

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики твёрдого тела Российской академии наук

*На правах рукописи*

Петруша Станислав Владимирович

**Электронный транспорт,  
локализация и статистика протекания заряда  
в квазиодномерных проводниках**

РЕЗЮМЕ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физических наук

Черноголовка, 2020

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твёрдого тела Российской академии наук

**Научный руководитель:** Храпай Вадим Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, в.н.с. ИФТТ РАН

# ТЕМА ДИССЕРТАЦИИ

Задача поиска материалов с новыми электронными свойствами является одной из ключевых для современной физики конденсированного состояния. С появлением классификации материалов с точки зрения топологии, к известным на протяжении десятилетий полупроводникам и металлам, различающимся с точки зрения зонной структуры, а также к сверхпроводникам, магнетикам и некоторым другим материалам, обладающим механизмами упорядочения, добавился целый ряд новых по физическим свойствам классов материалов.

Топологические изоляторы - перспективный класс электронных материалов, обладающих диэлектрическим объёмом и имеющих необычные электронные состояния на поверхности, характеризующиеся линейным бесщелевым спектром и полной спиновой поляризацией [6, 9]. Практическая реализация такого материала открывает широкие возможности для реализации сверхпроводников и джозефсоновских контактов с нетривиальным спариванием [2, 8], наблюдения майорановских мод [1, 5] и спинтроники [3, 4]. При этом, несмотря на внушающий оптимизм прогресс экспериментальных и теоретических исследований в данной области, некоторые ключевые свойства топологических изоляторов не являются до конца изученными, что может вызывать сомнения в соответствии практической реализации данных материалов предлагаемым моделям.

Основные вопросы возникают к топологической защите - феномену, который должен обеспечивать баллистический транспорт в отсутствие беспорядка, способного переворачивать спин электрона. Экспериментальные наблюдения показывают, что в реальных системах рассеяние электронов присутствует, и баллистическую проводимость можно наблюдать только в наиболее коротких образцах [7], с весьма низкой точностью квантования. Именно данный факт является основным препятствием к практической реализации всех потенциальных преимуществ, которыми топологические изоляторы обладают относительно других материалов.

Вопрос разрешения этого противоречия является одним из ключевых для данного направления физики конденсированного состояния. Было предложено множество теорий, предлагающих различные механизмы рассеяния, приводящие к нарушению запрета на рассеяние электронов назад в краевых каналах двумерных топологических изоляторов. Согласование данных теорий с экспериментальными результатами несколько осложнено тем фактом, что при изучении сопротивления краевых каналов единственной характеристикой, указывающей на специфику рассеяния является температурная зависимость сопротивления. В случае краевых каналов двумерных топологических изоляторов, на практике наблюдается слабая температурная зависимость. Доступные экспериментаторам температуры недостаточно низки для наблюдения диэлектрического хода или выхода на плато с квантом  $h/e^2$ , что является ожидаемыми асимптотическими сценариями для предлагаемых механизмов рассеяния при низких температурах. Таким образом, несмотря на широчайший интерес научной общественности, на текущий момент не существует консенсуса касательно микроскопии краевого электронного транспорта, природы краевой проводимости и реализации механизма топологической защиты.

Двумерные топологические изоляторы на основе квантовых ям теллурида ртути (HgTe) - первый и, безусловно, самый исследованный из материалов, относящихся к данной группе. Учитывая, что с точки зрения изучаемых свойств электронного транспорта, другие материалы, предлагаемые в качестве двумерных топологических изоляторов, не обладают существенными преимуществами (см. раздел 1.2 диссертации), исследование материала с максимально отработанной технологией изготовления выглядит наиболее целесообразным. Так, на текущий момент только для ям HgTe/CdHgTe и двойных квантовых ям InAs/GaSb известны наблюдения квантованного значения сопротивления для краёв, превышающих длиной 1 мкм. В то же время в ямах InAs/GaSb существуют наблюдения краевой проводимости в том числе и заведомо тривиальной природы, что осложняет интерпретацию экспериментальных результатов.

**Основной целью** данной работы является исследование краевой электрической проводимости в квантовых ямах теллурида ртути для получения доказательств или противоречий геликальной природе краевых состояний. Для достижения этой цели были решены следующие **задачи**:

1. Изучено влияние магнитного поля на краевую проводимость квантовых ям HgTe/CdHgTe при низких температурах, достижимых в рефрижераторе растворения.
2. Были проведены исследования проводимости и неравновесного электронного шума  $p-n$  переходов, возникающих на границе затвора 14 нм квантовых ям HgTe/CdHgTe.
3. Проведено исследование неравновесного электронного шума в длинных резистивных (с сопротивлением, превышающим квант  $h/e^2$ ) краях квантовых ям HgTe/CdHgTe при различных криогенных температурах и в магнитном поле.
4. Был рассмотрен сенсор на основе зонда из упругого диффузионного нанопровода или туннельного перехода, позволяющий измерять локальную функцию распределения электронов, и перспективный в рамках изучения рассеяния электронов в краевых состояниях двумерного топологического изолятора. Работа такого сенсора с диффузионным нанопроводом была экспериментально изучена на модельной системе.

**Теоретическая значимость** полученных результатов заключается в полученной новой информации относительно свойств электронного транспорта в квантовых ямах теллурида ртути, имеющей критическую важность для решения фундаментального вопроса о том, является ли данная система реализацией концепции двумерного топологического изолятора, а также вопроса о неизвестном эффективном механизме рассеяния, нарушающем топологическую защиту. Данные вопросы вызывают существенный интерес в научном сообществе на протяжении последних лет, что подробно обсуждено в главе 1.

Рассматривая в совокупности результаты предложенных исследований, посвящённых квантовым ямам HgTe/CdHgTe, можно сделать существенные выводы касательно характера краевого электронного транспорта в них.

Наблюдаемый резкий рост сопротивления в магнитном поле не имеет очевидного объяснения в предположении тривиальной проводимости краёв. В то же время, для топологически нетривиальных геликальных краевых состояний данный эффект является ожидаемым следствием открывающейся возможности переворота спина. Существенным для данного анализа является конкретная область пространства в которой происходит рост сопротивления. Как двухтерминальные, так и четырехтерминальные измерения не могут однозначно отместить возможность роста сопротивления исключительно в месте контакта двумерного электронного газа и краевого канала. Однако в эксперименте наблюдается выраженная зависимость от длины, когда сопротивление длинных краёв возрастает сильнее чем сопротивление короткие, что позволяет однозначно связать рост сопротивления именно с воздействием магнитного поля на краевые каналы.

При анализе краевой проводимости в качестве возможной ее причины, имеющей тривиальную природу, зачастую предполагается возможность загиба зон вблизи границы квантовой ямы. В то же время, присутствие такого загиба зон не дало бы возможности наблюдать  $p - n$  переходы с линейной вольт-амперной характеристикой и отсутствующей температурной зависимостью. Сильная аккумуляция заряда вдоль границы квантовой ямы также может быть исключена, так как она бы приводила к существенному нелокальному сигналу при наличии проводимости под затвором, чего не наблюдается. Таким образом, само по себе наблюдение  $p - n$  переходов, является сильным аргументом в пользу присутствия особых электронных состояний именно в щели объёмных состояний.

Учитывая, что в описанных экспериментах получение  $p - n$  переходов и наблюдение локализации в магнитном поле возможно в том числе на одном и том же образце, может быть сделан непосредственный вывод о присутствии в системе крайне чувствительных к магнитному полю краевых состояний, расположенных в щели объёма. Данное утверждение является сильнейшим аргументом в пользу топологически нетривиальной природы краевой проводимости в квантовых ямах  $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ .

С точки зрения **практической значимости**, крайняя чувствительность краевых состояний двумерных топологических изоляторов к магнитному полю может быть использована для создания датчиков/приборов, работа которых основана на данном свойстве. Измерения функции распределения с помощью электронного шума являются мощной экспериментальной методикой исследования неравновесных электронных систем, которая в состоянии расширить возможности экспериментальной физики по исследованию разнообразных систем с термоэлектрическим и оптоэлектронным преобразованиями.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается их сопоставлением с существующими теоретическими предсказаниями, а также соответствием результатов измерений на нескольких различающихся образцах (в главах 3,4).

# ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Впервые продемонстрировано, что в квантовых ямах HgTe шириной 14 нм и 8.3 нм в режиме краевой проводимости и температуре 50 мК введение внешнего магнитного поля 50 мТл вызывает резкий рост сопротивления до в  $10^3$  раз как для краёв с сопротивлением без магнитного поля равным  $h/e^2$ , так и для краёв с бóльшим исходным сопротивлением. Рост сопротивления сопровождается появлением воспроизводимых мезоскопических флуктуаций и выраженной активационной температурной зависимости, в контрасте со слабой температурной зависимостью в нулевом поле. Также при введении магнитного поля наблюдается нелинейная вольт-амперная характеристика со щелью в тянущих напряжениях, достигающей 1 мВ, в которой ток не превышает 1 пА. Такое поведение может быть объяснено Андерсоновской локализацией геликальных краевых состояний вследствие разрешённых в магнитном поле процессов когерентного рассеяния назад.
2. В квантовых ямах HgTe шириной 14 нм при реализации проводимости  $p$ -типа под затвором формируются  $p - n$  переходы с сопротивлением, измеренные значения которого близки к  $h/2e^2$ , обладающие линейной вольт-амперной характеристикой. Впервые проведены исследования электронного шума в таких  $p - n$  переходах. Подбором неизвестного параметра дырочно-фононной теплоотдачи, наблюдаемый при пропускании электрического тока шум, может быть полностью объяснён перегревом подводящих участков структуры образца, без добавления в модель дробового шума самого  $p - n$  перехода. Совокупность данных наблюдений находится в согласии с моделью, в которой электронный транспорт в них осуществляется двумя баллистическими геликальными краевыми каналами на боковых сторонах перехода.
3. Впервые проведены исследования электронного шума в квантовых ямах HgTe в режиме краевого транспорта при температурах ниже 0.5 К. В краях с существенно превышающим  $h/e^2$  сопротивлением при пропускании тока наблюдается дробовой шум с фактором Фано  $0.1 < F < 0.3$ , растущим при понижении температуры. Данные наблюдения однозначно указывают на некогерентный режим электронного транспорта и могут быть согласованы с существующими моделями рассеяния электронов в геликальных краевых состояниях.
4. Впервые продемонстрировано экспериментально, что измерения электронного шума как функции напряжения с одного из терминалов упругого диффузионного проводника, могут быть непосредственно пересчитаны в функцию распределения электронов по энергии на втором терминале данного проводника. Данный подход работает как в случае равновесного, так и в случае неравновесного распределения электронов на втором терминале. В проведённом эксперименте функция распределения в полоске соответствует локальному термодинамическому равновесию.

**Личный вклад** соискателя заключается в проведении всех приведённых в данной работе экспериментальных измерений, разработке методики измерения высокорезистивных объектов, интерпретации и обработке полученных экспериментально результатов, проведении математического моделирования, описанного в главе 4. Указанные работы проводились автором в лаборатории электронной кинетики ИФТТ РАН в период с 2015 по 2020 год.

## ПУБЛИКАЦИИ И АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

главный автор - Петруша Станислав Владимирович, кроме статьи Nanotechnology 2020.

### Публикации повышенного уровня

1. Piatrusha, S. U. *et al.* Edge states in lateral  $p - n$  junctions in inverted-band HgTe quantum wells. *Phys. Rev. B* **96**, 245417 (2017). doi: 10.1103/PhysRevB.96.245417.
2. Piatrusha, S. U. *et al.* Topological Protection Brought to Light by the Time-Reversal Symmetry Breaking. *Phys. Rev. Lett.* **123**, 056801 (2019). doi: 10.1103/PhysRevLett.123.056801.
3. Denisov, A. O. *et al.* Strategy for accurate thermal biasing at the nanoscale. *Nanotechnology* **31**, 324004 (2020). doi: 10.1088/1361-6528/ab8c74.

### Публикации стандартного уровня

4. Piatrusha, S. U. *et al.* Noise Insights into Electronic Transport. *JETP Letters* **108**, 71–83 (2018). doi: 10.1134/s0021364018130039.

### Прочие публикации

5. Piatrusha, S. U. & Khrapai, V. S. Measuring electron energy distribution by current fluctuations. *2017 International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF)* 1–4 (2017). doi: 10.1109/ICNF.2017.7985929.

### Доклады на конференциях и семинарах

Основные результаты диссертационной работы доложены на следующих конференциях: XXI Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников (Екатеринбург, февраль 2016), International Workshop Localization, Interactions and Superconductivity (Черноголовка, июнь-июль 2016), 7-ая Всероссийская конференция молодых учёных "Микро-, нанотехнологии и их применение" имени Ю. В. Дубровского (Черноголовка, февраль 2017), 24th International Conference on Noise and Fluctuations (Вильнюс, Литва, июнь 2017), XVI Школа-конференция молодых учёных "Проблемы физики твердого тела и высоких давлений" (Сочи, сентябрь 2017), 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (Монпелье, Франция, июль-август 2018), XII Конференция «Физика конденсированных сред

и материалы нового поколения» (Троицк, декабрь 2018), XXIII международный симпозиум «Нанозфизика и наноэлектроника» (Н. Новгород, март 2019), 54th Rencontres de Moriond (Ле Туй, Италия, март 2019), Interaction between Radiation and Quantum matter (Москва, июль 2019), Conference on Spins in a Quantum 1D Multi-particle Environment: from Exotic Phases and Non-trivial Topology to Protected Transport (Мюнхен, Германия, сентябрь 2019), XIV Российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск, сентябрь 2019), XVIII Школа-конференция молодых учёных "Проблемы физики твёрдого тела и высоких давлений" (Сочи, сентябрь 2019), семинары по физике низких температур ИФТТ РАН.

## СОДЕРЖАНИЕ И СТРУКТУРА РАБОТЫ

Диссертация содержит введение, шесть глав основного содержания и заключение. Полный объем диссертации составляет 94 страницы с 39 рисунками и одной таблицей. Список литературы содержит 166 наименований.

Во **введении** приводятся подтверждения актуальности темы диссертации, формулируются цели работы и положения, выносимые на защиту, описывается структура работы, а также приводится список публикаций автора по теме диссертации

В **главе 1** приводится литературная информация из экспериментальных и теоретических работ, посвящённых изучаемым системам (квантовым ямам HgTe/CdHgTe и другим топологическим изоляторам).

В **главе 2** описываются основные экспериментальные методики и процесс обработки экспериментальных данных, а также приводится информация о структуре и процедуре изготовления изучаемых образцов.

**Глава 3** посвящена транспортным измерениям краевого транспорта в квантовых ямах HgTe/CdHgTe в магнитном поле. Полученные экспериментальные данные демонстрируют переход в диэлектрическое состояние под действием магнитного поля, ожидаемый при нарушении механизма топологической защиты в двумерных топологических изоляторах.

В **главе 4** описывается эксперимент по изучению проводимости и токового шума р-п переходов в квантовых ямах HgTe/CdHgTe. Для таких переходов ожидается преобладание в проводимости коротких краевых каналов, шунтирующих область обеднения, что подтверждается проведёнными измерениями сопротивления и токового шума.

В **главе 5** приведены измерения токового шума в краевом транспорте квантовых ям HgTe/CdHgTe. Анализируется согласие полученных результатов с моделями рассеяния геликальных электронов в двумерных топологических изоляторах. Полученные данные разумно согласуются с феноменологической моделью одномерной диффузии.

**Глава 6** описывает методику измерения локальной функции распределения электронов на основе измерения электронного шума. Данная методика впервые экспериментально реализована в описываемых измерениях. Открываемые широкие возможности по измерению неравновесных электронных систем обладают перспективой применения, в частности, к исследованию краевой проводимости двумерных топологических изоляторов.



**Заключение** содержит перечисление основных результатов работы.

# ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jason Alicea. New directions in the pursuit of majorana fermions in solid state systems. *Reports on Progress in Physics*, 75(7):076501, jun 2012.
- [2] Erwann Bocquillon, Russell S Deacon, Jonas Wiedenmann, Philipp Leubner, Teunis M Klapwijk, Christoph Brüne, Koji Ishibashi, Hartmut Buhmann, and Laurens W Molenkamp. Gapless Andreev bound states in the quantum spin Hall insulator HgTe. *Nature Nanotechnology*, 12(2):137–143, 2017.
- [3] Christoph Brüne, Andreas Roth, Hartmut Buhmann, Ewelina M. Hankiewicz, Laurens W. Molenkamp, Joseph Maciejko, Xiao-Liang Qi, and Shou-Cheng Zhang. Spin polarization of the quantum spin hall edge states. *Nature Physics*, 8(6):485–490, may 2012.
- [4] Y. L. Chen, J. G. Analytis, J.-H. Chu, Z. K. Liu, S.-K. Mo, X. L. Qi, H. J. Zhang, D. H. Lu, X. Dai, Z. Fang, S. C. Zhang, I. R. Fisher, Z. Hussain, and Z.-X. Shen. Experimental realization of a three-dimensional topological insulator,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . *Science*, 325(5937):178–181, 2009.
- [5] Liang Fu and C. L. Kane. Superconducting proximity effect and majorana fermions at the surface of a topological insulator. *Phys. Rev. Lett.*, 100:096407, Mar 2008.
- [6] M. Z. Hasan and C. L. Kane. Colloquium: Topological insulators. *Rev. Mod. Phys.*, 82:3045–3067, Nov 2010.
- [7] M. König, S. Wiedmann, C. Brune, A. Roth, H. Buhmann, L. W. Molenkamp, X.-L. Qi, and S.-C. Zhang. Quantum spin hall insulator state in HgTe quantum wells. *Science*, 318(5851):766–770, nov 2007.
- [8] A. G. Mal’shukov and C. S. Chu. Spin hall effect in a josephson contact. *Phys. Rev. B*, 78:104503, Sep 2008.
- [9] Xiao-Liang Qi and Shou-Cheng Zhang. Topological insulators and superconductors. *Rev. Mod. Phys.*, 83:1057–1110, Oct 2011.