

“УТВЕРЖДАЮ”

И.о. директора Института физики  
микроструктур РАН (ИФМ РАН)

- филиала Федерального  
государственного бюджетного

учреждения науки "Федеральный  
исследовательский центр

Институт прикладной физики  
РАН", профессор, д.ф.-м.н.

В.И.Гавриленко

14 сентября 2020г.



### Отзыв

ведущей организации на диссертационную работу *Александра Юрьевича Кунцевича* «Экспериментальное исследование термодинамических и кинетических эффектов в двумерных системах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Одним из основных направлений развития физики конденсированного состояния в настоящее время является исследование двумерных систем. К традиционным двумерным системам, таким как инверсионные каналы и квантовые ямы в полупроводниковых кристаллах, добавились открытые в последние 20 лет структуры из одноатомных слоев, такие как графен и Ван-дер Ваальсовы структуры на его основе, двумерные и трехмерные топологические изоляторы. В этом направлении был получен ряд фундаментальных результатов: бозе-конденсация экситонов в микрорезонаторах с квантовыми ямами, открытие состояний с нулевым сопротивлением при облучении микроволновым излучением, открытие топологически защищенных состояний. Актуальной проблемой изучения двумерных состояний является диагностика электронных свойств. В отличие от трехмерных систем электронные свойства двумерных состояний зависят от геометрических размеров. В настоящее время для диагностики двумерных состояний применяются как традиционные методы, такие как транспортные измерения, циклотронный резонанс, оптическая спектроскопия, так и сравнительно новые, например, фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением. Однако для изучения явлений, связанных с локализацией и электрон-электронным взаимодействием, все еще ощущается ограниченность существующих методов и имеется потребность в развитии новых

подходов. Работы в упомянутых выше направлениях физики двумерных электронных систем постоянно публикуются в ведущих журналах.

Таким образом, актуальность темы диссертации, которая в значительной мере посвящена разработке новых методов изучения свойств двумерного электронного газа, не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, семи глав, благодарностей, заключения и списка литературы. Во введении обоснована актуальность темы исследований, определены цель и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость, кратко обрисована методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, обсуждена достоверность работы, определен личный вклад автора диссертации. Кроме того, во введении приведены сведения об апробации работы и публикации по теме диссертации.

Первая глава диссертации посвящена исследованию спинового магнетизма в кремниевых инверсионных каналах в условиях перехода металл-изолятор. Экспериментально измерены зависимости намагниченности от температуры и магнитного поля. Обнаружены особенности намагниченности в слабых полях, характерные для свободных спинов, но соответствующие примерно в 4 раза большему магнитному моменту. Изучено влияние добавления электронов на намагниченность как со стороны металла, так и со стороны изолятора. В области изолятора обнаружено, что добавление электрона в систему увеличивает её магнитный момент на величину большую магнетона Бора. Для объяснения наблюдаемых результатов выдвинута гипотеза о присутствии в системе спин-капельного состояния.

Вторая глава диссертации посвящена изучению транспортных свойств Si-MOП структур с массивом антиточек. В этой главе впервые обнаружена положительная добавка к холловскому сопротивлению пропорциональная кубу магнитного поля. Для объяснения этой добавки предложено объяснение, связанное с перераспределением тока при увеличении магнитного поля в окрестности квантовых точек.

В третьей главе диссертации разработан оригинальный ёмкостной метод измерения электронной энтропии двумерных систем. Экспериментально показано, что в квантующих магнитных полях метод позволяет оценивать уширения уровней Ландау, циклотронные и спиновые расщепления. Используя этот метод, автор исследовал эволюцию энтропии по мере преобразования двумерной электронной системы из Ферми-жидкости в плазму. Автору удалось обнаружить состояние невырожденной сильно-коррелированной электронной плазмы в инверсионном канале кремниевой МОП структуры. Предложено

феноменологическое описание этого состояния как состояния Ферми-газа с увеличенной массой носителей заряда.

В четвертой главе описаны эксперименты по измерению плотности состояний в боковых долинах дырок в квантовых ямах теллурида ртути методами анализа шубниковских осцилляций и измерения энтропии. Определены эффективные массы дырок в этих долинах.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию электронного магнетизма в малых магнитных полях в квантовых ямах теллурида ртути. В ходе этих исследований автор впервые обнаружил парамагнетизм, связанный с боковыми долинами в валентной зоне (по терминологии автора с тяжелыми дырками) и парамагнетизм связанный с центральной долиной в валентной зоне.

Шестая глава посвящена исследованию квантовых поправок к проводимости в инверсионных каналах МОП структур кремния и пленках халькогенидов висмута. Исследование проводилось в наклонных магнитных полях. В кремниевых структурах в слабых перпендикулярных полях автор обнаружил большое магнетосопротивление в параллельном поле и увеличение холловского коэффициента. В области больших магнитных полей автору удалось исследовать вклад в сопротивление электрон-электронной поправки и показать, что магнетосопротивление имеет не чисто зеемановскую природу. В области температур, при которых тепловая энергия превышает величину размытия, был обнаружен универсальный эффект— немонотонное магнетосопротивление. Кроме того, показано, что наблюдаемое магнетосопротивление в параллельном магнитном поле при низких температурах подавляется перпендикулярной компонентой поля. В тонких пленках халькогенидов висмута, которые являются топологическими изоляторами, обнаружено увеличение коэффициента Холла с понижением температуры. Автору удалось описать проводимость в данных пленках с использованием комбинации проводимости Друде, поправок от слабой локализации и электрон-электронного взаимодействия.

Седьмая глава посвящена анализу влияния термодинамических факторов на фазу квантовых осцилляций в двумерных системах и трехмерных топологических изоляторах. Автор показал, что аномалии в фазе осцилляций магнетосопротивления могут быть вызваны не только фазой Берри, но и термодинамическими причинами, например, пиннингом химического потенциала и неоднородностью системы.

К числу наиболее **научно-значимых** результатов, полученным автором, относятся следующие:

1. Разработка оригинальной методики емкостного метода для измерения производной электронной энтропии по концентрации носителей для двумерных систем, которая, будучи на три порядка более чувствительной по сравнению с калориметрией на переменном токе, позволяет определять циклотронные и спиновые расщепления уровней, а также ширину уровней Ландау.
2. Экспериментальное обнаружение из термодинамических измерений производной магнитной восприимчивости по концентрации в инверсионных каналах кремниевых МОП структур аномалий, которые автор объясняет появлением спин-капельных состояний.
3. Экспериментальное обнаружение состояния невырожденной сильно-коррелированной электронной плазмы в инверсионных каналах кремниевых МОП структур и предложение его описания как Ферми-газа с увеличенной массой носителей заряда.
4. Измерение плотности состояний в боковых долинах валентной зоны и магнитной восприимчивости дырок в квантовых ямах теллурида ртути.
5. Обнаружение в области температур, когда тепловая энергия превышает уширение уровня, универсальной для двумерных систем немонотонной зависимости сопротивления от магнитного поля с максимумом.
6. Обнаружение подавления магнитосопротивления в параллельном поле перпендикулярной компонентой поля в двумерных системах на основе кремния.
7. Экспериментальное определение электрон-электронной поправки к проводимости в двумерных электронных системах на основе кремния с невысокой подвижностью носителей.
8. Анализ влияния термодинамических факторов на фазу квантовых осцилляций применительно к двумерным системам и трехмерным топологическим изоляторам.

Исследования, проведенные в ходе выполнения диссертационной работы, выполнены на мировом научном уровне, что подтверждается уровнем цитирования работ автора диссертации (200 по данным Web of Science за 2020 г) и публикацией работ в ведущих зарубежных и российском журналах Phys. Rev. Lett., Phys Rev.B, Nature Communications и Письма в ЖЭТФ.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- 1) впервые реализовано измерение энтропии в двумерных системах емкостным методом,

- 2) впервые проведено исследование спиновой намагниченности электронов в инверсионном канале в слабых магнитных полях в кремниевых структурах в условиях перехода металл-изолятор
- 3) впервые наблюдалась добавка к эффекту Холла в структуре с антиточками на кремнии
- 4) впервые был обнаружен дырочный парамагнетизм в квантовых ямах HgTe
- 5) впервые выполнены исследования поправки к проводимости от электрон-электронного взаимодействия в двумерной системе на основе кремния и в тонких пленках топологических изоляторов,
- 6) впервые проведен анализ влияния термодинамических факторов на фазу квантовых осцилляций магнитопроводимости двумерных систем.

**Практическая значимость работы** состоит в следующем:

- 1) предложенный метод измерения электронной энтропии двумерных систем является новым информативным способом изучения двумерных систем. Он позволил количественно исследовать ширины уровней Ландау, межэлектронные взаимодействия, с делать выводы о применимости ферми-жидкостных моделей для описания свойств электронов в Si-MOP,
- 2) проведенные экспериментальные исследования послужили проверкой теоретических моделей описания перехода металл-изолятор в двумерных системах,
- 3) проведенные исследования позволили определить плотность состояний и обнаружить парамагнетизм в квантовых ямах HgTe,
- 4) обнаруженная температурная зависимость эффекта Холла и его нелинейность в слабых магнитных полях расширили круг систем, в которых наблюдается это явление. Методика выделения поправки к проводимости в наклонном магнитном поле показала недостаточность существующих теоретических описаний этого явления.
- 5) анализ влияния термодинамического фактора на фазу осцилляций магнетосопротивления позволил объяснить имеющийся в литературе большой разброс данных об этой фазе.

Следует отметить высочайший уровень мастерства экспериментатора, соответствующий передовому мировому уровню, которое продемонстрировал А.Ю.Кунцевич в ходе выполнения диссертационной работы.

Диссертация не лишена недостатков, среди которых необходимо отметить следующие:

- 1) В формуле (1.5) пропущено слагаемое, обусловленное контактной разностью потенциалов. Это видно из предельного случая, когда приложенное напряжение равно нулю и затвор находится в состоянии термодинамического равновесия с полупроводником. В этом случае концентрация электронов в канале определяется контактной разностью потенциалов, а не равна нулю, как это следует из (1.5).
- 2) В левой части формулы (3.2) пропущен заряд электрона.
- 3) Автор использует одинаковые символы для обозначения емкости и теплопроводности ( $C$ ), для химического потенциала и подвижности ( $\mu$ ).
- 4) На рис. 2.1 (с) вместо обозначения  $\mu\text{m}$  использовано  $\text{m}$ .
- 5) Работа изобилует грамматическими неточностями, незавершенными предложениями, пропусками слов (см. стр. 44, 60, 66, 70, 114, 137, 138, 165 и др.)

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы. Большая часть замечаний носит стилистический характер.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при исследовании электронных свойств двумерных систем в ИФМ РАН, в ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН, ИФТТ, Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Институте физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Институте теоретической физики им. Л.Д.Ландау РАН, а также в ряде других научных учреждений.

Работы автора диссертации опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах (все из списка ВАК), неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и известны специалистам. Диссертация и автореферат написаны хорошим и понятным языком. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По объему, научной и практической значимости полученных результатов, диссертационная работа А.Ю.Кунцевича является крупным научным достижением в области физики конденсированного состояния и отвечает требованиям пункта 9 Положения о присуждении учёных степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а её автор, Александр Юрьевич Кунцевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности: 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Доклад по материалам диссертации был представлен А.Ю. Кунцевичем 14 сентября 2020 г на семинаре ИФМ РАН по физике твердого тела. Отзыв на диссертацию был подготовлен доктором физико-математических наук В.Я. Алешкиным и доктором физико-математических наук А.С. Мельниковым и утвержден на этом семинаре.

Доктор физ.-мат. наук,  
Главный научный сотрудник ИФМ РАН  
Телефон и e-mail: 89108760734, aleshkin@ipmras.ru

Владимир Яковлевич Алешкин

Доктор физ.-мат. наук,  
Заведующий лабораторией 122 ИФМ РАН  
Телефон и e-mail 89103929860, melnikov@ipmras.ru

Александр Сергеевич Мельников

Председатель семинара  
Доктор физ.-мат. наук,  
Заведующий отделом 120 ИФМ РАН  
Телефон и e-mail 89200649738, kurin@ipmras.ru

Владислав Викторович Курин

Институт физики микроструктур РАН, д. Афоново, Нижегородская обл., Кстовский район, 603087, Россия, ул. Академическая, д. 7 (почтовый адрес ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия)

Подписи сотрудников ИФМ РАН Владимира Яковлевича Алешкина, Александра Сергеевича Мельникова и Владислава Викторовича Курина заверяю.

Учёный секретарь ИФМ РАН  
к.ф.-м.н.



Д.М. Гапонова

Список работ Института физики микроструктур Российской академии наук по тематике диссертации за последние 5 лет(не более 15):

1. S. S. Krishtopenko, W. Desrat, K. E. Spirin, C. Consejo, S. Ruffenach, F. Gonzalez-Posada, B. Jouault, W. Knap, K. V. Maremyanin, V. I. Gavrilenko, G. Boissier, J. Torres, M. Zaknounge, E. Tournié, and F. Teppe, Massless Dirac fermions in III-V semiconductor quantum wells, *Phys. Rev. B* **99**, 121405(R) (2019).
2. S. S. Krishtopenko, S. Ruffenach, F. Gonzalez-Posada, G. Boissier, M. Marcinkiewicz, M. A. Fadeev, A. M. Kadykov, V. V. Rumyantsev, S. V. Morozov, V. I. Gavrilenko, C. Consejo, W. Desrat, B. Jouault, W. Knap, E. Tournié, and F. Teppe, Temperature-dependent terahertz spectroscopy of inverted-band three-layer InAs/GaSb/InAs quantum well, *Phys. Rev. B* **97**, 245419 (2018).
3. F. Teppe, M. Marcinkiewicz, S. S. Krishtopenko, S. Ruffenach, C. Consejo, A. M. Kadykov, W. Desrat, D. But, W. Knap, J. Ludwig, S. Moon, D. Smirnov, M. Orlita, Z. Jiang, S. V. Morozov, V. I. Gavrilenko, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretiskii, Temperature-driven massless Kane fermions in HgCdTe crystals, *Nature Communications* **7**, 12576 (2016).
4. M. Marcinkiewicz, S. Ruffenach, S. S. Krishtopenko, A. M. Kadykov, C. Consejo, D. B. But, W. Desrat, W. Knap, J. Torres, A. V. Ikonnikov, K. E. Spirin, S. V. Morozov, V. I. Gavrilenko, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretiskii, and F. Teppe, Temperature-driven single-valley Dirac fermions in HgTe quantum wells, *Phys. Rev. B* **96**, 035405 (2017).
5. S. S. Krishtopenko, I. Yahniuk, D. B. But, V. I. Gavrilenko, W. Knap, and F. Teppe, Pressure- and temperature-driven phase transitions in HgTe quantum wells, *Phys. Rev. B* **94**, 245402 (2016).
6. A. V. Ikonnikov, S. S. Krishtopenko, O. Drachenko, M. Goiran, M. S. Zholudev, V. V. Platonov, Yu. B. Kudasov, A. S. Korshunov, D. A. Maslov, I. V. Makarov, O. M. Surdin, A. V. Philippov, M. Marcinkiewicz, S. Ruffenach, F. Teppe, W. Knap, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretiskii, and V. I. Gavrilenko, Temperature-dependent magnetospectroscopy of HgTe quantum wells, *Phys. Rev. B* **94**, 155421 (2016).
7. G. M. Minkov, V. Ya. Aleshkin, O. E. Rut, A. A. Sherstobitov, S. A. Dvoretiskii, N. N. Mikhailov, and A. V. Germanenko, Anisotropy of the in-plane g-factor of electrons in HgTe quantum wells, *Phys. Rev. B* **101**, 085305 (2020).
8. G. M. Minkov, V. Ya. Aleshkin, O. E. Rut, A. A. Sherstobitov, A. V. Germanenko, S. A. Dvoretiskii, and N. N. Mikhailov, Valence band energy spectrum of HgTe quantum wells with an inverted band structure, *Phys. Rev. B* **96**, 035310 (2017).
9. S. S. Krishtopenko and F. Teppe, Realistic picture of helical edge states in HgTe quantum wells *Phys. Rev. B* **97**, 165408 (2018).
10. A. M. Kadykov, S. S. Krishtopenko, B. Jouault, W. Desrat, W. Knap, S. Ruffenach, C. Consejo, J. Torres, S. V. Morozov, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretiskii, and F. Teppe, Temperature-Induced Topological Phase Transition in HgTe Quantum Wells, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 086401 (2018)
11. D. Yu. Vodolazov, A. Yu. Aladyshkin, E.E.Pestov, S.N. Vdovichev, S. S. Ustayshikov, M.Yu. Levichev, A.V. Putilov, P.A.Yunin, A.I. El'kina, N. N. Bukharov, A.M. Klushin, Peculiar superconducting properties of a thin film



superconductor-normal metal bilayer with large ratio of resistivities, *Supercond. Sci. & Tech.* **31**, 115004 (2018).

12. D. M. T. van Zanten, D. M. Basko, I. M. Khaymovich, J. P. Pekola, H. Courtois, and C. B. Winkelmann, Single Quantum Level Electron Turnstile, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 166801 (2016).

13. J. V. Koski, A. Kutvonen, I. M. Khaymovich, T. Ala-Nissila, and J. P. Pekola, On-Chip Maxwell's Demon as an Information-Powered Refrigerator, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 260602 (2015).

14. L S Bovkun, A V Ikonnikov, V Ya Aleshkin, K E Spirin, V I Gavrilenko, N N Mikhailov, S A Dvoretzkii, F Teppe, B A Piot, M Potemski, Landau level spectroscopy of valence bands in HgTe quantum wells: effects of symmetry lowering, *Journ. Phys.: Condens. Matter* **31**, 145501 (2019).