

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 34.01.02
ПРИ ФЕДЕРАЛЬНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ УЧРЕЖДЕНИИ
НАУКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 21.04.2022 г. №_2__

О присуждении Алексееву Павлу Сергеевичу, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация **«Гидродинамические явления в наноструктурах»** по специальности «1.3.3. Теоретическая физика» принята к защите 23 декабря 2021г., протокол № 9 диссертационным советом 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки (ФГБУН) Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, утвержденным 12 июля 2019 г. приказом ФТИ им. А.Ф. Иоффе No. 75.

Соискатель Алексей Павел Сергеевич, 1984 года рождения, защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Туннельные и магнитные спин-зависимые эффекты в кубических полупроводниках без центра инверсии» в 2009 году в специализированном совете Д 002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников. Соискатель работает старшим научным сотрудником в Секторе теории оптических и электрических явлений в полупроводниках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

Официальные оппоненты:

- 1. Арсеев Пётр Иварович**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, главный научный сотрудник Лаборатории теории твердого тела Отделения теоретической физики;
- 2. Бурмистров Игорь Сергеевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау Российской академии наук, заместитель директора института;
- 3. Зегря Георгий Георгиевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, заведующий Сектором теоретических основ микроэлектроники.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук - в своем положительном заключении, подписанном исполняющий обязанности заведующего Лабораторией теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, д.ф.-м.н. В. М. Ковалёвым и утвержденным Ученым секретарём ФГБУН ИФП СО РАН, к.ф.-м.н. С. А. Аржанниковой, отметило, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, вносит существенный вклад в развитие теории гидродинамических явлений в наноструктурах, который привёл к обнаружению

формирования гидродинамического режима транспорта в высококачественных квантовых ямах GaAs и привёл к объяснению ряда транспортных экспериментов в этих и других наноструктурах. В отзыве содержится 3 замечания, которые носят методический или дискуссионный характер:

1. В некоторых ситуациях автор не дает пояснений о применимости разрабатываемой теоретической модели к экспериментальной системе, результаты измерений на которой пытается объяснить на основе полученных формул. Например, в разделе 3.2.5 диссертации автор применяет полученные в разделе 3.2.4 формулы для частиц с квадратичным спектром со щелью (запрещённой зоной) к двухслоевому графену, где, конечно, вблизи точки нейтральности, спектр квадратичный, но бесщелевой.

2. При построении теории линейного магнетотранспорта учет рекомбинации проводится посредством введения феноменологического рекомбинационного времени. Следовало бы дать пояснения, какие именно механизмы рекомбинационных процессов имеет в виду автор. В некоторых случаях само время рекомбинации может зависеть от концентрации частиц, а через нее, возможно, и от координаты поперек границы образца.

3. В тексте диссертационной работы в небольшом количестве, но все же встречаются опечатки.

В отзыве указано, что эти замечания не снижают высокой научной значимости проведенных исследований и общей высокой оценки диссертационной работы, а существенных замечаний, которые бы поставили под сомнение основные выводы диссертационной работы, нет. Научные положения и результаты диссертации хорошо аргументированы и обоснованы. Основные результаты работы полностью отражены в публикациях в авторитетных российских и международных журналах, докладывались на российских и международных конференциях. По актуальности темы, новизне и достоверности результатов, научной и практической значимости работа полностью отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям действующим «Положением о присуждении ученых степеней» ФТИ им. А. Ф. Иоффе, а автор диссертационной работы – Алексеев Павел Сергеевич,

заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности «1.3.3. Теоретическая физика».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обусловливался сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы.

На автореферат поступило 4 отзыва, все отзывы **положительные**:

- 1) Отзыв доктора физико-математических наук, заведующего Лабораторией электронных процессов в полупроводниковых материалах ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (Москва, 12500, Моховая ул., 11, стр. 7) **Мирона Соломоновича Кагана**. Отзыв положительный, без замечаний.
- 2) Отзыв кандидата физико-математических наук, научного сотрудника Сектора теоретической астрофизики ФГБУН Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук (Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, д. 26) **Кожберова Андрея Андреевича**. Отзыв положительный, содержит три замечания:
 - а) Далек не всегда такие качественные прилагательные, как «узкий», «достаточно большой», «шероховатый», характеризующие исследуемую систему, пояснены и проиллюстрированы конкретными физическими параметрами.
 - б) На стр. 31 автореферата есть фраза содержащая вводное слово «во-первых», но далее в тексте слово «во-вторых» не использовано.
 - в) Несколько бросается в глаза, что рисунки в автореферате выполнены в разных стилях, а пояснения к ним далеко не всегда исчерпывающие.
- 3) Отзыв доктора физико-математических наук, заведующего Кафедрой физики и технологии наногетероструктур, Учёного секретаря ФГБУ ВОиН Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический

университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук (Санкт-Петербург, 630090 ул. Хлопина, дом 8, корпус 3, литер А) **Липовского Андрея Александровича**. Отзыв положительный, содержит два замечания:

а) ... следует отметить отсутствие раскрытия в тексте используемого обозначения R_c и то, что на графиках рисунка 7 потерян нижний индекс переменной, откладываемой по оси абсцисс.

б) ... с моей точки зрения, многократно фигурирующие в автореферате выражения «высокоподвижные квантовые ямы» и «высокоподвижные материалы» являются жаргонными.

- 4) Отзыв доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника Сектора теории когерентных явлений в твёрдом теле ФГБУН Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук (Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, д. 26) **Нестоклона Михаила Олеговича**. Отзыв положительный без замечаний.

Диссертационный совет отмечает, что на **основании выполненных соискателем исследований** решен большой комплекс теоретических задач, являющихся актуальными для современной теоретической физики и физики проводников нового типа, в которых реализуется гидродинамический режим электрического транспорта:

1) Построена теория низкочастотного и высокочастотного гидродинамического электрического транспорта в современных высококачественных материалах, в которой перенос заряда осуществляется неоднородными потоками вязкой электронной жидкости;

2) Предсказан и теоретически изучен вязкоупругий резонанс и сдвиговые магнитозвуковые волны в вязкой замагниченной электронной жидкости;

3) Построена теория гидродинамического магнетотранспорта в электрон-дырочных системах в различных случаях и режимах. В частности, предложен и изучен механизм сильного положительного линейного магнетосопротивления за

счёт формирования в электрон-дырочной системе прикраевых слоёв, в которых ключевую роль играют процессы рекомбинации и диффузии;

4) Построена теория баллистического режима транспорта слабо взаимодействующих двумерных электронов в нулевом и слабых магнитных полях;

5) Предсказан и теоретически изучен резкий баллистически-гидродинамический переход в системах двумерных слабо взаимодействующих электронов в магнитном поле, определяемый межэлектронными столкновениями и баллистическими размерными эффектами.

Практическая значимость результатов состоит в следующем:

1) На основе данного объяснения гигантского отрицательного температурно-зависимого магнетосопротивления, наблюдавшегося в современных высокоподвижных квантовых ямах GaAs, сделан вывод о формировании вязкой электронной жидкости в этих структурах. В дальнейших экспериментальных работах без участия Алексеева наблюдение такого магнетосопротивления было использовано как метод обнаружения вязкой электронной жидкости в наноструктурах, приводящей к гидродинамическому режиму транспорта.

2) На основе построенной теории высокочастотного транспорта в вязкой электронной жидкости показано, что наблюдение в отклике этой системы на радиочастотное поле предсказанного резонанса вблизи удвоенной циклотронной частоты является признаком формирования высокочастотного течения вязкой электронной жидкости.

3) С помощью разработанной теории магнетотранспорта в электрон-дырочных системах, в частности, предложенного механизма линейного магнетосопротивления за счёт формирования пространственно-неоднородных течений в точке электронейтральности, разработано объяснение сильного положительного линейного магнетосопротивления, наблюдавшегося в двухслойном графене в точке электронейтральности.

Диссертация является законченным, последовательным и внутренне согласованным научным трудом, имеющим фундаментальное значение.

Достоверность и надёжность результатов. Основные положения и выводы диссертации надёжно обоснованы теоретически и экспериментально. Все рассмотренные эффекты имеют убедительные физические объяснения. Достоверность и надёжность полученных теоретических результатов подтверждаются их внутренней согласованностью и согласием с экспериментальными данными. Основные результаты расчётов в рамках сформулированных гидродинамических уравнений проверены, с одной стороны, с точки зрения соответствия качественному описанию изучаемых эффектов с помощью наглядных оценок. С другой стороны, используемые балансовые гидродинамические уравнения выведены и проанализированы с помощью микроскопических моделей на основе кинетических уравнений.

Личный вклад автора состоит в выборе направлений исследований, постановке задач, построении аналитических теорий, проведении расчётов по их уравнениям, анализе и интерпретации экспериментальных данных, сравнению их с предсказаниями теории, подготовке публикаций и представлении результатов на научных мероприятиях.

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, **докладывались** на XII, XIII и XIV Российских конференциях по физике полупроводников (Звенигород, 2015; Екатеринбург, 2017; Новосибирск, 2019); на Совещании по теории полупроводников (Санкт-Петербург, 2016); на Совещании по теории твёрдого тела (Санкт-Петербург, 2021); на XIX и XX Всероссийских конференциях “Проблемы физики твёрдого тела и высоких давлений” (Сочи, 2020; 2021); на 24-ом международном симпозиуме “Наноструктуры: Физика и технологии” (Санкт-Петербург, 2016); на 34-ой международной конференции по физике полупроводников (Монпелье, Франция, 2018); на III конференции “Квантовый транспорт в 2D системах” (Люшон, Франция, 2019); на конференции “Транспорт и спектроскопия двумерных систем” (Черноголовка, 2021). Результаты, изложенные в диссертации, также докладывались и обсуждались на семинарах секторов

Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе, на семинаре Лаборатории теории конденсированного состояния Института технологии Карлсруэ (Карлсруэ, Германия), на семинаре Лаборатории низких температур Университета Аалто (Финляндия, Хельсинки), на семинаре Отдела физики конденсированного состояния Института сложных систем Общества Макса Планка (Дрезден, Германия).

Основное содержание диссертации **представлено** в 16 научных статьях, из них наиболее важными являются следующие (в скобках указан личный вклад автора, если соавторов больше одного):

1. P. S. Alekseev, Negative Magnetoresistance in Viscous Flow of Two-Dimensional Electrons // *Phys. Rev. Lett.* 117, 166601 (2016).
2. P. S. Alekseev, Magnetic resonance in a high-frequency flow of a two-dimensional viscous electron fluid // *Phys. Rev. B* 98, 165440 (2018).
3. P. S. Alekseev, A. P. Alekseeva, Transverse magnetosonic waves and viscoelastic resonance in a two-dimensional highly viscous electron fluid // *Phys. Rev. Lett.* 123, 236801 (2019). (Показано, что в сильно неидеальной двумерной электронной жидкости в магнитном поле возможно распространение сдвиговых поперечных магнитозвуковых волн. Рассчитан закон дисперсии этих волн и коэффициент затухания. В длинноволновом пределе закон дисперсии отражает вязкоупругий резонанс в коэффициентах вязкости. Рассчитан линейный отклик сильно неидеальной двумерной электронной жидкости в длинном образце на радиочастотное поле. Показано, что для достаточно узких образцов отклик формируется поперечными магнитозвуковыми волнами. Приведены свидетельства в пользу того, что аномальный пик в фотосопротивлении, наблюдавшийся в очень чистых квантовых ямах GaAs вблизи удвоенной циклотронной частоты, объясняется возбуждением радиочастотным полем сдвиговых

магнитозвуковых волн. Обсуждения базовых идей, оценки и расчёты проводилось авторами совместно.)

4. P. S. Alekseev, M. I. Dyakonov, Dynamic spin-charge coupling: ac spin Hall magnetoresistance in nonmagnetic conductors // *Phys. Rev. B* 100, 081301 (2019). (За счёт спинового эффекта Холла в отклике омических проводников с сильным спин-орбитальным взаимодействием на переменное электрическое поле в прикраевых слоях образца формируется возмущение спиновой плотности. Показано, что это возмущение приводит к возмущению величины переменного тока через образец. Предсказывается, что с помощью изученного эффекта может быть выполнено наблюдение спинового резонанса в немагнитных материалах с помощью только чисто электрических измерений. Идею о возможности такого эффекта выдвинул М. И. Дьяконов. Оценки и расчёты проводилось авторами совместно.)
5. П. С. Алексеев, Магнитозвуковые волны в двумерной электронной ферми-жидкости // *ФТП* 53, 1405 (2019).
6. P. S. Alekseev, A. P. Dmitriev, Viscosity of two-dimensional electrons // *Phys. Rev. B* 102, 241409 (2020). (Исследован интеграл межэлектронных столкновений для слабо неидеального двумерного электронного ферми-газа с реалистичным законом взаимодействия между электронами (экранированный кулоновский потенциал). Показано, что для задачи о релаксации сдвиговых напряжений, важной для описания вязких течений жидкости, зависимость от энергии у неравновесной части функции распределения оказывается асимптотически близка к тривиальной (производная фермиевской функции), что отвечает применимости тау-приближения для интеграла столкновений. Рассчитано время релаксации сдвиговых напряжений, определяющее коэффициент вязкости. Выполнен количественный анализ экспериментальных данных по температурной зависимости вязкости, полученных из анализа наблюдений гигантского

отрицательного магнетосопротивления в квантовых ямах GaAs. Обсуждение основных идей работы, проведение оценок, расчётов и анализ экспериментальных данных проводилось авторами совместно.)

7. P. S. Alekseev, A. P. Dmitriev, I. V. Gornyi, V. Yu. Kachorovskii, B. N. Narozhny, M. Schutt, M. Titov, Magnetoresistance in two-component systems // *Phys. Rev. Lett.* 114, 156601 (2015). (Показано, что в симметричной электрон-дырочной двумерной системе в перпендикулярном магнитном поле вблизи краев образца в определенном диапазоне параметров системы формируются слои с возмущенными плотностями электронов и дырок и с плотностью тока много больше, чем объёме образца. Ключевым требованием для этого является равенство концентраций электронов и дырок (точка электронейтральности электрон-дырочной системы). Этот эффект связан с появлением в центральной части образца потоков электронов и дырок к краям образца и с установлением баланса между этими потоками и рекомбинацией в прикраевых областях. Такое течение приводит к сильному положительному линейному магнетосопротивлению образца в пределе классически больших магнитных поле. Основные идеи работы обсуждались всеми авторами. А. П. Дмитриев, В. Ю. Качоровский и П. С. Алексеев совместно проводили часть оценок и расчётов.)
8. G. Y. Vasileva, D. Smirnov, Y. L. Ivanov, Y. B. Vasilyev, P. S. Alekseev, A. P. Dmitriev, I. V. Gornyi, V. Y. Kachorovskii, M. Titov, B. N. Narozhny, R. J. Haug, Linear magnetoresistance in compensated graphene bilayer // *Phys. Rev. B* 93, 195430 (2016). (В работе выполнен эксперимент по изучению магнетотранспорта в образце двухслойного графена на подложке с затвором. Концентрации электронов и дырок в образце менялись приложением напряжения к затвору. При одинаковых концентрациях электронов и дырок наблюдалось линейное магнетосопротивление в пределе больших магнитных полей. Выполнен анализ полученных экспериментальных результатов в рамках теории работы «7.».

Эксперименты планировались и выполнялись Г. Ю. Васильевой, Д.Смирновым, Ю. Л. Ивановым, Ю. Б. Васильевым, Р. И. Хаугом. Их результаты обсуждались всеми авторами. Теоретическое объяснение результатов экспериментов выполнялось совместно П. С. Алексеевым, А.П.Дмитриевым, В. Ю. Качоровским, М. Титовым, Б. Н. Нарожным.)

9. P. S. Alekseev, M. A. Semina, Ballistic flow of two-dimensional interacting electrons // *Phys. Rev. B* 98, 165412 (2018). (Изучен баллистический транспорт взаимодействующих двумерных электронов в длинных образцах с шероховатыми краями в отсутствие магнитного поля и в очень малых магнитных полях. Показано, что межчастичные столкновения приводят к положительной поправке к кондактансу образца за счёт «защиты» электронов при их столкновениях друг с другом от релаксации их импульса при рассеянии на краях образца. Такая поправка является предвестником формирования вязкого течения Пуазейля. Показано, что слабое магнитное поле также приводит к положительной поправке к току в центральной части образца за счёт слабого искажения формы баллистических траекторий. Обсуждения базовых идей, оценки и расчёты проводилось авторами совместно.)

10. A. N. Afanasiev, P. S. Alekseev, A. A. Greshnov, M. A. Semina, Ballistic-hydrodynamic phase transition in flow of two-dimensional electrons // *Phys. Rev. B* 104, 195415 (2021). (Показано, что в длинных баллистических образцах с прямыми шероховатыми краями баллистическое течение двумерных электронов в слабом магнитном поле является неоднородным в пространстве за счёт появления групп электронов с качественно различными типами траекторий: «путешествующих» электронов, пересекающих образец, и «скачущих» электронов, не пересекающих образец. Вклад в течение от прикраевых слоев со «скачущими» электронами, существенный для длинных образцов с прямыми краями, приводит к положительному неаналитическому магнетосопротивлению и

аномально большому холловскому сопротивлению. Для длинных чистых образцов построена теория перехода от баллистического течения двумерных электронов в меньших магнитных полях к гидродинамическому течению в больших полях. Показано, что переход контролируется баллистическими размерными эффектами и редкими межэлектронными столкновениями. Выполнен анализ экспериментов по наблюдению такого перехода в длинных образцах графена и квантовых ям GaAs. Обсуждения базовых идей, оценки и расчёты проводилось всеми авторами совместно.)

На заседании 21 апреля 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Алексееву П. С. учёную степень доктора физико-математических наук.

При проведении открытого голосования диссертационного совета в количестве 22 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, проголосовали:

За присуждение Алексееву Павлу Сергеевичу учёной степени доктора физико-математических наук

подано голосов – 22.

Против – 0.

Недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного
совета, акад. РАН, д. ф.-м. н.,
профессор

Сулис Роберт Арнольдович

Ученый секретарь диссертационного
совета, д. ф.-м. н.

Сорокин Лев Михайлович

21 апреля 2022 г.