

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

На правах рукописи

Карабасов Тайржан

**Исследование сверхпроводящего диодного эффекта в гибридных
структурах сверхпроводник/топологический изолятор**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
D. Hab., профессор
Васенко Андрей Сергеевич

Москва 2024

Тема диссертации

Актуальность исследования

Сверхпроводящая электроника стала из сравнительно нового направления устойчиво развивающейся областью исследований. Благодаря большому потенциалу применения, а также способности разрешить важные вопросы современной электроники данная область занимает особое место в современной науке. В частности, одним из таких вопросов в последнее время становится поиск и разработка низкодиссипативной электронно-компонентой базы. Ключевыми компонентами сверхпроводниковой электроники являются сверхпроводники и сверхпроводящие структуры. Сверхпроводник представляет собой макроскопический квантовый объект, в котором сверхпроводящие электроны (Куперовские пары) могут быть описаны единой волновой функцией. Таким образом, приборы, построенные на сверхпроводниках, представляют собой устройства, работающие на квантовых эффектах.

Одним из объектов исследования сверхпроводящей электроники являются Джозефсоновские контакты. Два сверхпроводника соединенные так называемой слабой связью предлагают принципиально новый функционал, основанный на туннелировании Куперовских пар через несверхпроводящий промежуточный материал. В частности, Джозефсоновские контакты могут быть использованы в качестве элементов памяти [1], кубитов в сверхпроводящем процессоре [2, 3], а также в качестве элементов сверхпроводящей нейронной сети [4]. Помимо Джозефсоновских контактов, гибридные структуры работающие на эффекте близости также имеют широкий потенциал применения в сверхпроводящей электронике и спинтронике [5]. Так, например, сверхпроводящие гибридные структуры в контакте с ферромагнетиками обладают эффектом спинового вентиля, позволяя управлять сверхпроводимостью за счет регулирования параметров ферромагнетика [6].

Полупроводниковые диоды являются одними из основополагающих электронных компонентов, имеющих широкое применение в современной электронике. Однако, при низких температурах обычные диоды на основе полупроводников обладают высоким сопротивлением, что в свою очередь приводит к энергетическим потерям и разогреву при их работе. Поэтому, сравнительно недавно экспериментально обнаруженный, диодный эффект в сверхпроводящих структурах способен разрешить данную проблему. Сверхпроводящий диодный эффект оперирует при температурах порядка сверхпроводящего перехода, что в настоящее время составляет единицы Кельвин. Кроме того, сверхпроводящие диоды являются квантовыми устройствами, которые управляются определенными симметриями и описываются формализмом квантовой механики. Такие устройства могут быть широко использованы в сверхпроводящей электронике, спинтронике, в области квантовой информации, а также в коммуникационных технологиях.

Степень разработанности проблемы

Фокусом настоящей диссертационной работы является невзаимный электронный транспорт в сверхпроводниках, то есть диодный эффект. Сверхпроводящий диодный эффект становится бурно-развивающейся областью исследования [7] и имеет огромный потенциал для применения в области сверхпроводниковой электроники [8] и спинтроники [5]. Такой эффект является аналогом диодного эффекта в классической электронике, за исключением того, что вместо обычного электрического тока, сверхпроводящий диод пропускает сверхпроводящий ток в выделенном направлении, т. е. ток Куперовских пар. Сверхпроводящий диод является бездиссипативным элементом, то есть такое устройство не рассеивает тепло. Впервые, диодный эффект в сверхпроводящей системе был обнаружен экспериментально в сверхрешетках Nb/V/Ta [9]. Позже, последовала серия теоретических работ, в которых предлагалось теоретическое описание диодного эффекта в отдельных материалах. Становилось ясно, что невзаимный сверхпроводящий транспорт можно получить в системах с

нарушением симметрии обращения времени и пространственной инверсии. Первое условие может быть достигнуто с помощью внешнего магнитного поля или обменного поля ферромагнетика, а второе условие выполняется в материалах со спин-орбитальным взаимодействием. В частности, сверхпроводящие устройства на основе материалов с топологически нетривиальной зонной структурой как правило могут обладать существенным спин-орбитальным взаимодействием. Важно отметить, что сверхпроводящий диодный эффект можно также реализовать в системах без нарушения симметрии обращения времени, то есть в отсутствие магнитного или обменного поля, а также в системах без спин-орбитального взаимодействия.

Одной из перспективных платформ для реализации сверхпроводящего диодного эффекта являются диоды на основе топологических изоляторов (ТИ) [10]. Так, в гетероструктурах $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeTe}$, а также $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{PdTe}$ во внешнем магнитном поле была продемонстрирована существенная невзаимность критического тока [10, 11]. В таких структурах наряду со сверхпроводимостью присутствует спин-орбитальное взаимодействие за счет поверхности топологического изолятора Bi_2Te_3 . Поверхность ТИ обладает сильным спин-орбитальным взаимодействием, что позволяет демонстрировать существенный магнитоэлектрический эффект [12]. Особое внимание было уделено магнитоэлектрическому эффекту в Джозефсоновских переходах на основе ТИ, где он проявляется в виде аномального фазового сдвига основного состояния [13]. Природа диодного эффекта в системах со спин-орбитальным взаимодействием может быть объяснена так называемым сверхпроводящим геликоидальным состоянием [7]. Геликоидальный сверхпроводник, характеризуется ненулевым импульсом куперовских пар, который приводит к пространственной модуляции параметра порядка. В случае геликоидального сверхпроводника направление импульса куперовских пар зависит от направления Зеемановского поля. Конечный импульс куперовских пар, определяемый типом спин-орбитального взаимодействия и привязанный к

направлению Зеемановского поля, приводит к невзаимному току распаривания в различных системах.

Сверхпроводящий диодный эффект в гибридных структурах в отсутствие внешнего магнитного поля также интересен для исследования, поскольку необходимость во внешнем магнитном поле, а также в его управлении в составе электронной схемы на практике может вызвать трудности. Диодный эффект без внешнего магнитного поля был исследован экспериментально в Джозефсоновских диодах на основе Ван дер Ваальсовых структур, а также в ферромагнитных гетероструктурах [14, 15]. В то время как в работе [14] диодный эффект возникает из-за асимметричного туннелирования куперовских пар на интерфейсе, в работе [15] эффект реализуется за счет комбинации сверхпроводимости, спин-орбитального взаимодействия, а также обменного поля. В последнем случае, изменяя параметры гетероструктуры можно добиться управления диодным эффектом. Таким образом, диодный эффект в гибридных структурах представляет собой перспективную область для исследования.

Экспериментально исследованные гетероструктуры на основе ферромагнетика чаще всего представляют собой сложные системы. Кроме того, создание материала, который является сверхпроводником со спин-орбитальным взаимодействием, а также имеет эффективное обменное поле, может быть весьма проблематичным с технологической точки зрения. Поэтому, возникает необходимость в изучении гибридных систем, работающих на эффекте близости с хорошо контролируемыми параметрами.

Идея о возникновении диодного эффекта в сверхпроводниках не является новой. Еще в 1996 г. Эдельштейн, вслед за работой о магнитоэлектрическом эффекте в сверхпроводниках с нарушенной симметрией пространственной инверсии [16], показал в рамках формализма Гинбурга-Ландау, что в таких же системах можно получить невзаимный транспорт [17]. Однако, только после недавних экспериментальных работ по

обнаружению диодного эффекта интерес к данной тематике резко возрос. Теоретические предсказания по обнаружению диодного эффекта были сделаны для большого числа систем [7]. Такие системы можно условно разделить на отдельные сверхпроводящие материалы [18] и Джозефсоновские контакты [19]. Если в первом случае подразумевается невзаимность распаривающего тока, то во втором говорят про невзаимность Джозефсоновского критического тока. Теория предсказывает, что нарушение симметрии обращения времени не является обязательным условием для реализации Джозефсоновского диодного эффекта [20].

На данный момент тема исследования диодного эффекта является актуальной ввиду широкого применения в области сверхпроводящей электроники. Данная тема недостаточно широко изучена, в частности в контексте сверхпроводящих гибридных структур на основе топологического изолятора. Особый интерес представляют устройства, в которых условия диодного эффекта сочетаются с эффектом близости. Механизм, приводящий к возникновению невзаимного сверхпроводящего транспорта в таких структурах также не изучен. Более того, параметры, влияющие на эффективность также недостаточно исследованы. Важным пунктом в исследовании сверхпроводящего диодного эффекта в гибридных системах на основе топологического изолятора является изучение влияния гексагонального искажения решетки топологического изолятора на сверхпроводящий транспорт. Учет гексагональных искажений при исследовании невзаимного транспорта в некоторых топологических изоляторах может быть очень важным.

Целью данной работы является изучение механизма диодного эффекта в гибридных структурах на основе топологического изолятора, а также выявление параметров, влияющих на его эффективность диода и поиск способов повышения его эффективности для прикладной сверхпроводящей электроники и спинтроники.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Исследовать особенности сверхпроводящего состояния в структуре сверхпроводник/ ферромагнетик/ топологический изолятор, где сверхпроводимость и ферромагнетизм разделены в пространстве. В частности, изучить основное состояние сверхпроводника в такой системе на предмет реализации пространственно-модулированного параметра порядка
- Изучить условия возникновения сверхпроводящего диодного эффекта в гибридной сверхпроводник/ ферромагнетик/ топологический изолятор структуре, а также выявить параметры, контролирующие эффективность диодного эффекта.
- Получить аналитические выражения, связывающие эффективность диода с контролирующими параметрами.
- Исследовать влияние гексагонального искажения решетки топологического изолятора на сверхпроводящий транспорт в Джозефсоновском контакте сверхпроводник/ топологический изолятор/ сверхпроводник. В частности, изучить влияние гексагональных искажений на диодный эффект.

Основные результаты

Методы исследования

В качестве методов в диссертационном исследовании будет использован квазиклассический метод функций Грина для описания сверхпроводящих гибридных структур. Данный метод является микроскопическим и доказал свою надежность при исследовании многочисленных явлений в сверхпроводящих системах. Наряду с квазиклассическим формализм будет задействован формализм уравнений Боголюбова — Де Жена. Объектом исследования являются сверхпроводящие гибридные структуры. Предметом исследования является невзаимный сверхпроводящий транспорт

Положения выносимые на защиту

1. Основное состояние сверхпроводника является геликоидальным в структуре сверхпроводник/ ферромагнетик/ топологический изолятор с некоторыми особенностями. Параметр порядка модулируется в пространстве конечным импульсом q , при этом в системе присутствует неоднородное распределение сверхпроводящего тока с нулевым полным током. Знак импульса q зависит от направления обменного поля в ферромагнетике.
2. В системе сверхпроводник/ ферромагнетик/ топологический изолятор возникает невзаимный сверхпроводящий транспорт, то есть диодный эффект. Природа диодного эффекта объясняется магнитоэлектрическим эффектом, а также геликоидальным состоянием, реализующимся в гибридной структуре. Эффективность диодного эффекта контролируется параметрами системы (обменное поле ферромагнетика, ширина ферромагнитной и сверхпроводящей области) и эффекта близости. Эффективность в такой системе достигает нескольких процентов.
3. Джозефсоновский диодный эффект, возникающий в S/TI/S гибридной структуре при учете гексагональных искажений кристаллической решетки в топологическом изоляторе при определенных параметрах обладает существенной анизотропией. Показана возможность управления диодным эффектом за счет изменения плоскости пропускания тока через поверхность топологического изолятора.

Научная новизна:

- Продемонстрировано, что основное состояние сверхпроводника является геликоидальным в гибридной системе сверхпроводник/ ферромагнетик/ топологический изолятор. Продемонстрирована возможность реализации сверхпроводящего диода в такой структуре.

- Выявлены параметры, контролирующие сверхпроводящий диодный эффект, а также получены аналитические соотношения для эффективности диода в системе сверхпроводник/ ферромагнетик/ топологический изолятор.
- Продемонстрирована анизотропия диодного эффекта в сверхпроводящих гибридных структурах с топологическим изолятором в присутствии гексагональных искажений кристаллической решетки топологического изолятора. Благодаря анизотропии диодного эффекта, при определенных параметрах можно добиться существенного контроля над эффектом.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в расширении знаний о диодном эффекте в топологических гибридных структурах. Были выявлены параметры, а также характер влияния данных параметров на эффективность диодного эффекта. В частности, было выявлено влияние параметров эффекта близости на эффект. Построенные модели могут быть использованы для описания диодного эффекта в гибридных структурах, а также для его дальнейшего исследования. Более того, аналитические выражения полученные для описания эффективности диода дополняют знания о параметрах, влияющих на эффективность. В результате работы было получено сравнение линейных и нелинейных методов расчета невзаимности критического тока.

Практическая значимость

Результаты, полученные в ходе теоретического исследования, могут быть использованы для дальнейшего развития теории диодного эффекта в гибридных структурах, работающих на эффекте близости. Полученные зависимости диодной эффективности от различных параметров гибридной структуры могут быть полезны при описании экспериментальных данных.

Кроме того, они могут быть задействованы при проектировании сверхпроводящих диодов для достижения лучшей эффективности. Некоторые выводы, полученные в работе, например, анизотропия Джозефсоновского диодного эффекта, могут послужить поводом для экспериментального исследования.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается надежностью используемых методов. Кроме того, полученные результаты находятся в согласии с выводами работ других авторов, рассматривавших похожие системы.

Личный вклад автора

Автор диссертационной работы участвовал в формулировке задач, построении моделей для расчета, реализации численных алгоритмов решения уравнений, а также получении аналитических результатов. Также автор принимал участие в анализе и обсуждении результатов настоящей работы.

Апробация результатов

Результаты диссертационного исследования были представлены автором работы на конференциях международного уровня:

- XXVII международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника», Название, Нижний Новгород, 11-15 марта, 2023.
- 8th International Conference on Superconductivity and Magnetism- ICSM2023

Помимо выступлений на конференциях автором диссертационного исследования были доложены результаты на семинарах лаборатории, а также на семинарах в МФТИ и ФИАН им. П. Н. Лебедева.

Список опубликованных работ

1. Karabassov T., Bobkova I. V., Golubov A., Vasenko A. Hybrid helical state and superconducting diode effect in superconductor/ ferromagnet/ topological insulator heterostructures // *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*. 2022. Vol. 106. No. 22. Article 224509.
2. Karabassov T., Emir Amirov, Bobkova I. V., Golubov A., Kazakova E. A., Vasenko A. Superconducting Diode Effect in Topological Hybrid Structures // *Condensed Matter*. 2023. Vol. 8. No. 2. Article 36.
3. Karabassov T., Bobkova I. V., Silkin V. M., Lvov B. G., Golubov A., Vasenko A. Phase diagrams of the diode effect in superconducting heterostructures // *Physica Scripta*. 2024. Vol. 99. No. 1. Article 015010.
4. Karabassov T. Anisotropic Josephson Diode Effect in the Topological Hybrid Junctions with the Hexagonal Warping // *JETP Letters*. 2024. Vol. 119. No. 4. Article 308.

Заключение

Таким образом, можно выделить основные результаты, полученные в настоящем диссертационном исследовании.

- Проведен обзор текущего состояния вопроса в отношении механизмов возникновения сверхпроводящего диодного эффекта, а также экспериментальных работ, в которых продемонстрирована работа диода.
- Определены особенности, преимущества и недостатки существующих материалов и структур, обладающими свойством невзаимного сверхпроводящего транспорта. Одним из наиболее перспективных направлений является исследование и разработка диода на основе топологических изоляторов и ферромагнетизма.
- Предложена геометрия гибридной структуры сверхпроводящего диода сверхпроводник/ ферромагнетик/ топологический изолятор без внешнего магнитного поля. Построена квазиклассическая модель такой системы в диффузионном режиме.

- Показано, что в такой структуре реализуется геликоидальное состояние с некоторыми особенностями.
- Выявлены параметры, оказывающие влияние на эффективность диодного эффекта. Так, на диодный эффект оказывают влияние как геометрические параметры, так и параметры эффекта близости.
- Получены аналитические соотношения в предельном случае малого по ширине сверхпроводника. Выявлены ключевые факторы, контролирующие эффективность диода: размер ферромагнитной области, а также его обменное поле.
- Построены фазовые диаграммы, показывающие при каких параметрах диодный эффект достигает максимальных значений.
- В Джозефсоновском диоде сверхпроводник/ топологический изолятор/ сверхпроводник продемонстрирована существенная анизотропия диодного эффекта при учете гексагональных искажений кристаллической решетки топологического изолятора.
- На основе анизотропного Джозефсоновского диодного эффекта предложен управляемый сверхпроводящий диод.

Сверхпроводящий диодный эффект в гибридных структурах является перспективным направлением для исследований ввиду своего широкого потенциала применения. Диодный эффект в гибридных структурах сверхпроводник/ферромагнетик/ топологический изолятор позволяет реализовать управляемый диодный эффект с контролируемой эффективностью. Кроме того, рассмотренная система не требует приложения внешнего магнитного поля, что является существенным упрощением для практического применения. В диссертационном исследовании было показано, что задействуя различные параметры гибридной системы можно добиться лучшей диодной эффективности.

По итогам проделанной работы можно выделить направление дальнейших исследований. В частности, важным с точки зрения реализации в эксперименте является исследование влияния зазора между сверхпроводящей и ферромагнитной частями в планарной структуре сверхпроводник/ферромагнетик/ топологический изолятор, поскольку текущие технологические возможности не всегда позволяют реализовать идеальный интерфейс сверхпроводник/ферромагнетик. Кроме того, на базе данного исследования можно теоретически изучить возможность управления сверхпроводящего диода за счет приложения разности потенциалов, подобно затвору в полевом транзисторе. Такая система позволит управлять диодным эффектом без необходимости перемагничивания ферромагнитных областей.

Другим перспективным направлением для исследований является изучение динамических явлений в системах ферромагнетик/топологический сверхпроводник.

Список использованных источников

1. Preliminary demonstration of a persistent Josephson phase-slip memory cell with topological protection / Nadia Ligato, Elia Strambini, Federico Paolucci, Francesco Giazotto // *Nature communications*. — 2021. — Vol. 12, no. 1. — P. 5200.
2. Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box / Jens Koch, Terri M. Yu, Jay Gambetta et al. // *Phys. Rev. A*. — 2007. — Oct. — Vol. 76. — P. 042319.
3. Design and Demonstration of an 8-bit Bit-Serial RSFQ Microprocessor: CORE e4 / Yuki Ando, Ryo Sato, Masamitsu Tanaka et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2016. — Vol. 26, no. 5. — Pp. 1–5.
4. Adiabatic superconducting artificial neural network: Basic cells / Igor I Soloviev, Andrey E Schegolev, Nikolay V Klenov et al. // *Journal of applied physics*. — 2018. — Vol. 124, no. 15.

5. Linder, Jacob. Superconducting spintronics / Jacob Linder, Jason WA Robinson // *Nature Physics*. — 2015. — Vol. 11, no. 4. — Pp. 307–315.
6. Tagirov, L. R. Low-Field Superconducting Spin Switch Based on a Superconductor /Ferromagnet Multilayer / L. R. Tagirov // *Phys. Rev. Lett.* — 1999. — Sep. — Vol. 83. — Pp. 2058–2061. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.83.2058>.
7. Nadeem, Muhammad. The superconducting diode effect / Muham mad Nadeem, Michael S Fuhrer, Xiaolin Wang // *Nature Reviews Physics*. — 2023. — Vol. 5, no. 10. — Pp. 558–577.
8. Beyond Moore’s technologies: operation principles of a superconductor alternative / Igor I Soloviev, Nikolay V Klenov, Sergey V Bakurskiy et al. // *Beilstein journal of nanotechnology*. — 2017. — Vol. 8, no. 1. — Pp. 2689–2710.
9. Observation of superconducting diode effect / Fuyuki Ando, Yuta Miyasaka, Tian Li et al. // *Nature*. — 2020. — Vol. 584, no. 7821. — Pp. 373–376.
10. Nonreciprocal charge transport in topological superconductor candidate Bi₂Te₃/PdTe₂ heterostructure / Makoto Masuko, Minoru Kawamura, Ryutaro Yoshi mi et al. // *npj Quantum Materials*. — 2022. — Vol. 7, no. 1. — P. 104.
11. Nonreciprocal charge transport at topological insulator/superconductor interface / Kenji Yasuda, Hironori Yasuda, Tian Liang et al. // *Nature communications*. — 2019. — Vol. 10, no. 1. — P. 2734.
12. Bobkova, IV. Magnetoelectric effects in Josephson junctions / IV Bobkova, AM Bobkov, MA Silaev // *Journal of Physics: Condensed Matter*. — 2022. — Vol. 34, no. 35. — P. 353001.
13. Chiral symmetry breaking and the Josephson current in a ballistic superconductor–quantum wire–superconductor junction / Ilya V Krive,

- Leonid Y Gorelik, 8 Robert I Shekhter, Mats Jonson // *Low temperature physics*. — 2004. — Vol. 30, no. 5. — Pp. 398–404.
14. The field-free Josephson diode in a van der Waals heterostructure / Heng Wu, Yaojia Wang, Yuanfeng Xu et al. // *Nature*. — 2022. — Vol. 604, no. 7907. — Pp. 653–656.
 15. Field-free superconducting diode effect in noncentrosymmetric superconductor/ferromagnet multilayers / Hideki Narita, Jun Ishizuka, Ryo Kawarazaki et al. // *Nature Nanotechnology*. — 2022. — Vol. 17, no. 8. — Pp. 823–828.
 16. Edelstein, Victor M. Magnetoelectric effect in polar superconductors / Victor M Edelstein // *Physical review letters*. — 1995. — Vol. 75, no. 10. — P. 2004.
 17. Edelstein, Victor M. The Ginzburg-Landau equation for superconductors of polar symmetry / Victor M Edelstein // *Journal of Physics: Condensed Matter*. — 1996. — Vol. 8, no. 3. — P. 339.
 18. Scammell, Harley D. Theory of zero-field superconducting diode effect in twisted trilayer graphene / Harley D Scammell, JIA Li, Mathias S Scheurer // *2D Materials*. — 2022. — Vol. 9, no. 2. — P. 025027.
 19. Spin-dependent cooper pair phase and pure spin supercurrents in strongly polarized ferromagnets / R Grein, M Eschrig, G Metalidis, Gerd Schön // *Physical review letters*. — 2009. — Vol. 102, no. 22. — P. 227005.
 20. General theory of Josephson diodes / Yi Zhang, Yuhao Gu, Pengfei Li et al. // *Physical Review X*. — 2022. — Vol. 12, no. 4. — P. 041013.