

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Кунцевича Александра Юрьевича “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

Диссертационная работа посвящена экспериментальному анализу ряда термодинамических и кинетических свойств двумерных систем. Основной акцент в диссертационной работе сделан на изучение эффектов, связанных с электрон-электронными корреляциями.

Актуальность

Двумерные (2D) электронные системы занимают особое место в современной физике конденсированного состояния. С одной стороны, именно в 2D квантовых ямах был обнаружен ряд ярких фундаментальных явлений, таких как квантовый эффект Холла, задавших магистральное направление развития физики конденсированного состояния. С другой стороны, такие двумерные системы как полевые транзисторы являются базовыми элементами полупроводниковой микроэлектроники. Поэтому изучение 2D наноструктур чрезвычайно важно как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Дополнительный толчок данное направление физики конденсированного состояния получило совсем недавно в результате открытия графена и двумерных топологических материалов. Наиболее сложными и плохо поддающимися изучению являются эффекты, связанные с сильными межэлектронными корреляциями. В частности, обнаруженный более 20 лет тому назад в двумерных полупроводниках переход металл-диэлектрик до сих пор является темой активных дискуссий. Поэтому чрезвычайно важной задачей является разработка новых эффективных экспериментальных методик, применимых для исследования сильно коррелированных двумерных систем. Именно эта задача и решена в настоящей диссертационной работе. Таким образом, тематика работы несомненно является **актуальной**.

Научная новизна и достоверность.

Принципиальная новизна работы связана с разработкой новых экспериментальных методик, позволяющих изучить ряд фундаментальных эффектов в 2D системах, в том числе

обусловленных электрон-электронным взаимодействием. Эти методики позволили получить большое количество новых оригинальных результатов, среди которых отметим следующие. Впервые подробно исследована спиновая намагниченность в пределе слабых полей и сделано чрезвычайно важное предсказание об образовании спиновых капель с парамагнитными свойствами. Впервые измерена и проанализирована в широком интервале магнитных полей поправка к коэффициенту Холла в двумерном газе с искусственно созданной, контролируемой неоднородностью. Впервые разработана методика измерения энтропии двумерной системы. Впервые обнаружен парамагнетизм в квантовых ямах на основе теллурида ртути. Впервые детально изучено влияние электрон-электронного взаимодействия на магнетотранспортные свойства 2D кремниевых структур. В частности, в таких структурах впервые обнаружено гигантское магнетосопротивление в параллельных магнитных полях. Для решения этих экспериментальных задач были разработаны принципиально новые методики, опробованные на простых ранее изученных (в том числе и другим группами) системах и позволившие сделать новые экспериментальные измерения в более сложных системах. Полученные результаты проливают свет на физику ряда сложных задач, которые до сих пор являются предметом жарких дискуссий, в том числе на физику перехода метал-диэлектрик в 2D системах. Имеется хорошее согласие с имеющимися теоретическими результатами и численными расчетами. Также сделан ряд новых предсказаний, которые должны стимулировать работу теоретиков. Измерения проводились поверенными приборами, причем практически все результаты были воспроизведены на разных образцах, а некоторые и на разных материалах.

Сказанное выше подтверждает **научную новизну результатов**, полученных в диссертации, а **достоверность** полученных результатов не вызывает сомнения и дополнительно подтверждается публикациями в реферируемых высокорейтинговых журналах.

Научная и практическая значимость

В диссертации разработаны принципиально новые методики измерений и детально исследован целый ряд новых физических эффектов, с подробным анализом их микроскопических механизмов и возможности практического применения.

Диссертация состоит из введения, семи глав с **новыми оригинальными результатами**, библиографии, благодарностей, заключения с перечислением полученных результатов и списка сокращений. Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы,

обоснованы новизна и практическая ценность полученных результатов, раскрыто содержание диссертации по главам.

Глава 1 посвящена измерению намагниченности 2D кремниевой системы, демонстрирующей переход метал-изолятор. Основной, экспериментально подтвержденный вывод этой главы – возможность образования парамагнитного состояния со «спиновыми каплями».

Глава 2 посвящена измерениям магнетотранспорта в образцах Si-MOП структур с макроскопическими неоднородностями (массив антиточек), которые контролировались двумя системами затворов. Экспериментально показано, что вопреки ожиданиям, коэффициент Холла такой системы зависит от магнитного поля. Проведены подробные исследования эффекта в широком интервале полей и предложена простая интерпретация, основанная на наличии в системе носителей двух сортов.

Глава 3 посвящена разработке сверхчувствительной методики емкостного типа для измерения энтропии 2D систем. Методика позволила определить циклотронные и спиновые расщепления, а также уширения уровней Ландау в 2D системах на основе Si и GaAs, в полном согласии с предыдущими измерениями, но с существенно более высокой точностью. Продемонстрировано, что экспериментальные измерения не противоречат третьему началу термодинамики. Измерения проведены как для чистых, так и для сильно разупорядоченных образцов.

В Главе 4 разработанная методика используется для изучения спектра в квантовых ямах теллурида ртути, причем ее эффективность проверяется с помощью независимых измерений другим способом. В частности, приводятся результаты измерений плотности состояний в тяжелых долинах дырок в узких квантовых ямах HgTe с неинвертированным спектром при помощи двух разных методов: из измерений энтропии и методом анализа Шубниковских осцилляций легкой подзоны. Результаты измерений обоими методами согласуются между собой и дают плотность состояний, которая соответствует существенно большему значению массы, чем расчетные значения, имеющиеся в настоящее время в литературе.

Глава 5 посвящена исследованию магнитных свойств квантовых ям на основе теллурида ртути. Основным результатом этой главы – демонстрация парамагнитного поведения как электронов, так и легких и тяжелых дырок. В частности, продемонстрировано парамагнитное поведение

дираковских носителей вблизи точки зарядовой нейтральности.

Глава 6 посвящена детальному экспериментальному анализу квантовых поправок к магнетотранспортным свойствам различных 2D систем. Основным результатом данной главы – экспериментальное наблюдение немонотонно зависящей от магнитного поля поправки к сопротивлению, которая не объясняется существующими теориями. Принципиально важным моментом было наблюдение такой поправки не только на кремниевых образцах, где подобный детальный анализ ранее не проводился, но и в стандартных системах на основе арсенида галлия.

Глава 7 является теоретической и посвящена анализу широко распространенного, начиная с первых экспериментов на графене, утверждения, что фаза магнитоосцилляций соответствует фазе Берри, то есть топологической характеристике спектра. Показано, что аномалии в фазе магнитоосцилляций могут быть вызваны не только фазой Берри, но и простыми термодинамическими причинами, связанными с пиннингом химического потенциала, а также с неоднородностью системы.

Все полученные результаты являются новыми и находятся на переднем крае развития физики конденсированного состояния. Это определяет высокую **научную значимость** работы. Существенно, что проведенная экспериментальная работа позволила проверить ряд теоретических предсказаний. Кроме того, разработанные новые методики дали возможность получить ряд новых результатов, требующих дополнительного теоретического анализа. Поэтому **практическая важность** работы также несомненна.

Личный вклад автора

Если исходить из представленных журнальных публикаций, а также из многочисленных приглашенных докладов на престижных российских и международных конференциях, то становится совершенно очевидно, что автор является лидером экспериментальной группы, которая получила данные результаты. Ему принадлежат оригинальные идеи, позволившие разработать новые методики. Он также внес решающий вклад в непосредственное проведение экспериментов и разработку физической интерпретации полученных результатов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на многочисленных российских и международных конференциях а так же на семинарах в ФИАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Курчатовском институте, МПГУ, ИТПЭ, ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, Сколковском технологическом институте, университете Технион (Хайфа, Израиль), Институте Джозефа Штефана (Любляна, Словения), Массачусетском технологическом институте (Бостон,США), Университете Миннесоты (Минеаполис, США), Техническом университете Дрездена (Германия), Тата Институте (Индия).

Результаты диссертационной работы опубликованы в 19 статьях в высокорейтинговых реферируемых журналах, индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus. Также соискателем зарегистрирован один патент на изобретение.

При чтении диссертационной работы у меня возник ряд замечаний:

- 1) В работе экспериментально обнаружено, что спиновая восприимчивость двумерной системы в кремнии в малых магнитных полях немонотонно зависит от концентрации носителей и имеет максимум в окрестности точки перехода металл-изолятор. К сожалению, этот важный и интересный результат обсуждается вскользь, и его сколько-нибудь убедительная интерпретация в работе отсутствует.
- 2) Наблюдаемая экспериментально зависимость коэффициента Холла двумерной системы с макроскопическими неоднородностями является достаточно неожиданным результатом, не укладывающимся в рамки существующих теоретических представлений. Автор интерпретирует данный результат с помощью двухкомпонентной модели. Эта интерпретация выглядела бы существенно более убедительной, если бы автор представил дополнительные экспериментальные факты в пользу наличия двух сортов носителей. Например, в такой системе должно быть видно два периода Шубниковских осцилляций. К сожалению, такие дополнительные экспериментальные факты в работе отсутствуют.
- 3) При изучении электронного магнетизма в малых магнитных полях в квантовых ямах теллурида ртути измерения проводились при сканировании спектра системы от электронной к дырочной части путем изменения напряжения на затворе. В такой ситуации, можно было бы ожидать резких скачков магнитной восприимчивости при пересечении запрещенной зоны. В то же время, в эксперименте зависимость восприимчивости, хотя и показывала минимум в центре

запрещенной зоны, но была достаточно плавной. Такая зависимость, на мой взгляд, требует дополнительной интерпретации.

4) Одним из важных результатов работы является разработка методики, позволяющей измерять энтропию двумерной системы. В то же время, насколько можно понять из текста работы, данная методика ограничена измерениями для равновесных систем. Работа бы существенно выиграла, если бы автору удалось применить данную методику для измерений неравновесных систем, например, для изучения транспорта в режиме сильного разогрева и для анализа нестационарных явлений.

Данные замечания не являются критическими и никак не снижают оценку диссертационной работы, выполненной на самом высоком научном уровне. Они, скорее, являются пожеланиями по дальнейшему развитию исследований.

Результаты диссертации Кунцевича А.Ю. представляют большой интерес как с научной, так и с практической точек зрения и могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих экспериментальные и теоретические исследования в области физики двумерных систем и ведущих разработку приборов и устройств наноэлектроники (ФИАН им. П.Н.Лебедева РАН, ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, ПИЯФ, МГУ, СПбГУ, СПбГТУ, Институт физики микроструктур РАН, ИФП СО РАН, ИФТТ РАН, ИРЭ РАН, ИФМ УРО РАН, ГНЦ ГосНИИ ФП им. Ф.В.Лукина и др.). Эти материалы можно взять за основу при разработке учебных курсов для студентов вузов, специализирующихся по физике конденсированного состояния.

Диссертация Кунцевича А.Ю написана ясным языком и хорошо иллюстрирована. В ней четко сформулированы цели исследования, достаточно полно описаны и проанализированы использованные теоретические методы и обсуждены полученные результаты. Автореферат и опубликованные работы правильно отражают содержание диссертации.

Подводя итог, следует сказать, что диссертация Кунцевича А.Ю является законченным исследованием, выполненном на самом высоком научном уровне и содержит ряд чрезвычайно интересных экспериментальных фактов, полученных оригинальными методиками, а также убедительную физическую интерпретацию полученных результатов. Материалы диссертации опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах, докладывались автором на российских и международных научных конференциях. Автореферат полностью отражает

содержание диссертации. Диссертационная работа содержит принципиально новые важные результаты, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение. Полученные результаты – существенный вклад в фундамент нового направления физики конденсированного состояния: транспортные и магнитные свойства сильно-коррелированных двумерных систем. Научные положения и результаты диссертации хорошо аргументированы и обоснованы. Диссертация “Экспериментальное исследование термодинамических и кинетических эффектов в двумерных системах” удовлетворяет всем требованиям “Положения о присуждении ученых степеней”, утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Кунцевич Александр Юрьевич, безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Качоровский Валентин Юрьевич,
доктор физико-математических наук,
специальность 01.04.10 «Физика полупроводников»,
ведущий научный сотрудник сектора теории оптических
и электрических явлений в полупроводниках (научное звание
- старший научный сотрудник)
ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.
Тел. +7-921-9941081
e-mail: kachor.valentin@gmail.com

21 сентября 2020 г.

Подпись Качоровского Валентина Юрьевича заверяю, ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе
РАН, к.ф.-м.н. Патров Михаил Иванович



Список основных работ Качоровского В.Ю. по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):

1. D.R.Saykin, I.V.Gornyi, V.Yu.Kachorovskii, I.S.Burmistrov, Absolute Poisson's ratio and the bending rigidity exponent of a crystalline two-dimensional membrane, *Annals of Physics* 414, 168108 (2020).
2. K.S. Tikhonov, I.V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, and A.D. Mirlin, Asymmetry of nonlocal dissipation: From drift-diffusion to hydrodynamics, *Phys. Rev. B* 100, 205430 (2019).
3. I.V. Gorbenko, V.Yu. Kachorovskii, M.S. Shur, Plasmonic helicity-driven detector of terahertz radiation, *Physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters* 13, 205430 (2019).
4. I. S. Burmistrov, V. Yu. Kachorovskii, I. V. Gornyi, A. D. Mirlin, Differential Poisson's ratio of a crystalline two-dimensional membrane, *Ann. Phys.* 396, 119 (2018).
5. I. S. Burmistrov, I. V. Gornyi, V. Yu. Kachorovskii, M. I. Katsnelson, J. H. Los, and A. D. Mirlin, Stress-controlled Poisson ratio of a crystalline membrane: Application to graphene, *Phys. Rev. B* 97, 125402 (2018).
6. K.S. Tikhonov, I.V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, and A.D. Mirlin, Resonant supercollisions and electron-phonon heat transfer in graphene, *Phys. Rev. B* 97, 085415 (2018).
7. P.S. Alekseev, A.P. Dmitriev, I.V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, B.N. Narozhny, and M. Titov, Nonmonotonic magnetoresistance of a two-dimensional viscous electron-hole fluid in a confined geometry, *Phys. Rev. B* 97, 085109 (2018).
8. A.P. Dmitriev, I.V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, and D.G. Polyakov, Spin-charge separation in an Aharonov-Bohm interferometer, *Phys. Rev. B* 96, 115417 (2017).
9. K. L. Koshelev, V. Yu. Kachorovskii, M. Titov, and M. S. Shur, Plasmonic shock waves and solitons in a nanoring, *Physical Review B* 95, 035418 (2017).
10. I.V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, and A.D. Mirlin, Anomalous Hooke's law in disordered graphene, *2D Materials* 4, 011003 (2017).
11. P.S. Alekseev, A.P. Dmitriev, I.V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, B.N. Narozhny, M. Schutt, and M. Titov, Magnetoresistance of compensated semimetals in confined geometries, *Phys. Rev. B* 95, 165410 (2017).
12. I.S. Burmistrov, I.V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, M.I. Katsnelson, and A.D. Mirlin, Quantum elasticity of graphene: Thermal expansion coefficient and specific heat, *Physical Review B* 94, 195430 (2016).
13. I.V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, and A.D. Mirlin, Rippling and crumpling in disordered free-standing graphene, *Physical Review B* 92, 155428 (2015).
14. I.V. Rozhansky, V.Yu. Kachorovskii, and M.S. Shur, Helicity-Driven Ratchet Effect Enhanced by Plasmons, *Phys. Rev. Lett.* 114, 246601 (2015).
15. P.S. Alekseev, A.P. Dmitriev, I.V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, B.N. Narozhny, M. Schutt, and M. Titov, Magnetoresistance in Two-Component Systems, *Physical Review Letters* 114, 156601 (2015).