

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Яковлев Дмитрий Сергеевич

**Экспериментальное исследование квантовых явлений
в гибридных сверхпроводящих системах на основе
топологических изоляторов**

Резюме
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Специальность 1.3.8 —
«Физика конденсированного состояния»

Москва , 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук

Столяров Василий Сергеевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Топологические изоляторы (ТИ) - это материалы, которые являются изоляторами или полупроводниками в объеме, но на внешней границе имеют проводящие поверхностные состояния. Эти поверхностные состояния защищены симметрией и устойчивы к возмущениям, что делает их нечувствительными к примесям или дефектам в материале. Примерами таких материалов являются широко известные соединения Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ и др [1–7].

Последние десять лет топологические изоляторы привлекают активное внимание ученых и инженеров полупроводниковой индустрии из-за их уникальных спин-орбитальных свойств [2]. Сильное спин-орбитальное взаимодействие обеспечивает защищенность поверхностных проводящих состояний в ТИ. Эти уникальные электронные свойства проявляются в гибридных структурах топологический изолятор/сверхпроводник (ТИ/СП) [2; 8–11]. Ожидается, что сверхпроводящие корреляции, наведенные в ТИ сверхпроводящим эффектом близости, помимо тривиальной компоненты могут иметь хиральную $p_x + ip_y$ компоненту [12]. Это сочетание может привести к возникновению топологической сверхпроводимости и появлению экзотических краевых состояний — майорановских фермионов [7; 9; 10; 13–16]. Майорановские фермионы рассматриваются в качестве основы для топологических квантовых вычислений [2; 9; 17–21]. Кроме того, реализации гибридных структур на основе баллистических ТИ позволит реализовать устройства на новых физических типах кубитов [22–24]. Поэтому в настоящее время системы СП/ТИ/СП изучаются активно [11; 25–34]. Несколько недавних теоретических работ предложили конкретные топологии с использованием гибридных СП/ТИ/СП структур, в которых может наблюдаться наведенная топологическая сверхпроводимость [7; 35; 36]. Для успешной реализации и изучения свойств гибридных структур СП/ТИ/СП требуется решение трех существенных проблем: получения высококачественных монокристаллов топологического изолятора с определяющим вкладом поверхностных электронных состояний в проводимость; реализации СП/ТИ интерфейса с высокой прозрачностью границы; наличия баллистического транспорта в СП/ТИ/СП гибридных структурах. Представленная к защите работа посвящена экспериментальному решению этих проблем.

Хорошо контролируемый синтез высококачественных монокристаллов топологического изолятора является основой для изучения и использования их уникальных свойств. Тонкие слои топологических изоляторов могут быть получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ - от англ. Molecular Beam Epitaxy) [37; 38]. Механическое отслоение (эксфолиация) тонких слоев от объемных кристаллов, широко используемое для

получения графена из графита [39], также можно использовать для получения ТИ, но с низким выходом в совокупности со сложной формой получаемых образцов. Для воспроизводимого роста ТИ может быть использован метод физического осаждения из газовой фазы (PVD - от англ. Physical Vapor Deposition) [40–42]. Во многих работах сообщается о синтезе и характеристике наноразмерных монокристаллов дихалькогенидов различных составов (Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ и др.) и различных морфологий. Однако большая концентрация объемных электронных состояний была основной проблемой для определения вклада именно поверхностных состояний. При помощи PVD в представленной работе удалось получить монокристаллы с треугольной и гексагональной морфологией с толщиной вплоть до 10 нм, что способствовало уменьшению концентрации объемных носителей, а также легкому регулированию уровней Ферми вблизи точки Дирака с помощью электростатического затвора (гейта) [43].

При исследовании топологической сверхпроводимости в гибридных системах СП/ТИ/СП необходимо различать, является ли транспорт диффузионным или баллистическим. Общеизвестные теоретические описания «Эффекта близости» в интерфейсах сверхпроводник-нормальный металл основаны на полуклассическом уравнении Узаделя [44]. При этом уравнения, разработанные для обычных диффузных металлов, чаще всего распространяются и на топологические изоляторы. В статьях [45; 46] четко выражен диффузионный характер проводимости в области слабой связи. Для изучения андреевских состояний и майорановских состояний с нулевой энергией требуется наличие баллистического транспортного режима [47]. Работ по реализации баллистического транспорта в СП/ТИ/СП структурах очень мало [26; 48]. Первые эксперименты по синтезу, изготовлению и характеристике таких структур были выполнены в рамках работы над диссертацией. Именно эти начальные эксперименты поставили целый ряд задач и вопросов: разработка установки и контролируемого метода синтеза нанокристаллов, демонстрация баллистического транспорта в полученных гибридных структурах; нетривиальные отклики критического тока в зависимости от магнитного потока; изучение многократных андреевских отражений на СП/ТИ границе; оценка числа баллистических каналов, участвующих в переносе электронов; демонстрация избыточного тока при больших напряжениях; исчезновение первой ступени Шапиро и др. С учетом отмеченного выше, исследования, представленные в рамках диссертационной работы, представляются актуальными, а результаты дают существенный вклад в дальнейшее развитие направления.

Целью диссертационной работы было изготовление и экспериментальное исследование сверхпроводящих свойств гибридных структур сверхпроводник - топологический изолятор - сверхпроводник на основе монокристаллов $\text{Bi}_2(\text{Te}_x\text{Se}_{1-x})_3$, а также поиск и описание новых эффектов возникающих в таких системах при сверхнизких температурах.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Реализовать установку для синтеза монокристаллов топологического изолятора $\text{Bi}_2(\text{Te}_x\text{Se}_{1-x})_3$ PVD методом, с возможностью контролировать положение уровня Ферми за счет изменения химического состава. Синтезировать ультратонкие монокристаллы ТИ с латеральными размерами 0.1-1 мкм, толщиной вплоть до 10 нм, гексагональной и треугольной формы.
2. Исследовать морфологию и состав монокристаллов топологического изолятора с использованием методов дифракции обратного рассеяния электронов (ДОЭ), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭРС), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФС), рентгеновской дифракции (РДА) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).
3. Отработать, с использованием электронной литографии и магнетронного напыления, технологию изготовления гибридных структур сверхпроводник - топологический изолятор - сверхпроводник.
4. Исследовать низкотемпературный джозефсоновский транспорт полученных структур при сверхнизких температурах вплоть до 11 мК. Измерить вольтамперные характеристики (ВАХ) в зависимости от температуры, внешних приложенных магнитных полей, высокочастотного излучения, различных технологических и геометрических параметров.
5. Детально проанализировать полученные экспериментальные данные и провести расчеты на основе теоретических моделей.

Научная новизна:

1. Впервые разработан и апробирован метод физического осаждения из газовой фазы (PVD синтез) с использованием внешних индукционных нагревателей; результат интеллектуальной деятельности защищен патентом РФ.
2. Разработанный метод PVD синтеза позволил впервые получить ультратонкие монокристаллы топологического изолятора $\text{Bi}_2(\text{Te}_x\text{Se}_{1-x})_3$ с возможностью контролировать положение уровня Ферми за счет изменения концентрации Se.
3. Впервые продемонстрирован баллистический транспортный режим в субмикронных планарных гибридных джозефсоновских СП/ТИ/СП переходах на основе $\text{Nb}/\text{Bi}_2\text{Te}_{2.3}\text{Se}_{0.7}/\text{Nb}$ с высокой прозрачностью интерфейса. Было обнаружено, что больший вклад в транспортный режим осуществляется по поверхностным баллистическим каналам кристаллов ТИ.
4. Разработан метод исследования поведения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и критического тока в магнитном поле для

одинокных и двухконтактных джозефсоновских структур с топологическим изолятором в области слабой связи (СП/ТИ/СП). Впервые показано, что двухконтактные структуры демонстрируют поведение, характерное для сверхпроводящих квантовых интерферометров (СКВИДов, SQUID - от англ. Superconducting Quantum Interference Device). На основе теоретических моделей были получены оценки для вкладов баллистического и диффузионного транспорта заряда через структуры.

5. Для джозефсоновских структур с топологическим изолятором в области слабой связи (СП/ТИ/СП) было впервые исследовано поведение вольт-амперных характеристик (ВАХ) и критического тока в присутствии высокочастотного излучения. Экспериментально продемонстрировано исчезновение первой ступени Шапиро для различных диапазонов мощностей и частот высокочастотного излучения. Теоретическая модель показывает наличие вклада, как минимум 5% от 4π -периодичной компоненты в ток-фазовой зависимости в определенных режимах, что и объясняет эффект исчезновения ступени Шапиро.

Практическая значимость Исследование гибридных джозефсоновских контактов СП/ТИ/СП представляет значимость для современной науки и техники. Находясь на переднем крае физики, исследования по созданию таких систем могут в конечном итоге привести к созданию практически полезных макроскопических квантовых устройств, которые найдут применение в решении задач сверхпроводящей электроники и спинтроники. Реализованная в рамках работы над диссертацией PVD установка для синтеза монокристаллов с возможностью контроля состава может быть масштабирована и применима в массовом производстве гибридных структур на основе топологических изоляторов. Баллистический поверхностный электронный транспорт в таких системах может быть использован при реализации топологических квантовых вычислений.

Методология и методы исследования. Синтез ультратонких монокристаллов топологических изоляторов производился на созданной и запатентованной автором диссертации установке физического осаждения из газовой фазы (PVD, МФТИ) [А6]. Качество полученных монокристаллов было охарактеризовано методами: дифракции обратного рассеяния электронов (ZEISS Gemini, МИФИ), сканирующей электронной микроскопии (Jeol JSM 7001FA, ИФТТ РАН), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ZEISS Gemini, МФТИ), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (Kratos AXIS Ultra DLD, ИФТТ РАН), рентгеновской дифракции (Rigaku SmartLab SE, МИСиС) и просвечивающей электронной микроскопии (Titan Themis Z, Сколтех). Для исследования свойств образцов при сверхнизких температурах (вплоть до 11 мК) применялись

рефрижераторы растворения замкнутого цикла (BlueFors LD-250, ИФТТ РАН, МФТИ) и криостаты с жидким гелием.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Монокристаллы топологических изоляторов могут быть изготовлены при помощи специализированной установки для синтеза методом физического осаждения из газовой фазы (PVD) с двухзонным индукционным нагревом. С помощью контроля уровня дефицита селена дихалькогенида висмута $\text{Bi}_2(\text{Te}_x\text{Se}_{1-x})_3$ во время синтеза можно изменять положение уровня Ферми.
2. Ультратонкие нанокристаллы $\text{Bi}_2(\text{Te}_x\text{Se}_{1-x})_3$ с нестехиометрическим содержанием селена $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.3}\text{Se}_{0.7}$ демонстрируют высокое сопротивление $R = 2.5$ кОм с $\text{RRR}=2$ (RRR - от англ. Residual-Resistivity Ratio) и характерный для металлов вид зависимости сопротивления от температуры. Для самых тонких кристаллов толщиной ≈ 10 нм, наблюдался небольшой рост сопротивления при низких температурах, что может свидетельствовать о расположении уровня Ферми вблизи нижней точки зоны проводимости.
3. Субмикронные джозефсоновские контакты $\text{Nb-Bi}_2\text{Te}_{2.3}\text{Se}_{0.7}\text{-Nb}$ различной геометрии, демонстрируют наличие критического тока на уровне 1 мкА, при нормальном сопротивлении порядка 1 кОм. Теоретический анализ данных о проводимости, а также анализ температурной зависимости критического тока указывает на баллистический характер переноса заряда через нанокристаллы $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.3}\text{Se}_{0.7}$.
4. На вольт-амперных характеристиках джозефсоновских контактов $\text{Nb-Bi}_2\text{Te}_{2.3}\text{Se}_{0.7}\text{-Nb}$ под действием внешнего высокочастотного излучения первая ступень Шапиро исчезает для частот изучения от 1 ГГц до 2 ГГц. Теоретический расчет с использованием $t\text{RSJ}$ модели позволяет объяснить исчезновение ступени Шапиро наличием, как минимум 5% вклада от 4π -периодичной компоненты в ток-фазовой зависимости.

Достоверность. Результаты, представленные в диссертации, получены на основе воспроизводимых экспериментов, проведенных на современном научном оборудовании с использованием апробированных методов обработки данных. Экспериментальные данные подтверждены расчетами, основанными на общепринятых теоретических подходах и не противостоят исследованиям других научных групп. Результаты исследований неоднократно обсуждены на семинарах и доложены на специализированных конференциях по проблемам, связанным с тематикой диссертационной работы. Результаты опубликованы в международных научных журналах, рецензируемых ВАК, Scopus и WoS. Это позволяет считать полученные

результаты обоснованными и достоверными, а также полностью отвечающими современному мировому уровню исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. Conference: 26^{eme} Congres General de la SFP «Gate Tunable Supercurrent in Nb-Bi₂Te_{2.3}Se_{0.7}-Nb topological Josephson junctions» Dmitry Yakovlev, Ivan Nazhestkin, Vasily Stoliarov, Conference: 26^{eme} Congres General de la SFP, Paris, France 3–7 July 2023

2. «Fractional ac Josephson effect in ultrasmall Bi₂Te_{2.3}Se_{0.7} single crystal based junction» Dmitry Yakovlev, Sergei Kozlov, Vasily Stolyarov, Cheryl Feuillet-Palma and Dimitri Rodichev, International Workshop on The physics of disordered superconductors and their application to quantum circuits, Les Houches, France, 4-9 June 2023

3. «Баллистический транспорт через поверхностные состояния монокристаллов топологического изолятора» Bi₂Te_{2.3}Se_{0.7} Д.С. Яковлев и В.С. Столяров 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 23–29 ноября 2020;

4. Yakovlev, D. S., Egorov, S. V., Skryabina, O. V., Kozlov, S. N., and Stolyarov, V. S. «Josephson junction based on topological insulator/superconductor heterostructure for topological quantum computation», International School on Quantum Technologies, Russia. Sochi. 1-7 March 2020;

5. Yakovlev, Dmitry «Josephson supercurrent in single-crystalline nanoplate of Bi₂Te₂Se topological insulator». Traditional the 22nd International conference on Low Temperature Physics and Superconductivity, Superconducting Quantum Circuits. Mandarfen, Austria, March 16-23, 2019;

6. «Coherent effects in junctions based on p-wave superconductor» Golubov A., Stolyarov V.S., Yakovlev D.S., Skryabina O.V., Gurtovoy V., Lvov D.S., Egorov S.V., Ryazanov V.V., Roditchev D., Vinokur V.M. Quantum Coherent Phenomena at Nanoscale 2019 workshop, Ischia, Naples (Italy);

7. «Исследование гибридных сверхпроводниковых структур топологического изолятора» Яковлев Д.С., Скрыбина О.В., Львов Д.С. и Столяров В.С. в сборнике Материалы Международного молодежного научного форума ЛОМОНОСОВ, 2017 ;

8. «Эффект джозефсона в гибридных структурах сверхпроводник - топологический изолятор - сверхпроводник на основе наноразмерных монокристаллов Bi₂Te₂Se» Яковлев Д.С., Львов Д.С., Скрыбина О.В., Егоров С.В., Голубов А.А., Столяров В.С. в сборнике Юбилейная XV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа, 2017;

9. «The synthesis of nanodimensional monocrystals of a topological insulator and the investigation of hybrid superconductor structures on their basis» Yakovlev D.S., Skryabina O.V., Egorov S.V., Stepanov N.S. and Stolyarov V.S. Conference and International School Superconducting hybrid nanostructures: physics and application, 2016.

10. Яковлев Д.С., Скрыбина О.В., Егоров С.В., Столяров В.С. “Синтез наноразмерных монокристаллов топологического изолятора и исследование гибридных сверхпроводниковых структур на их основе” XIV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа, 2016.

Личный вклад. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором в «Лаборатории топологических квантовых явлений в сверхпроводящих системах» лично либо при его непосредственном участии.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях, 3 из которых — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 1 преринт arXiv, 3 — в тезисах докладов. Зарегистрирован 1 патент.

[A1] Stolyarov, V. S., **Yakovlev, D. S.**, Kozlov, S. N., Skryabina, O. V., Lvov, D. S., Gumarov, A. I., ... and Roditchev, D. (2020). Josephson current mediated by ballistic topological states in $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.3}\text{Se}_{0.7}$ single nanocrystals. *Communications Materials*, 1(1), 38.

[A2] **Yakovlev, D. S.**, Lvov, D. S., Emelyanova, O. V., Dzhumayev, P. S., Shchetinin, I. V., Skryabina, O. V., ... and Stolyarov, V. S. (2022). Physical Vapor Deposition Features of Ultrathin Nanocrystals of $\text{Bi}_2(\text{Te}_x\text{Se}_{1-x})_3$. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 13(39), 9221-9231.

[A3] Stolyarov, V. S., Roditchev, D., Kozlov, S. N., **Yakovlev, D. S.**, Skryabina, O. V., ... and Golubov, A. A. (2022). Resonant Oscillations of Josephson Current in $\text{Nb-Bi}_2\text{Te}_{2.3}\text{Se}_{0.7}\text{-Nb}$ Junctions. *Advanced Quantum Technologies*, 5(3), 2100124.

[A4] Stolyarov, V., Kozlov, S., **Yakovlev, D.**, Bergeal, N., Feuillet-Palma, C., Lvov, D., ... and Roditchev, D. (2023). Anomalous microwave response in the dissipative regime of topological superconducting devices based on $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.3}\text{Se}_{0.7}$ arXiv preprint arXiv:2309.10897.

[A5] **Yakovlev, D. S.**, Egorov, S. V., Skryabina, O. V., Kozlov, S. N., and Stolyarov, V. S. (2020) Josephson junction based on topological insulator/superconductor heterostructure for topological quantum computation. 3rd International School on Quantum Technologies, book of abstract.

[A6] **Yakovlev, D. S.**, Lvov, D. S., Gurtovoi, V. L. and Stolyarov, V. S. Physical vapour deposition setup (2020) RO Patent 203,742 Moscow, RU. Patent.

[A7] **Yakovlev, D. S.** (2020) Ballistic transport through surface states topological insulator single crystals $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.3}\text{Se}_{0.7}$. 63 conference MIPT, book of abstract.

[A8] **Yakovlev, D. S.**, Egorov, S. V., Skryabina, O. V. and Stolyarov, V. S. (2017) The synthesis of nanodimensional monocrystals of a topological insulator and the investigation of hybrid superconductor structures on

their basis. Superconducting hybrid nanostructures: physics and application conference, book of abstract.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна, практическая значимость, структура и объем представляемой работы.

Первая глава диссертации представляет собой литературный обзор тем, составляющих фундамент проведенных диссертантом исследований. Представлено краткое теоретическое обсуждение гибридных систем топологический изолятор - сверхпроводник, а также обсуждается текущее состояние данной области.

Вторая глава посвящена обсуждению различных аспектов, связанных с технологическими и экспериментальными методами, использованными в исследовании.

В начале главы описывается разработанная и запатентованная [A6] установка для синтеза субмикронных и наноразмерных монокристаллов топологических изоляторов (ТИ) методом физического осаждения из газовой фазы (PVD).

Описана конструкция и особенности устройства установки для синтеза ТИ. Полезная модель (патент) включает в себя индивидуальный индукционный нагрев образца и источники материала ТИ, что позволяет гибко управлять режимом осаждения.

Далее рассматривается процесс изготовления с применением различных технологических методов. Описываются этапы электронной литографии, включая нанесение резиста, засветку электронным пучком и магнетронное напыление сверхпроводящих контактов.

Описаны измерительные установки, использованные в исследовании. Описан криостат Advanced Research System (ARS), позволяющий проводить измерения при температурах до 4,2 К, вставка в транспортный дьюар Oxford Heliox VL до 300 мК и рефрижератор растворения Bluefors LD250 до 20 мК, а также измерительные схемы использованные в работе.

В **Третьей главе** приведено описание структурных и электронных свойств сверхтонких нанокристаллов ТИ $\text{Bi}_2(\text{Te}_x\text{Se}_{1-x})_3$. Нанокристаллы были синтезированы методом физического осаждения из газовой фазы на подложках Si(100). В результате синтеза были получены ультратонкие монокристаллы ТИ с треугольной и гексагональной морфологией, с поперечными размерами до нескольких мкм. Химический состав и структура нанокристаллов были проанализированы с помощью различных методов,

таких как энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, обратное рассеяние электронов и дифракция рентгеновских лучей.

Исследование показало, что условия роста оказывают влияние на морфологию, структурные и электронные свойства нанокристаллов (Рис.1).

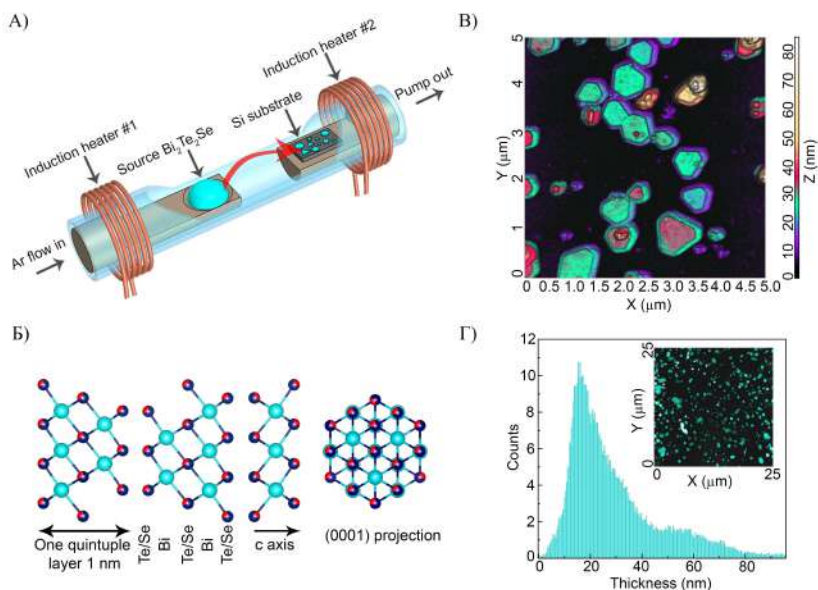


Рис. 1 — Экспериментальная установка и схема роста кристаллов.

Описано изготовление и характеристика субмикронных планарных переходов $\text{Nb-Bi}_2(\text{Te}_x\text{Se}_{1-x})_3\text{-Nb}$ для последующего проведения транспортных измерений. Электрическое сопротивление переходов измеряется в диапазоне температур 1,2-300 К. Измерения сопротивления показывают металлическое поведение от 300 К до 40 К. Ниже 40 К характер сопротивления изменяется, причем в одном образце наблюдается небольшой перегиб перед сверхпроводящим переходом, а в двух других образцах оно продолжает монотонно уменьшаться. Это различие может быть связано с локализацией поверхностных состояний и вымерзанием объемных носителей в топологических изоляторах в более тонких кристаллах 2.

Изложенные в третьей главе результаты опубликованы в [A2,A8].

Четвертая глава посвящена исследованию сверхпроводящих свойств джозефсоновских контактов с использованием наноразмерных монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.3}\text{Se}_{0.7}$, которые являются топологическими изоляторами. На основе наноразмерных монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.3}\text{Se}_{0.7}$ были

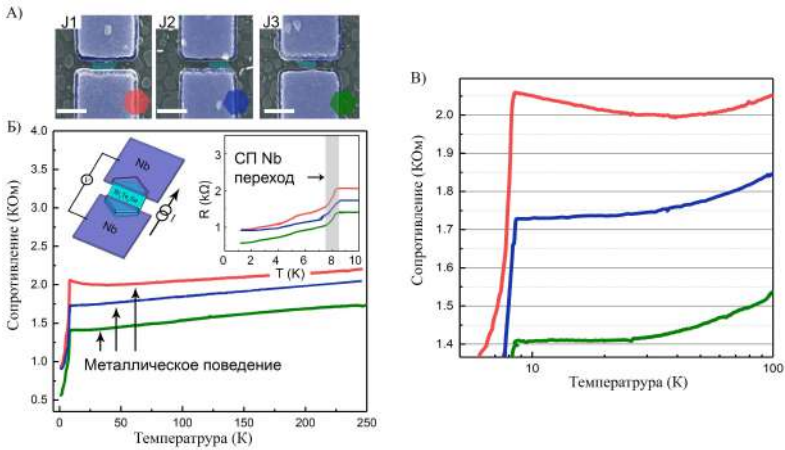


Рис. 2 — **А:** СЭМ-изображения контактов J1-J3. **Б:** Температурная зависимость сопротивлений образцов в диапазоне от 250 К до 1,2 К. Вставка вверху слева: схемы измерений, использованных в этой работе. Область сверхпроводящего перехода показана серой полосой на вставке вверху справа. **В:** Логарифмическая зависимость сопротивления $\ln T$.

созданы устройства, в которых баллистические каналы доминируют над объемным транспортом электронов.

Вольтамперные характеристики подтверждают джозефсоновскую природу устройств с нулевым сопротивлением при малом токе смещения и резким переходом к резистивному состоянию выше критического тока. Критический ток резко возрастает с понижением температуры, что указывает на сильную джозефсоновскую связь в устройствах. Кроме того, устройства демонстрируют осцилляции критического тока при приложении внешнего магнитного поля, интерференционные зависимости Фраунгофера.

Наблюдаемый отклик магнитного поля анализируется с учетом мейснеровского диамагнетизма Nb-электродов и зависящего от геометрии фактора фокусировки, который усиливает магнитное поле в области контакта. Зависимость критического тока от поля позволяет предположить наличие дополнительных сверхтоков, генерируемых полем, внутри нанокристаллов, которые интерферируют с джозефсоновским током, что приводит к наблюдаемым осцилляциям рис.3.

Проведено сравнение экспериментальных данных с численным моделированием на основе диффузионной и баллистической моделей, и баллистическая модель обеспечивает лучшее соответствие экспериментальным результатам. Показано, что баллистические поверхностные каналы доминируют в транспорте электронов в изготовленных устройствах рис.4.

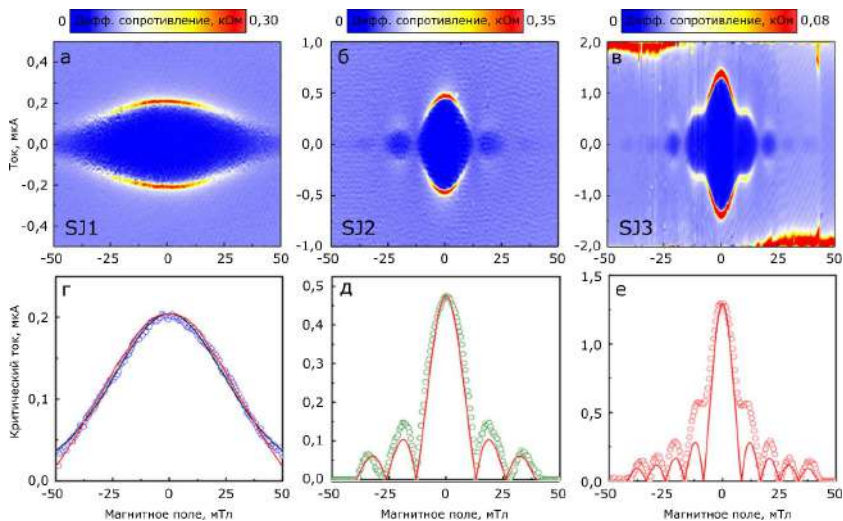


Рис. 3 — а–в) Дифференциальное сопротивление в зависимости от тока через образец и приложенного магнитного поля $dVdI(I,H)$ для одиночных образцов. Сверхпроводящее состояние образцов соответствует темно-синей области, где сопротивление нулевое. г–е) Зависимость критического тока одиночных контактов от приложенного магнитного поля $I_c(H)$. Размер точек соответствует погрешности измерений. Сплошными цветными линиями показаны аппроксимации: г) аппроксимации выполнены по баллистической (красная кривая) и диффузной модели (черная кривая); д, е) аппроксимации по формуле (11). Период осцилляций образцов SJ2 и SJ3 составляет 12,9 мТл и 8,2 мТл, соответственно.

Исследование демонстрирует успешное изготовление джозефсоновских контактов с использованием наноразмерных монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.3}\text{Se}_{0.7}$ и подчеркивает их потенциал для изучения явлений топологической сверхпроводимости. Баллистический транспортный режим, наблюдаемый в устройствах, открывает возможности для применения их в квантовых вычислениях и спинтронике [30; 46; 49–52]. Изложенные в третьей главе результаты опубликованы в [A1, A3, A5, A7].

В **пятой главе** рассматривается влияние внешнего высокочастотного излучения на джозефсоновские контакты $\text{Nb}/\text{Bi}_2\text{Te}_{2.3}\text{Se}_{0.7}/\text{Nb}$. Показано исчезновение первой ступеньки Шапиро при уменьшении частоты от 2 ГГц до 1 ГГц. Считается, что в таких переходах существуют майорановские связанные состояния, и отсутствие первой ступени Шапиро в вольтамперных характеристиках рассматривается, как свидетельство наличия майорановских нулевых мод. Показано что эти переходы являются баллистическими и при воздействии микроволнового излучения демонстрируют ступени Шапиро, однако, первая ступень не наблюдается в некотором

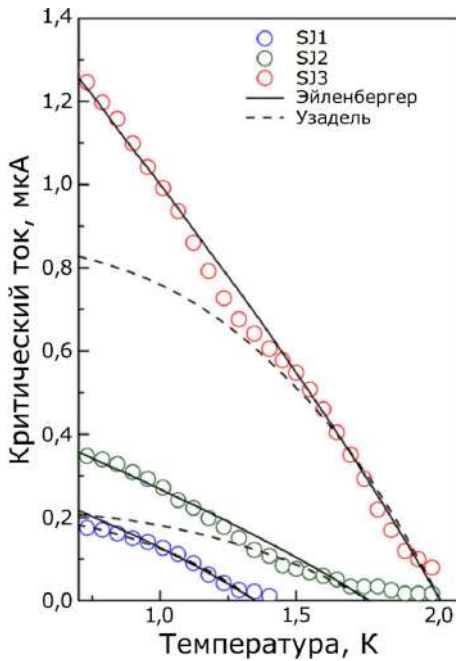


Рис. 4 — Зависимость критического тока от температуры для одиночных S-TI-S переходов. Цветами обозначены экспериментальные данные. Сплошные линии — наилучшие аппроксимации по модели Эйленбергера (баллистический транспорт), штриховые — по модели Узаделя (диффузный транспорт).

диапазоне частот и мощностей. Проведённый теоретический расчет с использованием tRSJ модели демонстрирует, что такое поведение может свидетельствовать о присутствии вклада π -компоненты в сверхток как минимум на уровне 5%.

В тексте рассматриваются теоретические предпосылки возникновения андреевских связанных состояний и нулевых мод Майораны в переходах сверхпроводник/нормальный металл/сверхпроводник. Объясняется, что нулевые моды Майораны приводят к появлению 4π -периодической составляющей в ток фазовой зависимости.

Проведено сравнение полученных результатов с предыдущими экспериментами и теориями. Отмечено, что эффект отсутствия первой ступени наблюдался в различных системах, включая нанопроволоки со спин-орбитальной связью и трехмерные топологические изоляторы. Обсуждаются различные объяснения исчезновения первой ступени, такие как топологическая природа проксимизированного материала или баллистический характер транспорта электронов через переход. Обсуждается роль эффекта "отравления квазичастицами" в подавлении 4π -компоненты и его

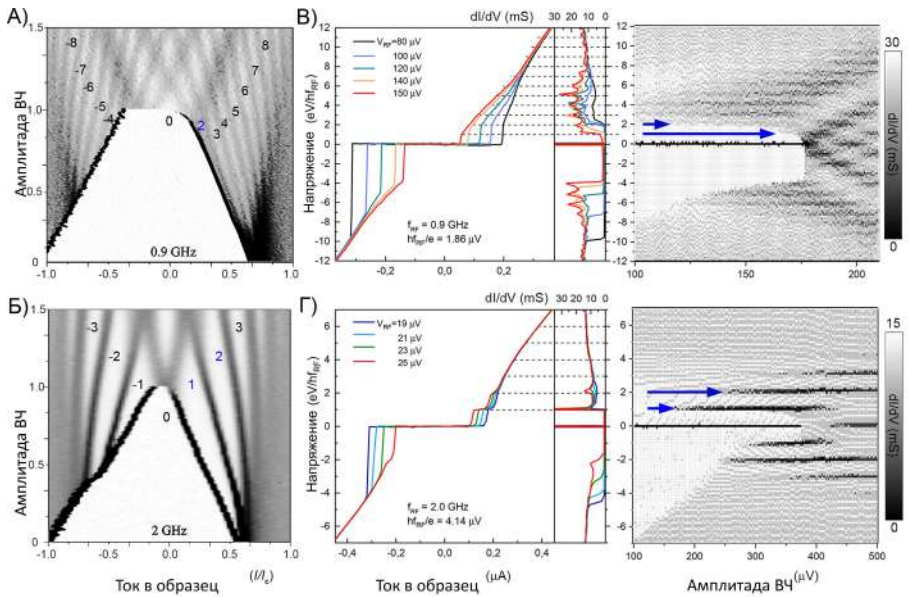


Рис. 5 — Вольт амперные характеристики и их производные для различных частот ВЧ излучения. А, Б Графики Шапиро ступеней dV/dI для различных частот возбуждения $f_{RF} = 0,9$ и 2 ГГц. Карты охватывают отрицательную (переключение) и положительную (возврат) полярность тока смещения и демонстрируют наличие гистерезиса. Левая часть графика для $I < 0$ соответствует току переключения, а участок $I > 0$ - току возврата. В, Г $V(I)$ -кривые. Для $I > 0$ наблюдается эффект "четный-нечетный". Он лучше виден на правой части графика, где показана зависимость dI/dV от тока смещения при различных мощностях ВЧ. Вторая ступенька Шапиро возникает при меньшей мощности излучения, чем первая. Первая ступенька восстанавливается при достаточно больших амплитудах излучения. Напряжение нормировано на $hf/2e$, где h - постоянная Планка, а e - заряд электрона.

влияние на первую ступень Шапиро. Рассматриваются различия топологических и тривиальных эффектов на основе наличия эффекта "отравления квазичастицами".

В тексте представлены экспериментальные результаты в виде 3D графиков ступеней Шапиро, графиков дифференциальной проводимости и вольтамперных характеристик. Обсуждается поведение ступенек и их зависимость от амплитуды и частоты ВЧ-излучения. Проанализированы ветви критического тока и тока возврата, показано различие между низкими и высокими частотами (Рис.5).

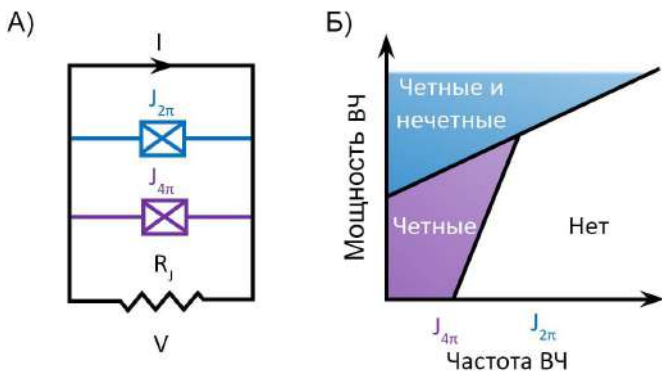


Рис. 6 — А) Схема двухканальной модели tRSJ. Один из двух параллельных джозефсоновских переходов (J1) обозначает тривиальный критический ток с 2π компонентой, а другой (J2) - баллистический канал с 4π компонентой параллельно с шунтирующим сопротивлением R_J . Б) Фазовая диаграмма четных и нечетных ступеней Шапиро в двухканальной модели RSJ.

В заключении обсуждается двухканальная модель теплового (tRSJ) транспорта. Показано, что модель может воспроизвести наблюдаемое поведение, включая отсутствующую первую ступень, путем учета взаимодействия 2π и 4π -периодических составляющих в ток фазовой зависимости. Модель обеспечивает численное соответствие с экспериментальными данными (Рис.6).

В данной главе показано экспериментальное свидетельство отсутствия первой ступени Шапиро в сверхпроводящих джозефсоновских переходах $Nb/Bi_2Te_{2.3}Se_{0.7}/Nb$. Предложена теоретическая модель, объясняющая наблюдения и поддерживающая объяснение исчезновения первой ступени при учете 5% 4π -компоненты. Изложенные в третьей главе результаты опубликованы в статье [A4]

В **заключении** подводятся итоги выполненных в диссертационной работе исследований и полученных результатов.

Список литературы

1. The gigantic Rashba effect of surface states energetically buried in the topological insulator Bi_2Te_2Se / К. Miyamoto [и др.] // New Journal of Physics. — 2014. — Т. 16, № 6. — С. 065016.
2. Hasan, M. Z. Colloquium: topological insulators / M. Z. Hasan, C. L. Kane // Reviews of modern physics. — 2010. — Т. 82, № 4. — С. 3045.

3. Experimental realization of a three-dimensional topological insulator, Bi_2Te_3 / Y. Chen [и др.] // science. — 2009. — Т. 325, № 5937. — С. 178—181.
4. Observation of unconventional quantum spin textures in topological insulators / D. Hsieh [и др.] // Science. — 2009. — Т. 323, № 5916. — С. 919—922.
5. *Moore, J. E.* Topological invariants of time-reversal-invariant band structures / J. E. Moore, L. Balents // Physical Review B. — 2007. — Т. 75, № 12. — С. 121306.
6. Band engineering of Dirac surface states in topological-insulator-based van der Waals heterostructures / C.-Z. Chang [и др.] // Physical review letters. — 2015. — Т. 115, № 13. — С. 136801.
7. *Sato, M.* Topological superconductors: a review / M. Sato, Y. Ando // Reports on Progress in Physics. — 2017. — Т. 80, № 7. — С. 076501.
8. *Fu, L.* Superconducting proximity effect and Majorana fermions at the surface of a topological insulator / L. Fu, C. L. Kane // Physical review letters. — 2008. — Т. 100, № 9. — С. 096407.
9. *Beenakker, C.* Search for Majorana fermions in superconductors / C. Beenakker // Annu. Rev. Condens. Matter Phys. — 2013. — Т. 4, № 1. — С. 113—136.
10. *Alicea, J.* New directions in the pursuit of Majorana fermions in solid state systems / J. Alicea // Reports on progress in physics. — 2012. — Т. 75, № 7. — С. 076501.
11. Strong superconducting proximity effect in Pb-Bi₂Te₃ hybrid structures / F. Qu [и др.] // Scientific reports. — 2012. — Т. 2, № 1. — С. 339.
12. Induced unconventional superconductivity on the surface states of Bi_2Te_3 topological insulator / S. Charpentier [и др.] // Nature communications. — 2017. — Т. 8, № 1. — С. 1—8.
13. *Majorana, E.* A symmetric theory of electrons and positrons / E. Majorana // Soryushiron Kenkyu Electronics. — 1981. — Т. 63, № 3. — С. 149—162.
14. *Kitaev, A. Y.* Unpaired Majorana fermions in quantum wires / A. Y. Kitaev // Physics-uspekhi. — 2001. — Т. 44, 10S. — С. 131.
15. *Lutchyn, R. M.* Majorana fermions and a topological phase transition in semiconductor-superconductor heterostructures / R. M. Lutchyn, J. D. Sau, S. D. Sarma // Physical review letters. — 2010. — Т. 105, № 7. — С. 077001.
16. *Oreg, Y.* Helical liquids and Majorana bound states in quantum wires / Y. Oreg, G. Refael, F. Von Oppen // Physical review letters. — 2010. — Т. 105, № 17. — С. 177002.

17. *Cha, J. J.* Topological insulator nanostructures / J. J. Cha, K. J. Koski, Y. Cui // *physica status solidi (RRL)*—Rapid Research Letters. — 2013. — Т. 7, № 1/2. — С. 15–25.
18. *Qi, X.-L.* Topological insulators and superconductors / X.-L. Qi, S.-C. Zhang // *Reviews of Modern Physics*. — 2011. — Т. 83, № 4. — С. 1057.
19. *Fu, L.* Topological insulators in three dimensions / L. Fu, C. L. Kane, E. J. Mele // *Physical review letters*. — 2007. — Т. 98, № 10. — С. 106803.
20. A tunable topological insulator in the spin helical Dirac transport regime / D. Hsieh [и др.] // *Nature*. — 2009. — Т. 460, № 7259. — С. 1101–1105.
21. Ultrafast helicity control of surface currents in topological insulators with near-unity fidelity / C. Kastl [и др.] // *Nature communications*. — 2015. — Т. 6, № 1. — С. 6617.
22. *Weber, S. J.* Gatemons get serious / S. J. Weber // *Nature Nanotechnology*. — 2018. — Т. 13, № 10. — С. 877–878.
23. Semiconductor-nanowire-based superconducting qubit / T. W. Larsen [и др.] // *Physical review letters*. — 2015. — Т. 115, № 12. — С. 127001.
24. Superconducting gatemon qubit based on a proximitized two-dimensional electron gas / L. Casparis [и др.] // *Nature nanotechnology*. — 2018. — Т. 13, № 10. — С. 915–919.
25. Josephson supercurrent through the topological surface states of strained bulk HgTe / J. B. Oostinga [и др.] // *Physical Review X*. — 2013. — Т. 3, № 2. — С. 021007.
26. Influence of topological edge states on the properties of Al/Bi₂Se₃/Al hybrid Josephson devices / L. Galletti [и др.] // *Physical Review B*. — 2014. — Т. 89, № 13. — С. 134512.
27. Observation of the superconducting proximity effect in the surface state of SmB₆ thin films / S. Lee [и др.] // *Physical Review X*. — 2016. — Т. 6, № 3. — С. 031031.
28. Phase coherence and Andreev reflection in topological insulator devices / A. Finck [и др.] // *Physical Review X*. — 2014. — Т. 4, № 4. — С. 041022.
29. Evidence for an anomalous current–phase relation in topological insulator Josephson junctions / C. Kurter [и др.] // *Nature communications*. — 2015. — Т. 6, № 1. — С. 7130.
30. Symmetry protected Josephson supercurrents in three-dimensional topological insulators / S. Cho [и др.] // *Nature communications*. — 2013. — Т. 4, № 1. — С. 1–6.
31. Gate-tuned normal and superconducting transport at the surface of a topological insulator / B. Sacéré [и др.] // *Nature communications*. — 2011. — Т. 2, № 1. — С. 575.

32. Experimental realization of superconducting quantum interference devices with topological insulator junctions / M. Veldhorst [и др.] // Applied physics letters. — 2012. — Т. 100, № 7.
33. Electrically switchable Berry curvature dipole in the monolayer topological insulator WTe₂ / S.-Y. Xu [и др.] // Nature Physics. — 2018. — Т. 14, № 9. — С. 900–906.
34. 4π -periodic Andreev bound states in a Dirac semimetal / C. Li [и др.] // Nature materials. — 2018. — Т. 17, № 10. — С. 875–880.
35. Two-dimensional topological superconductivity in Pb/Co/Si (111) / G. C. Menard [и др.] // Nature communications. — 2017. — Т. 8, № 1. — С. 1–7.
36. *Rachel, S.* Interacting topological insulators: a review / S. Rachel // Reports on Progress in Physics. — 2018. — Т. 81, № 11. — С. 116501.
37. Growth dynamics and thickness-dependent electronic structure of topological insulator Bi₂Te₃ thin films on Si / Y.-Y. Li [и др.] // arXiv preprint arXiv:0912.5054. — 2009.
38. Highly tunable electron transport in epitaxial topological insulator (Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₃ thin films / X. He [и др.] // Applied Physics Letters. — 2012. — Т. 101, № 12. — С. 123111.
39. *Teweldebrhan, D.* Exfoliation and characterization of bismuth telluride atomic quintuples and quasi-two-dimensional crystals / D. Teweldebrhan, V. Goyal, A. A. Balandin // Nano letters. — 2010. — Т. 10, № 4. — С. 1209–1218.
40. Topological insulator nanowires and nanoribbons / D. Kong [и др.] // Nano letters. — 2010. — Т. 10, № 1. — С. 329–333.
41. Ultra-low carrier concentration and surface-dominant transport in antimony-doped Bi₂Se₃ topological insulator nanoribbons / S. S. Hong [и др.] // Nature communications. — 2012. — Т. 3, № 1. — С. 1–7.
42. Synthesis and quantum transport properties of Bi₂Se₃ topological insulator nanostructures / Y. Yan [и др.] // Scientific reports. — 2013. — Т. 3, № 1. — С. 1–5.
43. Dual-gated topological insulator thin-film device for efficient fermi-level tuning / F. Yang [и др.] // Acs Nano. — 2015. — Т. 9, № 4. — С. 4050–4055.
44. *Usadel, K. D.* Generalized diffusion equation for superconducting alloys / K. D. Usadel // Physical Review Letters. — 1970. — Т. 25, № 8. — С. 507.
45. Josephson supercurrent in a topological insulator without a bulk shunt / M. Snelder [и др.] // Superconductor science and technology. — 2014. — Т. 27, № 10. — С. 104001.

46. Anomalous Fraunhofer patterns in gated Josephson junctions based on the bulk-insulating topological insulator $BiSbTeSe_2$ / S. Ghatak [и др.] // Nano letters. — 2018. — Т. 18, № 8. — С. 5124–5131.
47. *Beenakker, C.* Random-matrix theory of Majorana fermions and topological superconductors / C. Beenakker // Reviews of Modern Physics. — 2015. — Т. 87, № 3. — С. 1037.
48. Induced unconventional superconductivity on the surface states of Bi_2Te_3 topological insulator / S. Charpentier [и др.] // Nature communications. — 2017. — Т. 8, № 1. — С. 2019.
49. *Bobkova, I.* Electrically controllable spin filtering based on superconducting helical states / I. Bobkova, A. Bobkov // Physical Review B. — 2017. — Т. 96, № 22. — С. 224505.
50. Gate-tunable supercurrent and multiple Andreev reflections in a superconductor-topological insulator nanoribbon-superconductor hybrid device / L. A. Jauregui [и др.] // Applied Physics Letters. — 2018. — Т. 112, № 9. — С. 093105.
51. Josephson Effect and Charge Distribution in Thin Bi_2Te_3 Topological Insulators / M. P. Stehno [и др.] // Advanced Materials. — 2020. — Т. 32, № 14. — С. 1908351.
52. Induced Topological Superconductivity in a $BiSbTeSe_2$ -Based Josephson Junction / B. De Ronde [и др.] // Nanomaterials. — 2020. — Т. 10, № 4. — С. 794.