

Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования
«Сколковский институт науки и технологий»

На правах рукописи

Бубис Антон Владимирович

**УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ЗАРЯДА И ТЕПЛА В НАНОРАЗМЕРНЫХ
КВАЗИОДНОМЕРНЫХ ПРОВОДНИКАХ**

РЕЗЮМЕ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физических наук

Москва - 2022

Диссертационная работа выполнена в автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий».

Научные руководители:

Насибулин Альберт Галийевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией наноматериалов Сколтеха.

Храпай Вадим Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией электронной кинетики ИФТТ РАН.

ТЕМА ДИССЕРТАЦИИ

Одним из наиболее перспективных направлений исследований современной физики конденсированного состояния является исследование топологических аспектов теории электронных зон. В отличие от классической теории кристаллов Блоха, здесь центральную роль играет взаимосвязь спиновых и пространственных степеней свободы, возникающих в результате сильного спин-орбитального взаимодействия. Оказывается, эта взаимосвязь имеет место в целых классах новых материалов, например, в топологических изоляторах.^{1,2} В этих материалах помещение уровня Ферми в щель объема не приводит к исчезновению электропроводности из-за наличия бесщелевых геликальных состояний. Эти состояния возникают на границе между топологическими и тривиальными изоляторами (поверхность в трехмерном случае или край в двумерном случае), и спин с импульсом у таких состояний жестко связаны.

Фундаментальным свойством геликальных состояний является полное подавление обратного рассеяния, которое имеет чисто квантовое происхождение и также называется топологической защитой. Наиболее впечатляющее проявление топологически защищенных состояний происходит в одномерном случае. Они обеспечивают баллистическую передачу спин-поляризованного электрического тока вдоль края двумерного топологического изолятора.³ В дополнение к краевым состояниям топологического изолятора геликальные состояния также могут быть реализованы в чистых полупроводниковых нанопроводах с сильным спин-орбитальным взаимодействием, помещенных в сильное магнитное поле параллельное нанопроводу.⁴

Геликальные состояния представляют большой интерес, особенно из-за предсказаний существования майорановских состояний, ценных для отказоустойчивых квантовых вычислений. Среди нескольких предложений по реализации майорановских состояний в реальных системах наибольшее внимание научного сообщества привлекли гибридные структуры типа сверхпроводник-полупроводниковый нанопровод с сильной спин-орбитальной связью и сверхпроводник-топологический изолятор. В настоящее время все еще нет однозначного наблюдения всех признаков майорановских состояний в одном эксперименте. Таким образом, экспериментальные исследования в этой области в основном сосредоточены на развитии технологий для изготовления более совершенных устройств (в основном методов роста) и на новых схемах детектирования для верификации топологического фазового перехода.

Эта работа посвящена наиболее распространенным материалам, используемым в исследованиях майорановских состояний: топологическим изоляторам и гибридным структурам сверхпроводник-нанопровод. В эксперименте не было цели пронаблюдать признаки майорановских состояний, а ставилась задача исследовать электронный транспорт в геликальных краях и внедрить новую методику измерения в гибридных структурах полупроводник-сверхпроводник. Значительная часть этой работы посвящена разработке технологий изготовления образцов на основе деликатных материалов.

Цели и задачи

1. Разработка процедуры изготовления устройств на основе квантовых ям (КЯ) HgTe, исследование влияния различных этапов изготовления на свойства двумерного электронного газа. Измерение зависимости типичного кондактанса от магнитного поля в точке зарядовой нейтральности для оценки постоянной жидкости Латтинжера, K .
2. Аналитический вывод для спектральной плотности токового шума в устройствах нормальный металл-сверхпроводник-нормальный металл (NSN) на основе диффузионного нанопровода с заземленным центральным сверхпроводящим контактом или плавающим сверхпроводящим островком. Расчет подавления сверхпроводящей щели в геометрии плавающего островка из-за неравновесной функции распределения электронов. Изготовление устройств на основе нанопроводов из InAs с центральным сверхпроводящим контактом и нормальными контактами с обеих сторон.
3. Разработка деликатной литографической техники и ее базиса - водорастворимого резиста. Исследование влияния свойств проявителя на процесс проявления, доказательство механизма хелатирования-растворения. Отработка литографической методики для достижения 100 нм ширины отдельных металлических полосок, получаемых с помощью взрывной литографии (lift-off).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Впервые была продемонстрирована локализация краев двумерного топологического изолятора 8 нм КЯ HgTe при 70 мК в нулевом внешнем магнитном поле. Из зависимости типичного кондактанса в точке зарядовой нейтральности от магнитного поля извлечена постоянная жидкости Латтинжера $K \approx 0.8-0.9$. Согласно теории, такое электрон-электронное взаимодействие недостаточно сильное, чтобы объяснить наблюдаемую локализацию. Измеренный дробовой шум описывается фактором Фано $F \approx 0.5-0.7$, превышающий значения для диффузионных проводников даже при сильном электрон-электронном рассеянии. Последнее может указывать на неупорядоченный характер электронного транспорта в краю и быть признаком наступающей локализации, однако, основной механизм рассеяния не может быть однозначно установлен.
2. Аналитически получены выражения для локального и нелокального дробового шума для диффузионных NSN устройств с заземленным центральным сверхпроводящим контактом с энергетической релаксацией или малым сверхпроводящим островком без релаксации с плавающим потенциалом. Показано, что тепловой кондактанс сегмента нанопровода с эффектом близости может быть извлечен из нелокального

наклона дробового шума $\partial S/\partial V$. В геометрии со сверхпроводящим островком неравновесная функция распределения подавляет сверхпроводящую щель при произвольной асимметрии между нормальными сегментами нанопровода, что проявляется в наличии двух стабильных ветвей $\Delta(V)$. Экспериментально нелокальный дробовой шум измерен в NSN устройствах на основе InAs нанопровода, и его значения при напряжениях смещения меньше Δ могут быть подогнаны с помощью единственного параметра – теплового кондактанса. Средний заряд квазичастицы, прошедшей через сегмент нанопровода с эффектом близости, оценен сверху из нелокального дробового шума и нелокального кондактанса.

3. Литографическая методика, где единственный используемый растворитель - вода, была разработана и использована для изготовления устройств на основе деликатных материалов. Основными компонентами являются производные хитозана (резист), водный раствор соли переходного металла (проявитель) и раствор слабой кислоты (растворитель). Проявление у данной технологии основано на фундаментально новом принципе – конкуренции между реакциями хелатирования и растворения, что позволило добиться чистового проявления и поэтому эта технология может быть использована для взрывной литографии. Наилучшая полученная чувствительность составляет ≈ 130 мкКл/см² (при ускоряющем напряжении 50 кВ), самая узкая отдельная металлическая линия, полученная при помощи взрывной литографии, имеет ширину 100 нм. Этот литографический подход был успешно использован для изготовления устройств на основе углеродных нанотрубок, органических полупроводников и микротрубок головного мозга свиней.

Личный вклад в положения, выносимые на защиту

Автор изготовил большинство образцов, изученных в этой работе, включая непосредственно деятельность в чистой комнате, разработку технологических процессов для конкретных образцов и разработку полноценных маршрутных карт. Значительная часть измерений электронного транспорта, представленных в этой диссертации, была выполнена автором, включая измерения дробового шума и спектров дробового шума. Теоретический квазиклассический расчет NSN устройств из главы 5 был выполнен как аналитически так и численно. Эта работа была выполнена автором в лаборатории наноматериалов Сколтеха; лаборатории электронной кинетики ИФТТ РАН; и Центре коллективного пользования МФТИ в период с 2017 по 2021 год.

ПУБЛИКАЦИИ И АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Главный автор или главные авторы обозначены жирным шрифтом в списке публикаций.

Публикации повышенного уровня

1. **Bubis, A. V.**, Mikhailov, N. N., Dvoretzky, S. A., Nasibulin, A. G. & Tikhonov, E. S. Localization of Helical Edge States in the Absence of External Magnetic Field. (Локализация геликальных краевых состояний в нулевом внешнем магнитном поле). *Phys. Rev. B* **104**, 195405 (2021)
2. **Bubis, A. V.**, Shpagina, E. V., Nasibulin, A. G. & Khrapai, V. S. Thermal Conductance and Nonequilibrium Superconductivity in a Diffusive NSN Wire Probed by Shot Noise. (Изучение теплового кондактанса и неравновесной сверхпроводимости диффузионного NSN провода с помощью дробового шума). *Phys. Rev. B* **104**, 125409 (2021)
3. **Denisov, A. O.**, Bubis, A. V., Piatrusha, S. U., *et al.* Charge-Neutral Nonlocal Response in Superconductor-InAs Nanowire Hybrid Devices. (Зарядово-нейтральный нелокальный отклик в гибридных устройствах сверхпроводник-InAs нанопровод). *Semicond. Sci. Technol.* **36**, 09LT04 (2021)
4. **Grebenko, A., Bubis, A., Motovilov, K., et al.** Green Lithography for Delicate Materials. (Зеленая литография для деликатных материалов). *Adv. Funct. Mater.* **31**, 2101533 (2021)

Прочие публикации

1. **Denisov, A. O.**, Bubis, A. V., Piatrusha, S. U., *et al.* Heat-Mode Excitation in a Proximity Superconductor. arXiv: 2006.09803 [cond-mat] (2020)

Доклады на конференциях

Результаты этой работы были представлены на следующих конференциях: Interaction between Radiation and Quantum devices (ноябрь 2020, Москва), XXV Симпозиум “Нанофизика и нанoeлектроника” (март 2021, Нижний Новгород).

СОДЕРЖАНИЕ И СТРУКТУРА РАБОТЫ

Эта диссертация содержит введение, три основные главы и заключение. Полный объем диссертации составляет 83 страницы с 45 рисунками и одной таблицей. Список литературы содержит 152 наименования.

- Глава 4 посвящена первому и хорошо изученному двумерному топологическому изолятору, квантовым ямам HgTe. Энергетическая щель в объеме у таких КЯ довольно велика ≈ 30 мэВ, поэтому температуры 4.2 К (жидкий He) уже достаточно, чтобы подавить объемную проводимость, при условии, что уровень Ферми

помещен в объемную щель. Большой интерес представляет основной компонент топологической защиты – симметрия по отношению к обращению времени (TRS), которая защищает геликальные края от одночастичного рассеяния назад. Если TRS нарушается, например, внешним магнитным полем, геликальные краевые состояния локализуются из-за беспорядка. Эта работа демонстрирует, что края могут локализоваться при достаточно низкой температуре даже в нулевом внешнем магнитном поле. Теоретически известно несколько сценариев такого поведения, и в этой главе они обсуждаются в связи с экспериментальными наблюдениями.

- В главе 5 обсуждается альтернативная схема обнаружения топологического фазового перехода на примере гибридных полупроводниковых-сверхпроводниковых структур на основе нанопроводов InAs. Идея состоит в том, чтобы измерить тепловой кондактанс сегмента нанопровода со сверхпроводящим эффектом близости, который приобретает универсальное значение в точке фазового топологического перехода. Хотя изученные устройства не могут демонстрировать топологическую фазу, они служат минимальной моделью для изучения переноса тепла в нанопроводах с эффектом близости. Используя квазиклассический подход, показано, что тепловой кондактанс в таких устройствах может быть получен из нелокального измерения дробового шума, что возможно благодаря разделению заряда и тепла, происходящему на границе раздела нормальный металл-сверхпроводник.
- Глава 3 посвящена передовой литографической технике, разработанной для деликатных объектов. Предлагается использовать производные хитозана (CD) – водорастворимые полисахариды природного происхождения в качестве резиста для электролучевой и ультрафиолетовой литографии. Молекулярная масса CD уменьшается под воздействием облучения, аналогичное широко используемому полиметилметакрилату (PMMA). В предлагаемой технологии ключевой особенностью является реакция хелатирования, которая позволила добиться достаточно чистого проявления и, следовательно, возможности использования взрывной литографии, сохранив технологию изготовления щадящей и на основе воды.

Литература

1. Hasan, M. Z. & Kane, C. L. Colloquium: Topological Insulators. *Rev. Mod. Phys.* **82**, 3045–3067 (2010).
2. Qi, X.-L. & Zhang, S.-C. Topological Insulators and Superconductors. *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1057–1110 (2011).
3. König, M. *et al.* Quantum Spin Hall Insulator State in HgTe Quantum Wells. *Science* **318**, 766–770 (2007).
4. Alicea, J. New Directions in the Pursuit of Majorana Fermions in Solid State Systems. *Rep. Prog. Phys.* **75**, 076501 (2012).