

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи
УДК 538.9

КУНЦЕВИЧ АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ

ТРАНСПОРТНЫЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА МНОГОДОЛИННОЙ ДВУМЕРНОЙ
ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2010

Работа выполнена в отделении физики твёрдого тела Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
В. М. Пудалов.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
член корр. РАН П. И. Арсеев;
доктор физико-математических наук,
С. И. Дорожкин.

Ведущая организация: Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН.

Защита диссертации состоится 22 марта 2010 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д.002.023.03 при Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН .

Автореферат разослан “19” февраля 2010 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д.002.023.03 при ФИАН
доктор физико-математических наук,

А. С. Шиканов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Исследование свойств двумерных систем является актуальным и активно развивающимся направлением в физике конденсированного состояния. При низких температурах в таких системах становятся определяющими квантовые эффекты, в частности эффекты электрон-электронного взаимодействия. Теоретическому и экспериментальному исследованию эффектов электрон-электронного взаимодействия в двумерных системах за последние 30 лет посвящено огромное количество работ. В данной диссертации изучались квантовые эффекты в проводимости и термодинамике двумерной (2D)электронной системы при низких температурах и в неквантовых магнитных полях. В конце 90-х – начале 2000-х годов было осознано, что на величину электрон-электронного взаимодействия, а именно на число т.н. триплетных каналов, влияет кратность вырождения системы¹. Как правило, двумерная система двукратно вырождена по спину. Однако, в случае электронов в (100)Si-МОП структурах имеется ещё дополнительное двукратное долинное вырождение, то есть полная кратность вырождения равна 4. Как было показано в ряде работ^{2,3}, многодолинность приводит к существенному изменению свойств системы. В последнее время, в связи с развитием спинтроники, наблюдается всплеск интереса к исследованию свойств двумерных систем, связанных с дискретными индексами (спином, и долиной). В данную диссертацию вошли исследования, проведённые в лаборатории СКЭС ОФТТ ФИАН, и посвящённые изучению влияния спинового и долинного вырождения на транспорт и термодинамику сильно-взаимодействующей двумерной электронной системы в кремнии.

Наиболее легко измеряемой характеристикой двумерной системы является её сопротивление. При достаточно низких температурах в сопротивлении проявляются квантовые эффекты. Одним из инструментов для их разделения и исследования является магнитное поле, приложенное перпендикулярно плоскости 2D системы. Теория квантовых эффектов в магнитосопротивлении на сегодняшний день хорошо разработана и про-

¹A. Punnoose and A. M. Finkel'stein, Dilute Electron Gas near the Metal-Insulator Transition: Role of Valleys in Silicon Inversion Layers, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 016802 (2002).

²V. M. Pudalov, M.E.Gershenson, H. Kojima, G. Brunthaler, A. Prinz, and G. Bauer, Interaction Effects in Conductivity of Si Inversion Layers at Intermediate Temperatures, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 126403 (2003).

³N. N. Klimov, D. A. Knyazev, O. E. Omel'yanovskii, V. M. Pudalov, H. Kojima, and M. E. Gershenson, Interaction effects in conductivity of a two-valley electron system in high-mobility Si inversion layers, *Phys. Rev. B* **78**, 195308 (2008).

должна развиваться, в частности, в теории учитываются различные эффекты, связанные с дискретными индексами системы. Необходимость экспериментальной проверки теории эффектов квантовой интерференции и электрон-электронного взаимодействия и определяет **актуальность исследования** магнитосопротивления 2D электронной системы в Si.

Проблема измерения термодинамической восприимчивости χ 2D систем состоит в том, что в типичных образцах полное количество электронных спинов составляет 10^9 - 10^{10} штук, что не может быть детектировано магнитометрами, поэтому большинство методов исследования намагниченности - косвенные. К таким методам можно отнести масштабирование магнитосопротивления в параллельном поле⁴ и исследование биеений осцилляций Шубникова-де Гааза в скрещенных полях⁵. Эти методы (i) предполагают, что система является Ферми-жидкостью, что, строго говоря не доказано для двумерной системы с беспорядком и сильным межэлектронным взаимодействием; (ii) требуют сравнительно сильного магнитного поля $g\mu_B V \gtrsim k_B T$. Отметим, что даже согласно предсказаниям ферми-жидкостной теории⁶ значения χ и температурные зависимости $\chi(T)$ в диапазонах $g\mu_B V > k_B T$ и $g\mu_B V \ll k_B T$ отличаются. Результаты предшествующих термодинамических измерений χ ^{7,8} при $g\mu_B V > k_B T$ согласуются с результатами транспортных измерений^{3,4}. Подчеркнем, что ранее термодинамические измерения χ не проводились в условиях $g\mu_B V \ll T$, что и определяет **актуальность** проведенных в данной работе термодинамических измерений.

⁴A. A. Shashkin, S. V. Kravchenko, V. T. Dolgoplov, T. M. Klapwijk, Phys. Rev. Lett., **87**, 86801 (2001).

⁵V. M. Pudalov, M. E. Gershenson, H. Kojima, N. Butch, E. M. Dizhur, G. Brunthaler, A. Prinz, and G. Bauer, Low-Density Spin Susceptibility and Effective Mass of Mobile Electrons in Si Inversion Layers, Phys. Rev. Lett. **88**, 196404 (2002).

⁶D. L. Maslov, A. V. Chubukov, Nonanalytic paramagnetic response of itinerant fermions away and near a ferromagnetic quantum phase transition, Phys. Rev. B **79**, 075112 (2009).

⁷O. Prus, Y. Yaish, M. Reznikov, U. Sivan, and V.M. Pudalov, Thermodynamic spin magnetization of strongly correlated two-dimensional electrons in a silicon inversion layer, Phys.Rev. B **67**, 205407 (2003).

⁸A. A. Shashkin, S. Anissimova, M. R. Sakr, S. V. Kravchenko, V. T. Dolgoplov, and T. M. Klapwijk, Pauli Spin Susceptibility of a Strongly Correlated Two-Dimensional Electron Liquid, Phys. Rev. Lett. **96**,036403 (2006).

Цель.

Целью данной диссертационной работы являлось исследование влияния дискретных квантовых чисел (спина и долинного индекса) на транспортные и термодинамические свойства двумерной электронной системы в Si-МОП структурах.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

1. Исследование влияния низкотемпературных междолинных переходов в кремниевых структурах на квантовый транспорт, в частности, слабую локализацию.
2. Измерение термодинамической спиновой восприимчивости двумерной системы электронов в кремнии в пределе слабых магнитных полей, исследование температурной зависимости восприимчивости.
3. Исследование особенностей тензора магнитосопротивления (ρ_{xx} и ρ_{xy}) 2D электронной системы в кремнии в широком диапазоне температур в магнитных полях $B < 1/\mu$, перпендикулярных 2D плоскости.

Научная новизна и практическая значимость работы.

В работе впервые предложен и применён метод измерения времён бесфононных междолинных переходов τ_v в двухдолинной двумерной системе. Измерены времена междолинных переходов в нескольких структурах, установлено, что τ_v не зависит от температуры и уменьшается с ростом электронной плотности. Это время определяет степень перемешивания долин, и, следовательно, эффективное число каналов электрон-электронного взаимодействия. Благодаря этому, данная экспериментальная работа **способствовала появлению нескольких теоретических и экспериментальных работ**, посвящённых исследованию влияния междолинных переходов на эффекты электрон-электронного взаимодействия в двумерном транспорте заряда.

В работе обнаружен новый эффект - немонотонное магнитосопротивление с максимумом для различных двумерных систем (на основе Si и GaAs) в области, где согласно квазиклассическим теориям и теориям квантовых поправок магнитосопротивление равно или стремится к 0 с ростом температуры. Масштабирование положения максимума **указы-**

вают на квазиклассическую природу эффекта и **необходимость уточнения теории** магнитосопротивления в баллистическом режиме, $T\tau/\hbar > 1$.

В работе впервые проведены измерения термодинамической спиновой восприимчивости двумерной электронной системы в пределе малых магнитных полей. Обнаружена сильная температурная зависимость, приблизительно как $1/T^2$ как в области изолятора $k_F l \sim 1$, так и в области металла $k_F l \gg 1$. **Данный результат показывает, что даже при высоких концентрациях электронов 2D электронная система в Si-МОП структурах демонстрирует нефермижидкостное поведение.**

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Предложен, разработан и осуществлён способ измерения времени междолинных переходов при низких температурах, основанный на анализе магнитосопротивления в слабых полях, обусловленного слабой локализацией. Измерены времена междолинных переходов в нескольких структурах. Установлено, что времена междолинных переходов не зависят от температуры и возрастают с понижением электронной плотности. Такое поведение указывает на бесфононную природу низкотемпературных междолинных переходов, которые обусловлены статическим беспорядком на интерфейсе Si-SiO₂, а не в объёме Si.
2. Впервые измерена термодинамическая спиновая восприимчивость в пределе малых магнитных полей для 2D системы на основе Si при низких температурах. Она в десятки раз превосходит восприимчивость Паули и падает с ростом T примерно как $1/T^2$. Повышенная восприимчивость определяется намагничиванием $\sim 8 \cdot 10^{10}$ см⁻² электронных спинов. Намагниченность пропорциональна полю в полях B , меньших некоторого характерного поля B^* . B^* пропорционально температуре, как можно было ожидать для системы локализованных независимых спинов, но коэффициент пропорциональности соответствует увеличенному g-фактору ~ 10 , что говорит о сильных межэлектронных корреляциях.
3. В баллистическом режиме $T\tau > 1$ обнаружено немонотонное магнитосопротивление в перпендикулярном поле с максимумом в поле

$V_{max} \propto T$. Установлено, что эффект является свойством различных 2D систем: Si-МОП структур, гетеропереходов GaAs/AlGaAs, квантовых ям в GaAs, гетеропереходах InGaAs/GaAs с затвором.

Апробация работы.

Работа докладывалась на семинарах в ФИАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, университете Технион (Хайфа, Израиль), а также на Всероссийских конференциях по физике полупроводников (2005, 2007), конференции APS march meeting (2006), международной конференции Fundamentals of electronic nanosystems, (2006), конференциях МФТИ (2008, 2009), Международной теоретической школе в ICTP, (Триест, Италия, 2009), Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур (Санкт-Петербург, 2009), XVIII Уральской международной зимней школе по физике полупроводников (Екатеринбург, 2010).

Публикации.

Результаты работы опубликованы в 4 статьях и тезисах на 12 конференций. Список публикаций приведён в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Диссертация содержит 6 глав, 104 страницы, 34 рисунка, 1 таблицу, 128 библиографических записей в списке литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В главе “**1. Введение**” даётся обоснование актуальности темы диссертации, представления о многодолинной системе электронов в кремнии, описывается содержание диссертации.

В главе “**2. Образцы и методики измерений**” рассмотрены используемые в работе кремниевые МОП-структуры, описано, как в этих структурах создаётся двумерный слой электронов и методы определения концентрации носителей n . Также рассмотрены используемые в работе криомагнитные системы, четырёхточечная схема, используемая для измерения сопротивления и холловского сопротивления образцов, а также

установка для измерения термодинамической спиновой намагниченности.

В главе “3. Слабая локализация и междолинные переходы в 2D электронной системе на основе кремния” разработан и применён метод измерения времени междолинных переходов. В транспортных свойствах 2D электронной системы в (100) Si МОП структуре, должно проявляться двукратное долинное вырождение электронного спектра.

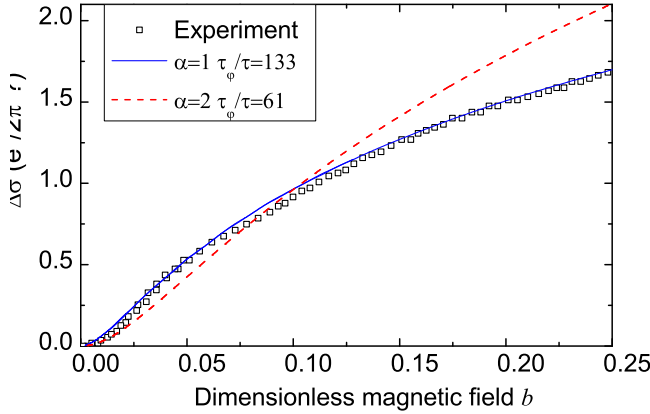


Рис. 1: Пример данных МП для образца Si40. $T = 1.5\text{K}$, $n = 3.3 \cdot 10^{11}\text{cm}^{-2}$ (символы). Пунктир - подгонка данных с $\alpha = 2$, сплошная линия - с $\alpha = 1$. Значение подгоночного параметра τ_φ/τ показано на рисунке.

линейных переходов в качестве инструмента была выбрана слабая локализация (СЛ), а именно магнитопроводимость (МП), обусловленная слабой локализацией в малых полях, перпендикулярных 2D плоскости. Величина поля, в котором происходит переход от эффективной однодолинности к двухдолинности, определяется соотношением между временем междолинных переходов и τ . В многочисленных ранних измерениях МП, обусловленной слабой локализацией в кремниевых МОП-структурах^{10,11,12}, экспериментальные данные обрабатывались при по-

При низких температурах междолинное рассеяние на примесях или шероховатостях интерфейса в этих структурах определяет граничную температуру, ниже которой для ряда эффектов долины можно считать перемешанными, а систему - эффективно

однодолинной^{3,9}. Ранее не проводилось систематических исследований междолинной релаксации, обусловленной упругими процессами, в кремниевых МОП-структурах. Для измерения времени междо-

⁹I. S. Burmistrov and N. M. Chtchelkatchev, Electronic properties in a two-dimensional disordered electron liquid: Spin-valley interplay. Phys. Rev. B **77**, 195319 (2008).

¹⁰R. G. Wheeler, Magnetoconductance and weak localization in silicon inversion layers, Phys. Rev. B **24** 4645 (1981).

¹¹S. Kawaji and Y. Kawaguchi, Negative Magnetoresistance and Inelastic scattering Time in Si-MOS Inversion Layers, J. Phys. Soc. Jpn. **53**,2868 (1984).

¹²G. Brunthaler, A. Prinz, G. Bauer, and V. M. Pudalov, Exclusion of Quantum Coherence as the Origin of the 2D Metallic State in High-Mobility Silicon Inversion Layers, Phys. Rev. Lett. **87**, 096802 (2001).

мощи теории Хиками-Ларкина-Нагаоки(ХЛН)¹³:

$$\Delta\sigma\left(b, \frac{\tau_\varphi}{\tau}\right) = \frac{\alpha e^2}{2\pi^2\hbar} \left[\psi\left(\frac{1}{2} + \frac{\tau}{b\tau_\varphi}\right) + \ln\frac{b\tau_\varphi}{\tau} \right]. \quad (1)$$

Здесь ψ – дигамма-функция, e – заряд электрона, \hbar – постоянная Планка, $b = B/B_{tr}$ – безразмерное магнитное поле, $B_{tr} = \Phi_0/2\pi l^2$, $\Phi_0 = \pi\hbar/e$, и l – длина свободного пробега. Эмпирически вводимый префактор α и безразмерное отношение τ_φ/τ обычно рассматривались как подгоночные параметры. Уравнение (1) с префактором $\alpha = 1$ является точным результатом для однодолинной системы в диффузионном приближении, т.е. при $\tau_\varphi \gg \tau$ и $b \ll 1$ ¹³. Для системы же двух независимых долин α должно быть равно 2.

На Рис. 1 а показана подгонка типичной кривой МП формулой (1). Подгонка осуществлялась по методу наименьших квадратов с использованием точек в интервале полей $b = 0 - 0.2$ и дала $\tau_\varphi/\tau = 133$ и $\alpha = 1$. Такое заниженное значение префактора согласуется с результатами ранних измерений^{14,15,16}, и, как показано в данной работе, связано с перемешиванием долин. Всего в работе исследовались 3 Si-МОП структуры с подвижностями носителей 2, 0.5 и 0.2 м²/Вс, при температурах 0.1 - 4.2 К. На всех трёх структурах были получены сходные результаты, поэтому в авторефератете подробно приводятся результаты для одного из образцов (Si 40). Специально для целей данной работы была построена теория МП двухдолинной двумерной системы с учётом перемешивания долин, применимая в широком диапазоне классически слабых магнитных полей¹⁷. Значение МП, согласно этой теории, складывается из двух частей:

$$\Delta\sigma(B) = \Delta\sigma^{(a)} + \Delta\sigma^{(b)}. \quad (2)$$

¹³S. Hikami, A. Larkin, and Y. Nagaoka, Spin-Orbit Interaction and Magnetoresistance in the Two Dimensional Random System, *Progr. Theor. Phys.* **63**, 707 (1980).

¹⁴R. G. Wheeler, Magnetoconductance and weak localization in silicon inversion layers, *Phys. Rev. B* **24** 4645 (1981).

¹⁵S. Kawaji and Y. Kawaguchi, Negative Magnetoresistance and Inelastic scattering Time in Si-MOS Inversion Layers, *J. Phys. Soc. Jpn.* **53**,2868 (1984).

¹⁶G. Brunthaler, A. Prinz, G. Bauer, and V. M. Pudalov, Exclusion of Quantum Coherence as the Origin of the 2D Metallic State in High-Mobility Silicon Inversion Layers, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 096802 (2001).

¹⁷A. Yu. Kuntsevich, N. N. Klimov, S. A. Tarasenko, N. S. Averkiev, V. M. Pudalov, H. Kojima, and M. E. Gershenson, Intervalley scattering and weak localization in Si-based two-dimensional structures, *Phys. Rev. B* **75**, 195330 (2007).

Здесь

$$\Delta\sigma^{(a)} = -\frac{e^2 b}{2\pi^2\hbar} \sum_{N=0}^{\infty} \mathcal{C}_N P_N^2, \quad \Delta\sigma^{(b)} = \frac{e^2 b}{2\pi^2\hbar} \sum_{N=0}^{\infty} (\mathcal{C}_N + \mathcal{C}_{N+1}) Q_N^2/2, \quad (3)$$

где

$$\mathcal{C}_N = \frac{2(1 - \tau/\tau_v)^3 P_N}{1 - (1 - \tau/\tau_v)P_N} + \frac{P_N}{1 - P_N} - \frac{(1 - 2\tau/\tau_v)^3 P_N}{1 - (1 - 2\tau/\tau_v)P_N}, \quad (4)$$

а P_N и Q_N – коэффициенты, задаваемые выражениями.¹⁸

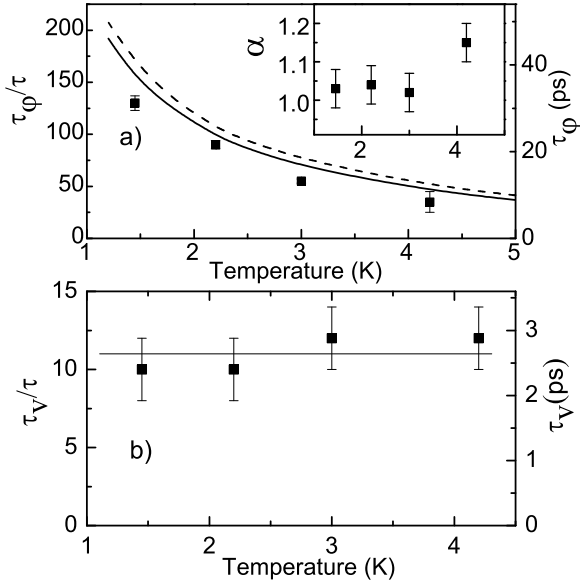


Рис. 2: а) Температурные зависимости измеренных значений τ_φ в единицах τ (левая ось) и в пс (правая ось) для образца Si40, $n = 33.4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Сплошной линией показана зависимость $\tau_\varphi(T)$, вычисленная по теории поправок от взаимодействия (см. текст) с 15 триплетами, пунктиром - с 3 триплетами. На вставке - соответствующие значения префактора α . б) Температурные зависимости измеренных значений τ_v в единицах τ (левая ось) и в пс (правая ось) для того же образца и того же значения n . Горизонтальная линия - среднее значение τ_v .

Выражения (2) и (3) описывают СЛ магнитопроводимость во всех классически слабых магнитных полях $\omega_c \tau \equiv \mu B < 1$. В предельном случае слабого междолинного рассеяния ($1/\tau_v = 0$), (3) сводится к обычным выражениям для СЛ поправки однодолинной системы и, в частности, к формуле ХЛН (1) в диффузионном пределе. Единственное отличие - префактор 2 из-за долинного вырождения.

Данные выражения представляют собой суммы рядов, сходящиеся тем медленнее, чем меньше b . В результате анализа этих выражений был предложен способ обработки экспериментальных данных МП, включающий в себя: (i) определение времени сбоя фазы τ_φ при помощи быстрой подгонки МП по формуле (1) в малых полях $b <$

18

$$P_N = \sqrt{\frac{2}{b}} \int_0^\infty \exp \left[-x \sqrt{\frac{2}{b}} \left(1 + \frac{\tau}{\tau_\varphi} \right) - \frac{x^2}{2} \right] L_N(x^2) dx, \quad Q_N = \sqrt{\frac{2}{b}} \int_0^\infty \exp \left[-x \sqrt{\frac{2}{b}} \left(1 + \frac{\tau}{\tau_\varphi} \right) - \frac{x^2}{2} \right] \frac{L_N^1(x^2)x}{\sqrt{N+1}} dx,$$

где L_N и L_N^1 - полиномы Лагерра.

0.15, и (ii) последующее определение времени междолинных переходов τ_v (при помощи данной теории) по результатам измерений МП в диапазоне полей $0.2 < b < 0.4$. Из анализа экспериментальных данных были получены следующие результаты:

1. Зависимость τ_φ от температуры согласуется с теоретическими предсказаниями¹⁹, как показано на Рис. 2а. При этом величина фермижидкостной константы F_0^σ , входящая в теорию, была взята из независимых измерений⁵. Такое согласие подтверждает правильность проделанного анализа.
2. При обработке магнитопроводимости в слабых полях по формуле (1), мы также получаем префактор α , который близок к 1 для всех образцов (см. вставку на Рис. 2а); это означает, что долины перемешаны на масштабе времён τ_φ .
3. Величина τ_v не зависит от температуры в пределах той точности, с которой она определяется (см. Рис. 2б). Этот результат подтверждает, что междолинное рассеяние при низких температурах является бесфононным упругим процессом, и следовательно определяется статическим беспорядком.
4. Для всех трёх образцов, *относительная частота* междолинных переходов (по отношению к частоте внутримолиновых) растёт с ростом концентрации. Этот факт указывает на то, что рассеиватели на интерфейсе Si-SiO₂ играют ключевую роль в процессах междолинных переходов.

Измеренные времена междолинных переходов τ_v для всех образцов находятся в диапазоне $(3-12)\tau$, что означает, что на масштабе времени $\sim \tau$, долинный индекс ещё является хорошим квантовым числом. Разработанный в данной работе метод анализа является самосогласованным и может быть применён для исследования междолинных переходов в других многодолинных системах.

В главе “**4. Измерения диагональной и холловской компонент магнитосопротивления в кремниевых системах**” описываются измерения и интерпретация тензора магнитосопротивления двумерной вырожденной электронной системы при $k_F l \gg 1$ в классически слабых

¹⁹B.N. Narozhny, G. Zala, I.L. Aleiner, Interaction corrections at intermediate temperatures: Dephasing time, Phys. Rev. B **65**, 180202 (2002).

магнитных полях $\mu B \lesssim 1$, перпендикулярных плоскости образца. Классическая теория магнитотранспорта предсказывает, что (i) магнитосопротивление (МС) $\Delta\rho(B) \equiv \rho_{xx}(B) - \rho_{xx}(0)$ изотропной системы должно быть равно нулю, а холловское сопротивление ρ_{xy} , равно B/ne .

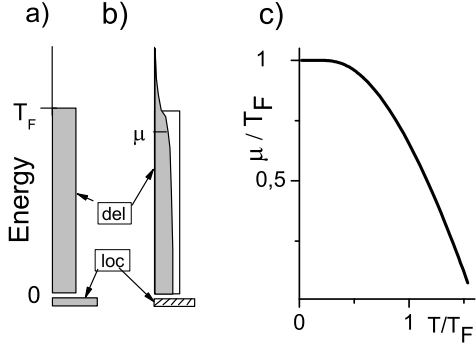


Рис. 3: Схематическое изображение процесса термической активации в модели с зонами делокализованных (del) и локализованных (loc) состояний. а) Распределение электронов по энергиям при $T = 0$. б) То же для конечной температуры $T \sim T_F$. Штриховка изображает частично заполненную зону локализованных состояний, а зачернённые области - полностью заполненную зону. в) Температурная зависимость химического потенциала.

К) и концентраций электронов ($4 - 15 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$), где диагональная компонента ρ_{xx} изменяется с температурой в 2-5 раз. В этом диапазоне температур ρ_{xy} имеет хорошо различимый максимум при температуре T^{\max} . При увеличении концентрации T^{\max} смещается в область более высоких температур. Полное изменение ρ_{xy} составляет 1-3%. Для объяснения поведения $\rho_{xy}(T)$ при $T < T^{\max}$ было использовано квазиклассическое выражение²⁰:

$$\rho_{xy} = \frac{B \langle \tau^2 \rangle}{ne \langle \tau \rangle^2} = F(T/E_F), \quad (5)$$

где усреднение времён по энергии электронов осуществляется в ос-

²⁰S. Das Sarma and E. H. Hwang, Temperature Dependent Weak Field Hall Resistance in Two-Dimensional Carrier Systems, Phys. Rev. B 71, 195322 (2005).

Поэтому, когда в экспериментах наблюдается ненулевое МС, или зависящий от поля или температуры холловский коэффициент, то это означает, что не выполняется одно из предположений классической теории, что привлекает внимание как теоретиков, так и экспериментаторов. Данная глава содержит раздел “4.1 Обзор теоретических и экспериментальных исследований”, а также три раздела, посвящённых исследованию тензора МС 2D электронной системы в кремнии в различных режимах.

В разделе “4.2 Измерение холловского сопротивления в широком интервале температур” рассматривается зависимость холловского сопротивления ρ_{xy} (измеренного в поле 0.2 Тесла) для 2D газа высокой подвижности ($\mu = 2.5 \text{м}^2/\text{Вс}$) в Si МОП структуре, в том диапазоне температур (1-35

новном по полосе $k_B T$ вблизи энергии Ферми. В частности, в работе [18] было выведено аналитическое выражение для данного отношения (штрих-пунктирная на рисунке 4). Из рисунка 4 следует, что результаты измерений согласуются с квазиклассическим рассмотрением (5) в диапазоне температур $1/\tau < T < T^{\max}$.

При $T < 1/\tau \sim 1\text{К}$, по-видимому, необходимо учесть квантовые поправки²¹. Падение холловского коэффициента с температурой при $T > T^{\max}$ нам удалось объяснить активацией локализованных электронов в предположении, что помимо зоны делокализованных состояний зоны проводимости в образце имеются еще локализованные электроны, расположенные по энергии вблизи дна зоны проводимости (модель системы схематически показана на рисунке 3). В таком случае, термоактивация локализованных электронов приводит к увеличению числа делокализованных электронов и, соответственно, падению холловского сопротивления с ростом температуры (сплошная линия на рисунке 4). Для различных значений полной концентрации n концентрация электронов в этой зоне (подгоночный параметр) получилась около $7 \cdot 10^{11}\text{см}^{-2}$.

В разделе “4.3 Диффузионная поправка от электрон-электронного взаимодействия” для выявления диффузионной поправки к проводимости от электрон-электронного взаимодействия в

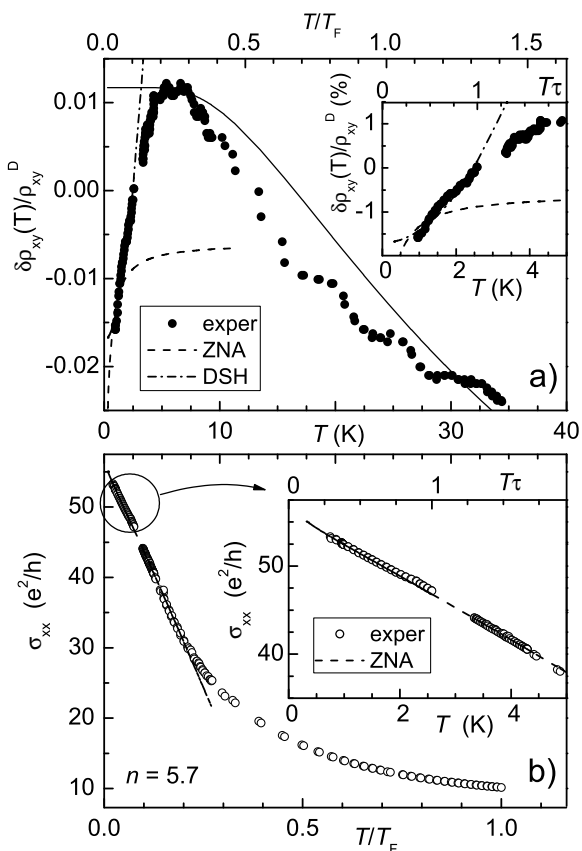


Рис. 4: а) Температурная зависимость отклонения ρ_{xy} от классического значения B/ne . б) Температурная зависимость $1/\rho_{xx}$ проводимости. $n = 5,7 \cdot 10^{11}\text{см}^{-2}$. На вставках изображены начальные участки зависимостей. Пунктирные линии (ZNA) - вычисленные квантовые поправки²¹. Штрих-пунктирные линии (DSH) - квазиклассическая поправка по формуле (5). Сплошная линия - термоактивационная зависимость (см. текст).

²¹G. Zala, B. N. Narozhny, and I. L. Aleiner, Interaction corrections to the Hall coefficient at intermediate temperatures, Phys. Rev. B **64**, 201201 (2001).

двухдолинной системе нами был использован разработанный недавно способ²², основанный на анализе тензора магнитосопротивления системы в перпендикулярном поле. Для того, чтобы совместить диапазон доступных температур с диффузионной областью $T\tau < 1$, исследовались разупорядоченные 2D системы (Si МОП структуры с низкой подвижностью носителей $\sim 0.2 \text{ м}^2/\text{Вс}$). Полученное значение зависящей от температуры части поправки равно $(e^2/2\pi^2\hbar)K_{ee} \ln(T)$. При этом коэффициент пропорциональности K_{ee} , оказался меньше, чем предсказывает теория для двухдолинной системы, но больше чем для однодолинной⁹. Это свидетельствует о том, что долины перемешаны. Однако, в случае перемешанных долин следует ожидать, что K_{ee} зависит от T . Такую температурную зависимость, однако, не удастся выявить из экспериментальных данных в пределах точности наших измерений.

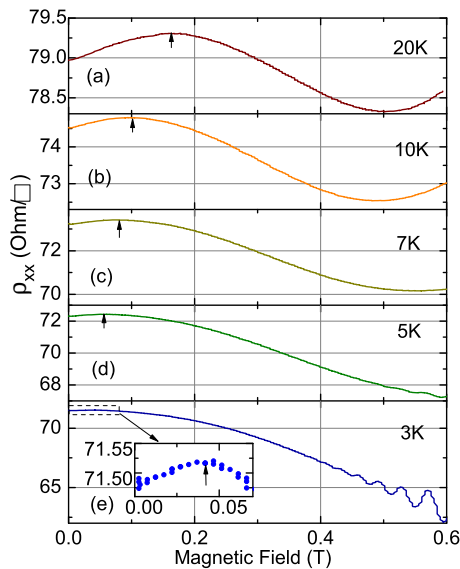


Рис. 5: Магнитосопротивление образца GaAs 28 при различных температурах. Концентрация электронов $n = 0.35 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Значения температуры показаны на рисунке. $\hbar/k_B\tau = 1\text{K}$.

структуры с квантовой ямой AlGaAs-GaAs-AlGaAs ($\mu = 0.8-1.6 \text{ м}^2/\text{Вс}$) и GaAs-InGaAs-GaAs ($\mu = 2.2 \text{ м}^2/\text{Вс}$) с затвором.

В разделе “4.5 Немонотонное магнитосопротивление в баллистической области”

исследуется МС различных 2D электронных систем при $T\tau > 1$. В классическом пределе $T\tau \gg 1$ можно ожидать, что МС в перпендикулярном поле будет равно 0. Насколько нам известно, систематических экспериментальных исследований МС в полупроводниковых структурах с 2D электронным газом с короткодействующим рассеивающим потенциалом при $\omega_c\tau \lesssim 1$ и $T\tau > 1$ ранее не проводилось. В данной работе МС в этой области исследовалось для шести различных структур с 2D газом: двух Si-МОП транзисторов (с пиковыми подвижностями $\mu = 1-2 \text{ м}^2/\text{Вс}$), двух GaAs-AlGaAs гетероструктуры ($\mu = 21-24 \text{ м}^2/\text{Вс}$), структуры

²²G. M. Minkov, A. V. Germanenko, O. E. Rut, A. A. Sherstobitov, V. A. Larionova, A. K. Bakarov, and B. N. Zvonkov, Diffusion and ballistic contributions of the interaction correction to the conductivity of a two-dimensional electron gas. Phys. Rev. B **74**, 045314 (2006).

Примеры кривых магнитосопротивления, полученных при различных температурах для гетероструктуры GaAs/AlGaAs при фиксированной концентрации электронов показаны на Рис. 5. Предметом данной главы является немонотонное МС. В различных образцах при различных температурах наблюденное немонотонное МС имеет одни и те же особенности: (i) эффект мал (типичная величина порядка 1% от сопротивления), (ii) немонотонное МС наблюдается только при $T \geq 1.3\hbar/k_B\tau$, (iii) максимум МС растёт по амплитуде и смещается в более сильные поля по мере увеличения температуры (положение максимума по полю соответствует $\omega_c\tau > 1$ и примерно пропорционально T).

Для всех GaAs систем, у которых сопротивление незначительно меняется с температурой (в отличие от Si-МОП структур) наблюдается удовлетворительное масштабирование положения максимума с T/E_F , что указывает на квазиклассическую природу эффекта. С другой стороны, как следует из доказанной в главе теоремы, в приближении Друде МС не может быть отрицательным, если учитывать только зависимость $\tau(\epsilon)$. Расхождение наблюдаемого эффекта немонотонного МС с теорией свидетельствует о том, что теория МС на сегодняшний день нуждается в доработке, по крайней мере в баллистическом режиме $T\tau > 1$.

В главе “5. Термодинамические измерения: восприимчивость 2D системы” описываются измерения спиновой восприимчивости 2D системы в Si-МОП структурах в широком диапазоне магнитных полей от $g\mu_B V \ll k_B T$ до $g\mu_B V > k_B T$.

Как показано в обзоре литературы в первой части главы, все проведённые ранее измерения спиновой восприимчивости были выполнены в условиях $g\mu_B V > k_B T$. При этом температурная зависимость спиновой восприимчивости не могла наблюдаться практически. Метод измерений спиновой восприимчивости поясняется на рисунке 6. При приложении переменного магнитного поля, параллельного плоскости образца, через образец потечёт ток перезарядки, пропорциональный

$$\partial\mu/\partial B = (e/C)dQ/dB. \quad (6)$$

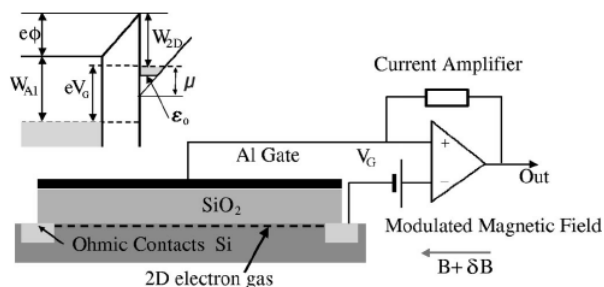


Рис. 6: Схема измерения магнитной восприимчивости и зонная диаграмма для 2D системы в кремниевой МОП-структуре.

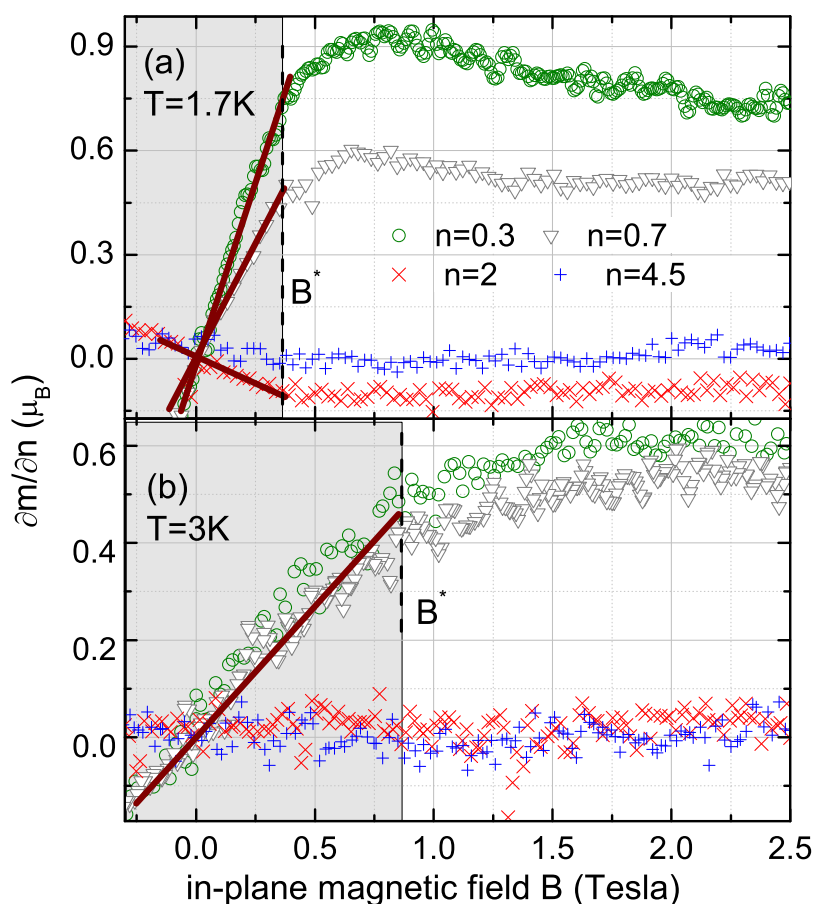


Рис. 7: Примеры измеряемых кривых $\partial m/\partial n(B_{\parallel})$ при различных температурах (а - 1.5К; б - 3К) и концентрациях электронов (показаны на рисунке, в единицах 10^{11}см^{-2}). Стрелки обозначают поле, в котором линейный режим сменяется нелинейным, а чёрные сплошные линии - графический способ нахождения этого поля. На панели (с) сплошные цветные линии - усреднённый линейный ход экспериментальных данных $\partial\mu/\partial V(B)$.

Измерения стабилизировалась температура (от 1.7 до 13К). Измерения проводились на образцах из двух групп: R(русские), с пиковой подвижностью $2.5\text{-}3.4\text{ см}^2/\text{Вс}$ при 1.7 К и $n_c = 8.5 \times 10^{10}\text{ см}^{-2}$; и H(голландские) с пиковой подвижностью $3\text{ см}^2/\text{Вс}$; результаты полученные на различных образцах были аналогичными.

Примеры экспериментальных данных, полученных при различных температурах и плотностях собраны на рисунке 7. В малых полях $\partial m/\partial n(B)$ растёт линейно с полем ниже некоторого поля B^* ; линейная зависимость

Это позволяет определить величину производной от химического потенциала по полю $\partial\mu/\partial V$, которая, согласно соотношению Максвелла равна $-\partial m/\partial n$, где m - магнитный момент на единицу площади образца. Если взять интеграл $\partial m/\partial n$ по концентрации от $n = 0$ до n , то получится намагниченность $m(n)$.

Магнитное поле в эксперименте модулировалось с частотой $f = 6.1$ Гц, и среднеквадратичным значением 27 мТ , а постоянная составляющая медленно (за 20 минут) разворачивалась от -2 до 2 Тл. Напряжение на затворе при этом поддерживалось постоянным. На время измерения

отмечена прямыми на Рис. 7.

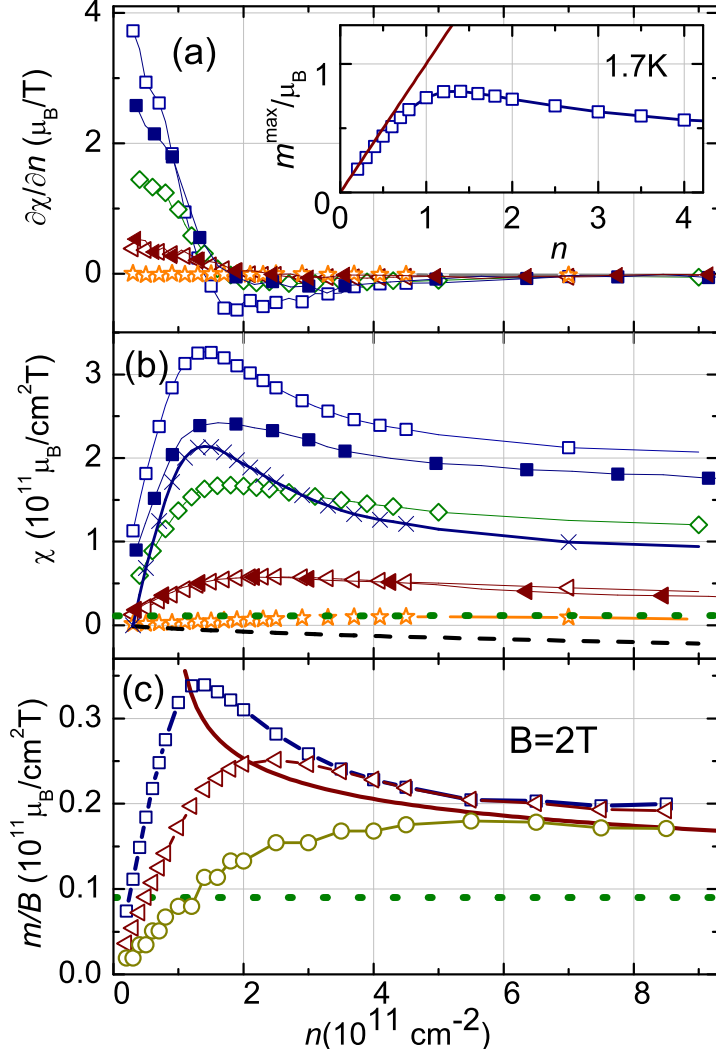


Рис. 8: (a) $\partial\chi/\partial n(n)$ для различных температур. Пустые символы - образец типа R, полные символы - образец типа H. (b) Величина $\chi(n)$, полученная при интегрировании; Точки - неперенормированная восприимчивость Паули. \times - то же, что и \square , только проинтегрированная от n_L . (c) Отношение m/B в поле 2Т. Сплошная линия - χ из в работы [17]. Различные T показаны символами: \square - 1.7К; \diamond - 2.4К; \triangleleft - 4К; \circ - 7К; \star - 13К. Вставка - максимальная намагниченность в диапазоне полей $0 < B < 2$ Т при $T = 1.7$ К.

измерениями^{7,8}; (ii) χ и $\partial\chi/\partial n$ (в области концентраций $n < 3 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$) падают с ростом T примерно как $1/T^2$; (iii) максимальное значение восприимчивости в 40 раз превосходит восприимчивость Паули. В больших магнитных полях, $g\mu_B B > T$ (на Рис. 8с - при 2 Тл.) такое сингу-

В поле выше B^* наклон меняется; величина B^* не зависит от концентрации электронов в пределах точности измерения и определяется температурой: $B^* = k_B T / 5.7 \mu_B + 0.03 \text{Тл}$. Для свободных спинов можно было бы ожидать $B^* = 2k_B T / g\mu_B$. Таким образом, для исследуемой системы наблюдается эффективное значение g -фактора, равное 11.4, что свидетельствует о сильных межэлектронных корреляциях.

На Рис. 8а построен наклон $\partial m / \partial n(B)$ в нулевом поле, равный $\partial\chi/\partial n$. Восприимчивость, полученная в результате интегрирования этой величины показана на Рис. 8b. Вне зависимости от образца и предположений интегрирования (i) при малых концентрациях электронов χ растёт с ростом n , при больших - падает, в согласии с ранними термодинамическими

лярное поведение не наблюдается и восприимчивость, по крайней мере при $n > 2 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$ при низких T согласуются с результатами других измерений^{4,5,7,8} (также выполненных в сильных полях $g\mu_B B > T$). В работе также анализируются возможные источники ошибок (диамагнитный сдвиг, ошибка интегрирования) и показывается, что они не могут изменить основных результатов.

В главе “**6. Заключение**” сформулированы следующие основные результаты:

1. Количественно изучена роль междолинных переходов в квантовом транспорте. Предложен способ измерения времени междолинных переходов по магнитосопротивлению, обусловленному слабой локализацией. Измерены времена междолинных переходов в нескольких структурах. Установлено, что время междолинной релаксации не зависит от температуры и возрастает с понижением электронной плотности. Такое поведение указывает на бесфононную природу переходов, которые обусловлены статическим беспорядком на интерфейсе Si-SiO₂.
2. Проведены измерения термодинамической спиновой намагниченности 2D системы в диапазоне полей 0-4 Тесла и температур 1.7-13К. Термодинамическая спиновая восприимчивость в нулевом поле при низких температурах в десятки раз превосходит паулиевскую и спадает с ростом температуры как $1/T^\alpha$, где $\alpha = 2.4 \pm 0.2$. Повышенная восприимчивость определяется перемагничиванием зоны из $\sim 8 \cdot 10^{10} \text{см}^{-2}$ электронов.
3. Поле, до которого продолжается линейный ход намагниченности, B^* , пропорционально температуре, как и ожидается для системы локализованных независимых спинов, но коэффициент пропорциональности соответствует g - фактору 11.4, что говорит о сильных межэлектронных корреляциях.
4. Проведены измерения холловского сопротивления двумерной системы в Si-МОП структурах при температурах 1-30 К в “металлической” области концентраций. Холловское сопротивление в зависимости от температуры ведёт себя немонотонным образом, причём в высоких температурах обнаруживает признаки активации из зоны локализованных состояний с ёмкостью $\sim 8 \cdot 10^{10} \text{см}^{-2}$ электронов.

5. Впервые проведены измерения логарифмической по температуре поправки к проводимости от электрон-электронного взаимодействия в кремниевых МОП-структурах. Исследуемая поправка оказалась меньше ожидаемого значения.
6. В баллистическом режиме $T\tau > 1$ обнаружено немонотонное магнитосопротивление в перпендикулярном поле с максимумом в поле $B^{max} \propto T$. Установлено, что эффект является универсальным свойством исследованных 2D систем в Si-МОП, GaAs/AlGaAs, и других структурах. Качественное объяснение эффекта даёт теория квантовых поправок, учитывающая закругление электронных траекторий в магнитном поле.

Полученные результаты опубликованы в следующих работах.

Статьи:

1. А.Ю. Кунцевич, Д.А. Князев, В.И. Козуб, В.М. Пудалов, Г. Брунхалер, Г. Бауэр, Немонотонная температурная зависимость холловского сопротивления 2D-системы электронов в Si, Письма в ЖЭТФ, том 81, вып. 8, с. 502–506 (2005);
2. A. Yu. Kuntsevich, N. N. Klimov, S. A. Tarasenko, N. S. Averkiev, V. M. Pudalov, H. Kojima, and M. E. Gershenson, Intervalley scattering and weak localization in Si-based two-dimensional structures, Phys. Rev. B **75**, 195330 (2007);
3. A. Yu. Kuntsevich, G. M. Minkov, A. A. Sherstobitov, and V. M. Pudalov, Nonmonotonic magnetoresistance of two-dimensional electron systems in the ballistic regime, Phys. Rev. B **79**, 205319 (2009);
4. N. Tenen, A. Yu. Kuntsevich, V. M. Pudalov, T. M. Klapwijk, M. Reznikov, Thermodynamic magnetization of a strongly interacting two-dimensional system, arXiv:0910.5724 (2009).

Доклады на конференциях:

1. Международная зимняя школа по физике полупроводников при ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.Петербург, 2005 ; доклад: А.Ю.Кунцевич,

Анализ рассеяния на крупномасштабном потенциале в двумерных электронных системах с низкой концентрацией.

2. Всероссийская конференция по физике полупроводников, Звенигород, 2005, стендовый доклад: Д.А.Князев, А.Ю.Кунцевич, В.М.Пудалов, Немонотонная температурная зависимость холловского сопротивления 2D-системы электронов в Si
3. Конференция APS march meeting, Baltimore, 2006, содокладчик, N. N. Klimov , A.Yu. Kuntsevich , V. M. Pudalov , H. Kojima , M. E. Gershenson Quantum effects in the conductivity of high-mobility Si MOSFETs at ultra-low temperatures.
4. Международная конференция Fundamentals of electronic nanosystems, С.Петербург, 2006, стендовый доклад: А.Ю. Kuntsevich, N.N. Klimov, V.M.Pudalov, М.Е. Gershenson, H. Kojima, Intervalley scattering rate in Si-MOS structures.
5. Всероссийская конференция по физике полупроводников, Екатеринбург, 2007, стендовый доклад: А.Ю.Кунцевич, Н.Н. Климов, С.А. Тарасенко, Н.С.Аверкиев, В.М.Пудалов, Х. Кожима и М.Е. Гершензон, Роль междолинного рассеяния в квантовом транспорте в кремниевых МДП-структурах.
6. Научно-образовательная конференция National Instruments 2007, Москва, 2007, доклад: А.Ю. Кунцевич, А.В. Филатов, Недорогая система управления сверхпроводящим соленоидом с биквадрантным источником тока.
7. 3я международная конференция Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости, ФПС-2008, Звенигород, 2008. Стендовый доклад: А.Ю. Кунцевич, В.А. Мальгинов, Система сбора данных для исследования переходных процессов в ВТСП устройствах.
8. Конференция МФТИ 2008, А.Ю. Кунцевич, Г.М. Миньков, В.М. Пудалов, доклад: Немонотонное магнитосопротивление двумерных электронных систем в перпендикулярном магнитном поле.
9. Конференция МФТИ 2009, Л.А. Моргун, А.Ю. Кунцевич, В.М. Пудалов, доклад: Диффузионная квантовая поправка к проводимости

от электрон-электронного взаимодействия в двумерных кремниевых системах.

10. XI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто - и наноэлектронике. Кунцевич А.Ю. Устный доклад: Термодинамическая спиновая намагниченность двумерной электронной системы.
11. XI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто - и наноэлектронике. Моргун Л.А, Кунцевич А.Ю., Пудалов В.М., Устный доклад: Диффузионная квантовая поправка к проводимости от электрон-электронного взаимодействия в двумерных электронных системах в кремнии.