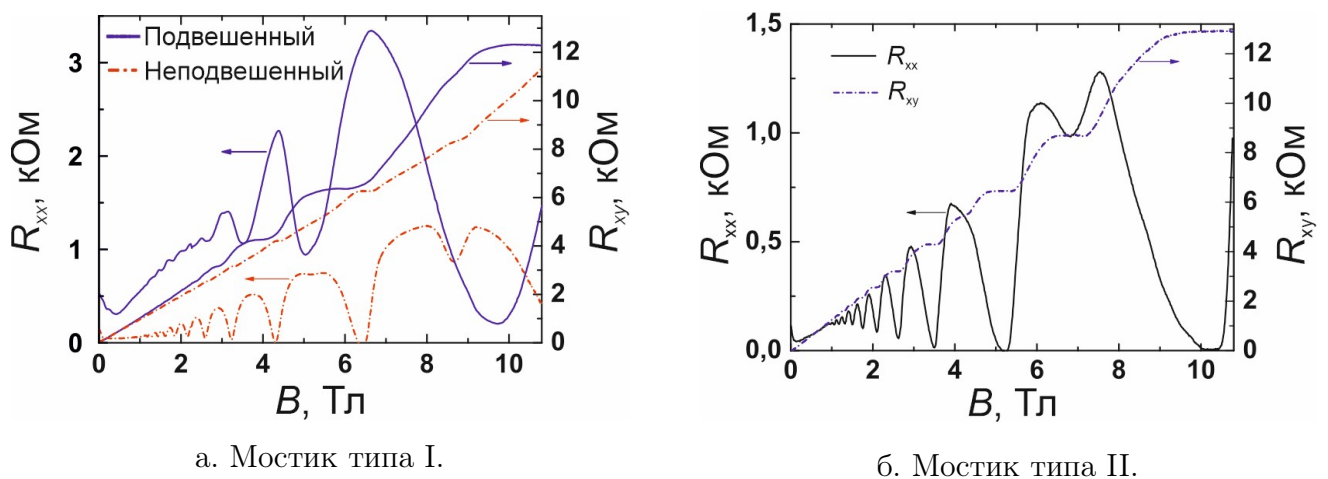


Рис. 7: Квантующий магнетотранспорт в подвешенных холловских мостиках различной геометрии: а — продольное и холловское сопротивления холловского мостика типа I до и после подвешивания при $T = 4,2$ К; в подвешенном состоянии сохраняются ОШдГ и плато R_{xy} , но R_{xx} остаётся конечным; б — продольное и холловское сопротивления подвешенного холловского мостика типа II, в котором граница подтравы вынесена за пределы измеряемого участка.

В этой главе исследован также пробой КЭХ тянущим электрическим током в полностью подвешенных холловских мостиках. Установлено, что критический ток пробоя в подвешенных структурах существенно ниже, чем в неподвешенных гетероструктурах GaAs/AlGaAs аналогичной геометрии, что свидетельствует об определяющей роли ослабленного теплоотвода и связанного с ним электронного разогрева в устойчивости режима КЭХ к электрическому току.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

- [A1] Буданцев М.В., Лавров Р.А., Погосов А.Г., Жданов Е.Ю., Похабов Д.А. Кусочно-параболическое отрицательное магнетосопротивление двумерного электронного газа с треугольной решёткой антиточек // *Физика и техника полупроводников*. — 2011. — Т. 45, № 2. — С. 207–212.
- [A2] Pogosov A.G., Budantsev M.V., Zhdanov E.Yu., Pokhabov D.A., Bakarov A.K., Toropov A.I. Electron transport in suspended semiconductor structures with two-dimensional electron gas // *Appl. Phys. Lett.* — 2012. — Vol. 100, No. 18. — P. 181902.
- [A3] Жданов Е.Ю., Погосов А.Г., Буданцев М.В., Похабов Д.А., Бакаров А.К. Баллистический магнетотранспорт в подвешенном двумерном электронном газе с периодической решёткой антиточек // *Физика и техника полупроводников*. — 2017. — Т. 51, № 1. — С. 12–17.
- [A4] Zhdanov E.Yu., Pogosov A.G., Pokhabov D.A., Budantsev M.V., Kozhukhov A.S., Bakarov A.K. Elastic properties of suspended conducting GaAs/AlGaAs nanostructures by means of atomic force microscopy // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. — 2018. — Vol. 54, No. 5. — P. 496–501.
- [A5] Pogosov A.G., Shevyrin A.A., Pokhabov D.A., Zhdanov E.Yu., Kumar S. Suspended semiconductor nanostructures: physics and technology // *J. Phys.: Condens. Matter*. — 2022. — Vol. 34. — P. 263001.
- [A6] Zhdanov E.Yu., Budantsev M.V., Sarypov D.I., Pokhabov D.A., Bakarov A.K., Pogosov A.G. Giant Shubnikov–de Haas oscillations with V-shaped minima in a high-mobility two-dimensional electron gas: experiment and phenomenological model // *Phys. Rev. B*. — 2026. — Vol. 113. — P. 035417.
- [A7] Pogosov A.G., Budantsev M.V., Zhdanov E.Yu., Pokhabov D.A. Ballistic electron transport in structured suspended semiconductor membranes // *AIP Conf. Proc.* — 2013. — Vol. 1566. — P. 211–212.
- [A8] Zhdanov E.Yu., Pogosov A.G., Budantsev M.V., Pokhabov D.A., Bakarov A.K., Toropov A.I. Ballistic thermopower of suspended semiconductor Hall bars with two dimensional electron gas // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2015. — Vol. 643. — P. 012079.
- [A9] Pogosov A.G., Budantsev M.V., Shevyrin A.A., Zhdanov E.Yu., Pokhabov D.A. Electron transport: from nanostructures to nanoelectromechanical systems // *Advances in Semiconductor Nanostructures: Growth, Characterization, Properties and Applications*. — Amsterdam: Elsevier, 2016. — P. 101–129.
- [A10] Погосов А.Г., Буданцев М.В., Шевырин А.А., Жданов Е.Ю., Похабов Д.А. Электронный транспорт: от наноструктур к нанoeлектромеханическим системам // *Юбилейный сборник избранных статей Института*

физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН. — Новосибирск: Параллель, 2014. — С. 103–123.

- [A11] Жданов Е.Ю., Буданцев М.В., Сарыпов Д.И., Похабов Д.А., Бакаров А.К., Погосов А.Г. Гигантские осцилляции Шубникова–де Гааза с V-образными минимумами // *Тезисы докладов XXVI Уральской международной зимней школы по физике полупроводников.* — Екатеринбург, 16–20 февраля 2026 г. — С. 58–59.
- [A12] Жданов Е.Ю., Сарыпов Д.И., Буданцев М.В., Похабов Д.А., Шевырин А.А., Бакаров А.К., Погосов А.Г. Электрон-электронное взаимодействие и квантовое время жизни в подвешенном двумерном электронном газе // *Нанопизика и наноэлектроника. XXIX симпозиум: Тезисы докладов.* — Нижний Новгород, 10–14 марта 2025 г. — С. 383.
- [A13] Жданов Е.Ю., Погосов А.Г., Похабов Д.А., Шкляев А.А., Бакаров А.К. Кулоновское увлечение в двойных квантовых точечных контактах // *Тезисы докладов XIV Российской конференции по физике полупроводников.* — Новосибирск, 9–13 сентября 2019 г. — С. 145.
- [A14] Жданов Е.Ю., Похабов Д.А., Погосов А.Г., Буданцев М.В., Кожухов А.С. АСМ измерения упругих свойств наноструктур // *Тезисы докладов XIII Российской конференции по физике полупроводников.* — Екатеринбург, 2–6 октября 2017 г. — С. 422.
- [A15] Жданов Е.Ю., Погосов А.Г., Буданцев М.В., Похабов Д.А. Баллистический магнетотранспорт в подвешенном двумерном электронном газе с периодической решёткой антиточек // *Тезисы докладов XXI Уральской международной зимней школы по физике полупроводников.* — Екатеринбург, 15–20 февраля 2016 г. — С. 126.
- [A16] Жданов Е.Ю., Погосов А.Г., Буданцев М.В., Похабов Д.А., Бакаров А.К., Торопов А.И. Переворот фазы осцилляций Шубникова–де Гааза в подвешенных полупроводниковых структурах // *Тезисы докладов XII Российской конференции по физике полупроводников.* — Звенигород, 2015. — Вт 4-42с. — С. 253.
- [A17] Zhdanov E.Yu., Pogosov A.G., Budantsev M.V., Pokhabov D.A., Bakarov A.K., Toropov A.I. Ballistic electron transport in nanostructured suspended semiconductor systems with two-dimensional electron gas // *The 3rd International Conference “Mesoscopic Structures: Fundamental and Applications — MSFA-2015”.* — Novosibirsk, 22–26 June 2015. — P. 29.
- [A18] Zhdanov E.Yu., Pogosov A.G., Budantsev M.V., Pokhabov D.A., Bakarov A.K., Toropov A.I. Ballistic thermopower of suspended semiconductor structures with two-dimensional electron gas // *2nd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures “Saint-Petersburg OPEN 2015”.* — Saint Petersburg, 6–8 April 2015. — P-107. — P. 232–233.
- [A19] Жданов Е.Ю., Погосов А.Г., Буданцев М.В., Похабов Д.А., Бакаров А.К., Торопов А.И. Магнетотранспорт в проводящих полупроводниковых мем-

бранах с периодической решёткой антиточек // *Тезисы XI Российской конференции по физике полупроводников*. — Санкт-Петербург, 16–20 сентября 2013 г. — Rep_0445. — С. 124.

- [A20] Zhdanov E.Yu., Pogosov A.G., Budantsev M.V., Pokhabov D.A., Toropov A.I., Bakarov A.K. Nanostructured suspended semiconductor membranes with two-dimensional electron gas // *The 7th Russian-French Workshop on Nanosciences and Nanotechnologies*. — Novosibirsk, 3–6 June 2013. — P-34. — P. 79.
- [A21] Zhdanov E., Pogosov A., Budantsev M., Pokhabov D. Ballistic electron transport in structured suspended semiconductor membranes // *ICPS 2012, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors*. — Zurich, Switzerland, 2012. — P-34.13. — P. 76.
- [A22] Погосов А.Г., Буданцев М.В., Жданов Е.Ю., Похабов Д.А., Бакаров А.К., Торопов А.И. Электронный транспорт в полупроводниковых мембранах с двумерным электронным газом // *Тезисы X Российской конференции по физике полупроводников*. — Нижний Новгород, 2011. — С. 246.
- [A23] Pogosov A.G., Budantsev M.V., Zhdanov E.Yu., Pokhabov D.A., Toropov A.I., Bakarov A.K. Electron transport in semiconductor membranes in quantizing magnetic field // *20th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics — HMF-20*. — Chamonix, France, 2012. — P-115. — P. 121.
- [A24] Жданов Е.Ю. Электронный транспорт в полупроводниковых мембранах с двумерным электронным газом в режиме квантового эффекта Холла // *Материалы XLIX Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»*. — Новосибирск, 2011. — С. 212.

Список цитируемой литературы

- [1] Ando T., Fowler A.B., Stern F. Electronic properties of two-dimensional systems // *Rev. Mod. Phys.* — 1982. — Vol. 54. — P. 437–672.
- [2] Beenakker C.W.J., van Houten H. Quantum transport in semiconductor nanostructures // *Solid State Physics*. — New York: Academic Press, 1991. — Vol. 44. — P. 1–228.
- [3] Shubnikov L.V., de Haas W.J. A new phenomenon in the change of resistance of bismuth in a magnetic field at low temperature // *Leiden Commun.* — 1930. — Vol. 207a. — P. 3.
- [4] von Klitzing K., Dorda G., Pepper M. New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance // *Phys. Rev. Lett.* — 1980. — Vol. 45. — P. 494–497.
- [5] Tsui D.C., Störmer H.L., Gossard A.C. Two-dimensional magnetotransport in the extreme quantum limit // *Phys. Rev. Lett.* — 1982. — Vol. 48. — P. 1559–1562.

- [6] The Quantum Hall Effect / Eds. R. Prange, M. Cage, K. von Klitzing, S. Girvin, A. Chang, F. Duncan, M. Haldane, R. Laughlin, A. Pruisken, D. Thouless. — New York: Springer, 2012.
- [7] von Klitzing K., Chakraborty T., Kim P. *et al.* 40 years of the quantum Hall effect // *Nat. Rev. Phys.* — 2020. — Vol. 2. — P. 397–401.
- [8] Ensslin K., Petroff P.M. Magnetotransport through an antidot lattice in GaAs–Al_xGa_{1–x}As heterostructures // *Phys. Rev. B.* — 1990. — Vol. 41. — P. 12307–12310.
- [9] Weiss D., Roukes M.L., Menshig A., Grambow P., von Klitzing K., Weimann G. Electron pinball and commensurate orbits in a periodic array of scatterers // *Phys. Rev. Lett.* — 1991. — Vol. 66. — P. 2790–2793.
- [10] Baskin E.M., Gusev G.M., Kvon Z.D., Pogosov A.G., Entin M.V. Stochastic dynamics of 2D electrons in a periodic lattice of antidots // *JETP Lett.* — 1992. — Vol. 55. — P. 678–682.
- [11] Gusev G.M., Kvon Z.D., Pogosov A.G., Voronin M.M. Nonlinear effects in a two-dimensional electron gas with a periodic lattice of scatterers // *Письма в ЖЭТФ.* — 1997. — Т. 65, № 3. — С. 237–241.
- [12] Fogler M.M., Dobin A.Y., Perel V.I., Shklovskii B.I. Suppression of chaotic dynamics and localization of two-dimensional electrons by a weak magnetic field // *Phys. Rev. B.* — 1997. — Vol. 56. — P. 6823–6832.
- [13] Mirlin A.D., Polyakov D.G., Evers F., Wölfle P. Quasiclassical negative magnetoresistance of a 2D electron gas: interplay of strong scatterers and smooth disorder // *Phys. Rev. Lett.* — 2001. — Vol. 87. — P. 126805.
- [14] Polyakov D.G., Evers F., Mirlin A.D., Wölfle P. Quasiclassical magnetotransport in a random array of antidots // *Phys. Rev. B.* — 2001. — Vol. 64. — P. 205306.
- [15] Blick R.H., Monzon F.G., Wegscheider W., Bichler M., Stern F., Roukes M.L. Magnetotransport measurements on freely suspended two-dimensional electron gases // *Phys. Rev. B.* — 2000. — Vol. 62. — P. 17103–17107.
- [16] Höhberger E.M., Blick R.H., Beil F.W., Wegscheider W., Bichler M., Kotthaus J.P. Magnetotransport in freely suspended two-dimensional electron gases // *Physica E.* — 2002. — Vol. 12. — P. 487–490.
- [17] Rössler C., Herz M., Bichler M., Ludwig S. Magnetotransport in a freely suspended two-dimensional electron gas // *Solid State Commun.* — 2010. — Vol. 150. — P. 861–864.
- [18] Ekinici K.L., Roukes M.L. Nanoelectromechanical systems // *Rev. Sci. Instrum.* — 2005. — Vol. 76. — P. 061101.
- [19] Shevyrin A.A., Pogosov A.G., Budantsev M.V., Bakarov A.K., Toropov A.I., Ishutkin S.V., Shesterikov E.V. The features of ballistic electron transport in a suspended quantum point contact // *Appl. Phys. Lett.* — 2014. — Vol. 104. — P. 203102.
- [20] Egorov D.A., Pokhabov D.A., Pogosov A.G. *et al.* Enhanced e–e interaction in suspended 2DEG evidenced by transverse magnetic focusing // *Appl. Phys.*

- Lett.* — 2024. — Vol. 125. — P. 112103.
- [21] Dingle R., Störmer H.L., Gossard A.C., Wiegmann W. Electron mobilities in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices // *Appl. Phys. Lett.* — 1978. — Vol. 33. — P. 665–667.
 - [22] Coleridge P.T., Stoner R., Fletcher R. Low-field transport coefficients in GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heterostructures // *Phys. Rev. B.* — 1989. — Vol. 39. — P. 1120–1124.
 - [23] Coleridge P.T. Small-angle scattering in a two-dimensional electron gas // *Phys. Rev. B.* — 1991. — Vol. 44. — P. 3793–3801.
 - [24] Ando T., Uemura Y. Theory of quantum transport in a two-dimensional electron system under magnetic fields. I. Characteristics of level broadening and transport under strong fields // *J. Phys. Soc. Jpn.* — 1974. — Vol. 36. — P. 959–967.
 - [25] Vavilov M.G., Aleiner I.L. Magnetotransport in a two-dimensional electron gas at large filling factors // *Phys. Rev. B.* — 2004. — Vol. 69. — P. 035303.
 - [26] Raikh M.E., Shahbazyan T.V. High Landau levels in a smooth random potential for two-dimensional electrons // *Phys. Rev. B.* — 1993. — Vol. 47. — P. 1522–1529.
 - [27] Lee C., Wei X., Kysar J.W., Hone J. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene // *Science.* — 2008. — Vol. 321. — P. 385–388.
 - [28] Bertolazzi S., Brivio J., Kis A. Stretching and breaking of ultrathin MoS₂ // *ACS Nano.* — 2011. — Vol. 5. — P. 9703–9709.
 - [29] Hutter J.L., Bechhoefer J. Calibration of atomic-force microscope tips // *Rev. Sci. Instrum.* — 1993. — Vol. 64. — P. 1868–1873.
 - [30] Friedland K.-J., Hey R., Kostial H., Klann R., Ploog K. New concept for the reduction of impurity scattering in remotely doped GaAs quantum wells // *Phys. Rev. Lett.* — 1996. — Vol. 77. — P. 4616–4619.
 - [31] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. — 5-е изд. — М.: Физматлит, 2007.
 - [32] Timoshenko S.P., Goodier J.N. Theory of elasticity. — 3rd ed. — New York: McGraw-Hill, 1970.
 - [33] Endo A., Iye Y. The effect of oscillating Fermi energy on the line shape of the Shubnikov–de Haas oscillation in a two-dimensional electron gas // *J. Phys. Soc. Jpn.* — 2008. — Vol. 77. — P. 064713.