

На правах рукописи



Швецов Олег Олегович

**Исследование транспорта в топологических полуметаллах
с наведенной сверхпроводимостью**

Специальность 1.3.8 —

Физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Черноголовка — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твёрдого тела имени Ю. А. Осипьяна Российской академии наук

Научный руководитель: **Девятков Эдуард Валентинович**
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Кунцевич Александр Юрьевич,**
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Панкратов Андрей Леонидович,
доктор физико-математических наук, Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет»

Защита состоится «17» мая 2022 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.136.01 (Д 002.100.02) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твёрдого тела им. Ю. А. Осипьяна Российской академии наук по адресу: 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твёрдого тела им. Ю. А. Осипьяна Российской академии наук и на сайте диссертационного совета: <http://www.issp.ac.ru/main/index.php/ru/dis-council.html>

Автореферат разослан «22» марта 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Курлов Владимир Николаевич



© Швецов О. О., 2022

© ИФТТ РАН, 2022

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Исследование новых топологических материалов является популярнейшей областью в современной физике конденсированного состояния. Первая теоретическая модель трехмерного топологического изолятора была сформулирована Волковым и Панкратовым в 1985 году [1], однако эта тематика оставалась в большей степени умозрительной до того момента, как в 2007 году произошла первая экспериментальная реализация режима спинового квантового эффекта Холла в двумерном топологическом изоляторе [2]. Это открытие значительно ускорило развитие этой области и привело к всплеску интереса и поиску новых топологических фаз материи. В последующие годы было открыто множество других топологически фаз в твердых телах.

Обширный интерес проявляется к новым системам, представляющим трехмерные топологические полуметаллы. Их общая особенность заключается в том, что в зонной структуре присутствуют точки (Дираковские или Вейлевские), в которых валентная зона касается зоны проводимости, и реализуется линейный закон дисперсии [3]. Такая ситуация напоминает электронный спектр графена или поверхностного (краевого) состояния топологического изолятора, однако, благодаря трехмерности топологических полуметаллов, они отличаются большей устойчивостью к возмущениям. Необычная зонная структура порождает множество новых физических феноменов, касающихся объемных свойств топологических полуметаллов. Среди них большая подвижность носителей, киральная аномалия магнетосопротивления, аномальный и нелинейный аномальный эффекты Холла, а также необычные оптические свойства [3].

Подобно топологическим изоляторам, трехмерные топологические полуметаллы обладают нетривиальными поверхностными свойствами, причем каждая из топологических фаз демонстрирует в этом отношении свою уникальность. К примеру, поверхностные состояния Вейлевских полуметаллов [3] – Ферми арки – представляют собой пару незамкнутых контуров на противоположных поверхностях кристалла, и их замыкание в единый контур происходит через объем. Каждый такой контур имеет выделенное направление групповой скорости носителей, из-за чего их часто ассоциируют с киральными краевыми состояниями в режиме квантового эффекта Холла. Более того, сильное спин-орбитальное взаимодействие приводит к корреляции спина и импульса носителей на поверхности и формированию спиновых текстур [4]. Кроме того, как и в случае топологических изоляторов, поверхностные состояния демонстрируют топологическую

защиту транспорта (подавленное рассеяние назад) [5].

Особого внимания заслуживает наведенная сверхпроводимость в топологических полуметаллах. Из-за высокой объемной проводимости ключевой проблемой для экспериментального изучения и потенциального практического применения данных материалов является невозможность прямым путем отделить вклад поверхностных состояний в зарядовый транспорт от объемной проводимости. В связи с этим, исследователи прибегают к косвенным методам, например, к изучению гетероструктур сверхпроводник – топологический полуметалл. Андреевское отражение [6], характеризующее электронный транспорт в таких гетероструктурах, позволяет выделить особенности, характерные для топологических поверхностных состояний. Так, к примеру, ранее был продемонстрирован вклад в Андреевское отражение от киральных Ферми арок на интерфейсе сверхпроводник – Вейлевский полуметалл WTe_2 [7]. Также является оправданным изучение гетероструктур сверхпроводник – топологический полуметалл – сверхпроводник со слабой связью [6]. Известно, что в таких гетероструктурах сверхпроводящий ток переносится в основном поверхностными состояниями, а их вклад в транспорт возможно выделить из зависимости критического тока от магнитного потока через слабую связь [7, 8, 9, 10]. Кроме всего прочего, топологические системы, обладающие сильным спин-орбитальным взаимодействием и топологической защитой транспорта, являются многообещающими кандидатами для реализации Майорановских фермионов [11].

Новейшими из синтезированных топологических материалов являются топологические полуметаллы с нарушенной симметрией по отношению к обращению времени [12]. Иными словами, в этих материалах существует магнитное упорядочение. Джозефсоновские переходы на основе магнитных топологических полуметаллов являются превосходной платформой для реализации нетривиальной сверхпроводимости благодаря сильному спин-орбитальному и обменному взаимодействию, а также особенностям топологической зонной структуры. Это можно видеть, например, по многообразию возможных механизмов спаривания электронов в зависимости от симметрий их волновых функций в магнитном Вейлевском полуметалле [13].

Целью данной работы является исследование свойств сверхпроводимости, индуцированной в топологических полуметаллах и их поверхностных состояниях в условиях эффекта вблизи со сверхпроводником.

Основными **задачами** являются создание гетероструктур на основе сверхпроводников и топологических полуметаллов и экспериментальное исследование зарядового транспорта в этих гетероструктурах при сверхнизких температурах.

турах.

В качестве **методов исследований** использовались транспортные методики, реализуемые при сверхнизких температурах (до 30 мК). Также, для магнетотранспортных измерений сильные магнитные поля (до 14 Т) создавались при помощи сверхпроводящего соленоида.

Научная и практическая значимость работы состоит следующем. Во-первых, исследование транспорта в топологических полуметаллах с наведенной сверхпроводимостью – это один из немногих возможных способов для экспериментального изучения вклада поверхностных состояний в транспорт заряда. Во-вторых, существует множество теоретических предпосылок для ожидания нетривиальных проявлений эффекта близости со сверхпроводником в топологических полуметаллах, например, наличие спин-триплетной сверхпроводимости и Майорановских состояний. Наконец, следует отметить потенциальную возможность приложений таких гетероструктур в квантовой вычислительной технике и спинтронике.

Научную новизну работы составляют следующие результаты, выносимые на защиту:

1. Для контакта между нормальным металлом (Au) и несверхпроводящим в объеме Дираковским полуметаллом Cd_3As_2 при низких температурах было обнаружено неомическое поведение дифференциального сопротивления $dV/dI(V)$, характерное для Андреевского отражения. Такое поведение было продемонстрировано для Au- Cd_3As_2 контактов, изготовленных различными методами. Его можно интерпретировать как поверхностную сверхпроводимость вблизи интерфейса с нормальным металлом. Предполагается, что за возникновение сверхпроводимости ответственно формирование плоской зоны на поверхности топологического полуметалла Cd_3As_2 . Такая физическая картина имеет под собой хороший теоретический фундамент. Вывод о том, что наблюдаемый эффект связан со сверхпроводимостью, подтверждается температурной и магнетополевой зависимостями $dV/dI(V)$.
2. Для контактов между сверхпроводником (Nb) и магнитным Вейлевским полуметаллом $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, помимо Андреевского отражения, был обнаружен ряд дополнительных особенностей в дифференциальном сигнале $dV/dI(V)$. Среди них наиболее интересная - аномалия нулевого напряжения (ZBA), которая демонстрирует выраженную стабильность по отношению ко внешнему магнитному полю вплоть до критического поля Nb. Были подробно исследованы температурные и магнетополевые зависимости особенностей

$dV/dI(V)$. В качестве возможной интерпретации было рассмотрено формирование низкоэнергетических Андреевских уровней на интерфейсе Nb-Co₃Sn₂S₂ при участии поверхностных состояний Вейлевского полуметалла.

3. Для латерального транспорта заряда между двумя разнесенными на 5 мкм сверхпроводящими In контактами к магнитному Вейлевскому полуметаллу Co₃Sn₂S₂ было обнаружено, что в неоднородно намагниченном образце возникает только Андреевское отражение на интерфейсах In-Co₃Sn₂S₂. После намагничивания образца до насыщения было обнаружено, что становится возможным протекание бездиссипативного Джозефсоновского тока, который демонстрирует необычные зависимости от температуры и внешнего магнитного поля. Мы связываем такое поведение с переносом большей части сверхпроводящего тока по топологическим поверхностным состояниям магнитного Вейлевского полуметалла Co₃Sn₂S₂.
4. Для латерального транспорта в 3 мкм Джозефсоновских переходах In-Fe₃GeTe₂-In, где Fe₃GeTe₂ является ферромагнитным топологическим полуметаллом с нодальной линией, был обнаружен эффект Джозефсона, демонстрирующий необычную зависимость критического тока от внешнего магнитного поля различных ориентаций. В целом, паттерны $I_c(B)$ асимметричны, но эта асимметрия зеркально отражается при перемагничивании образца. В дополнение, в перпендикулярном поле возникает смена минимума $I_c(B)$ на максимум при перемагничивании. Такое поведение не ожидается для обычного перехода сверхпроводник – ферромагнетик – сверхпроводник с однородно намагниченным барьером, но оно может возникнуть в Джозефсоновском спиновом вентиле. В исследуемых образцах Джозефсоновский спиновый вентиль возникает из-за различно ориентированных спиновых поляризованных состояний в ферромагнитном объеме образца и в топологических поверхностных состояниях полуметалла с нодальной линией Fe₃GeTe₂.

Степень достоверности и апробация работы.

В диссертационной работе представлены оригинальные результаты, полученные впервые. Результаты докладывались с последующим обсуждением на ученых советах и семинарах в ИФТТ РАН, а на нижеперечисленных конференциях:

1. Приглашенный устный доклад “Планарный эффект Джозефсона на поверхности магнитного Вейлевского полуметалла Co₃Sn₂S₂” на XXIV международном симпозиуме “Нанозелектроника и Нанозелектроника”, Нижний Новгород, март 2020

2. Приглашенный устный доклад “Перенос Джозефсоновского тока поверхностными состояниями топологических Вейлевских полуметаллов” на XXIII Уральской международной зимней школе по физике полупроводников, Екатеринбург-Алапаевск, Россия, февраль 2020
3. Приглашенный устный доклад “Перенос Джозефсоновского тока поверхностными состояниями топологических Вейлевских полуметаллов” на II Конференции “Квантовые материалы на нанометровой шкале”, Москва, ноябрь 2020
4. Устный доклад “Surface superconductivity in a 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 at the interface with a gold contact” на Interaction between Radiation and Quantum matter, Moscow, July 2019
5. Устный доклад “Латеральный эффект Джозефсона на поверхности магнитного Вейлевского полуметалла $Co_3Sn_2S_2$ ” на 64 Всероссийской научной конференции МФТИ, Черноголовка, декабрь 2021

Личный вклад автора. Представленные результаты были получены лично автором диссертационной работы. Соискатель принимал активное участие в постановках задач и выборе методологических подходов, изготовлении образцов в чистой комнате, проведении измерений, обработке и интерпретации полученных результатов, а также в подготовке и написании статей.

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в 4 статьях, опубликованных в зарубежных и российских научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ [A1, A2, A3, A4].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и библиографии. Полный объем диссертации составляет 93 страницы, на которых представлено 35 рисунков. Список литературы содержит 134 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обсуждается актуальность темы исследований, формулируются цели и задачи, обосновывается научная новизна и практическая значимость работы, а также рассматриваются методы исследования. Приводятся основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов и личном вкладе автора.

Первая глава представляет собой обзор научной литературы по теме диссертационной работы. В первом разделе иллюстрируется применение топологического подхода в решении задач механики. Во втором разделе рассматриваются зонная инверсия и возникновение топологических поверхностных состояний в топологических изоляторах. В третьем разделе рассматриваются топологические полуметаллы и их классификация в зависимости от зонной структуры. В четвёртом разделе приводятся сведения о типах поверхностных состояний различных классов топологических полуметаллов и об их физических свойствах. В пятом разделе описано Андреевское отражение на интерфейсе между нормальным металлом и сверхпроводником. В шестом разделе рассматриваются Андреевские связанные состояния и демонстрируется, как они приводят к возникновению Джозефсоновского сверхтока. В седьмой разделе описаны Джозефсоновские переходы во внешнем магнитном поле. Восьмой раздел посвящен краткому описанию нетривиальных проявлений эффекта близости в топологических полуметаллах.

Во второй главе описывается методика эксперимента.

Первый раздел посвящен процедуре изготовления образцов. В качестве исследуемых топологических материалов были выбраны Дираковский полуметалл Cd_3As_2 , Вейлевский полуметалл $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ и топологический полуметалл с нодальной (узловой) линией Fe_3GeTe_2 . Монокристаллы данных материалов были выращены в лаборатории Физико-химических основ кристаллизации ИФТТ РАН под руководством Н. Н. Колесникова. В разделе описывается процедура оптической литографии с последующим термическим напылением металлов, с помощью чего формировались матрицы контактов на изолирующей Si/SiO_2 подложке. Далее, описана процедура механической эксфолиации тонких чешуек (1 мкм толщина и 100 мкм латеральный размер) топологических полуметаллов с последующим прижимом этих чешуек на контактные дорожки, что позволяло формировать омические контакты хорошего качества.

Во втором разделе описывается измерительная техника. В исследованиях использовались трех или четырех точечные схемы с задачей тока I и одновременным измерением постоянного напряжения V и дифференциального сопротивления dV/dI .

В третьем разделе описывается криогенная техника, используемая для работы при сверхнизких температурах и сильных магнитных полях. Большая часть измерений была выполнена в криостате растворения (30 мК), оснащённом сверхпроводящим соленоидом (14 Т). В разделе кратко описан принцип работы криостата растворения и некоторые особенности работы со сверхпрово-

дядим соленоидом.

Третья глава посвящена обнаружению и исследованию поверхностной сверхпроводимости в Дираковском полуметалле Cd_3As_2 на интерфейсе с нормальным металлом.

Первый раздел содержит описание известных на данный момент свойств Cd_3As_2 как Дираковского полуметалла и эффектов, связанных с наведенной и приконтактной сверхпроводимостью в нем.

Во втором разделе описываются образцы и измерительная техника. Образцы представляют собой тонкие монокристаллические чешуйки Cd_3As_2 , прижатые на подложку с предварительно сформированной матрицей нормальных (Au) контактов. Кроме того, для сравнения был выполнен и другой тип образцов, для которых нормальные контакты формировались поверх большого шлифованного монокристалла Cd_3As_2 . Основной схемой измерений служила трехточечная схема с задачей тока и измерением напряжения и дифференциального сопротивления, что позволяет исследовать транспортные характеристики Au- Cd_3As_2 контакта.

Третий раздел посвящен экспериментальным результатам.

Примеры низкотемпературных ($T = 60$ мК) кривых зависимостей $dV/dI(V)$ для различных Au- Cd_3As_2 контактов показаны на Рисунке 1. Кривые $dV/dI(V)$ чувствительны к параметрам и качеству интерфейса, что обуславливает различие между кривыми в (a) и (b).

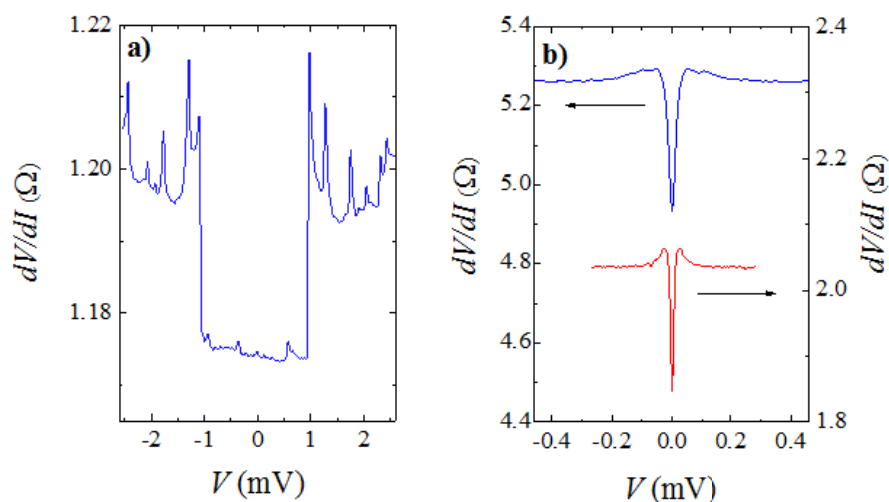


Рис. 1: Примеры $dV/dI(V)$ зависимостей для различных Au- Cd_3As_2 контактов при $T = 60$ мК. Наблюдается провал примерно на 10%. Результат воспроизводится для разных образцов.

Основное экспериментальное наблюдение заключается в том, что $dV/dI(V)$

одиночного Au-Cd₃As₂ контакта демонстрируют неомическое поведение, которое выражается в уменьшении сопротивления примерно на 10% в области малых напряжений. Это поведение воспроизводится для различных образцов, в том числе для образцов с разной техникой изготовления золотых контактов. Эффект сильно напоминает Андреевское отражение [6], характерное для контактов между сверхпроводниками и обычными металлами или полупроводниками. Это подтверждается поведением кривых при повышении температуры или внешнего магнитного поля.

Пример подавления провала при повышении температуры представлен на Рисунке 2(a). Такое поведение качественно напоминает сверхпроводящую щель [6].

Подавление также происходит в магнитном поле. На Рисунке 2(b) изображено подавление провала в перпендикулярном магнитном поле при $T = 60$ мК. На вставке треугольниками обозначена зависимость ширины провала от поля для образца с основной панели, а ромбы и кружки соответствуют другому образцу в перпендикулярной и параллельной ориентациях поля.

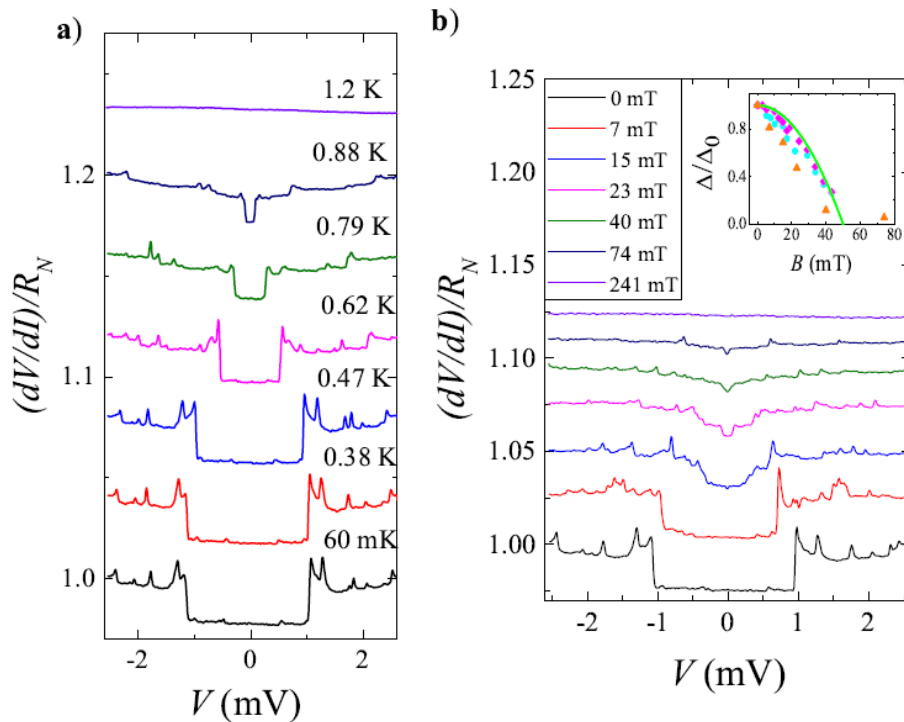


Рис. 2: (a) Подавление провала в $dV/dI(V)$ с ростом температуры. (b) Подавление провала в $dV/dI(V)$ в перпендикулярном внешнем магнитном поле при $T = 60$ мК. Вставка: треугольниками обозначена зависимость ширины провала от поля для образца с основной панели, а ромбы и кружки соответствуют другому образцу в перпендикулярной и параллельной ориентациях поля. Щель нормирована на свое значение в нулевом поле.

Для контакта из Рисунка 1(a) критические значения температуры и поля составляют $T_c = 1$ К и $B_c = 100$ мТ, соответственно. Для контактов из Рисунка 1(b) $T_c = 0.3$ К и $B_c = 26$ мТ. Таким образом, величины критических полей

и температур коррелируют между собой и с шириной наблюдаемого провала в $dV/dI(V)$, что также свидетельствует в пользу сверхпроводимости.

В разделе четыре произведено обсуждение полученных экспериментальных результатов. Следует отметить, что так как наблюдаемый эффект не зависит от способа изготовления контактов, возникновение сверхпроводимости должно быть обусловлено внутренними свойствами топологического полуметалла Cd_3As_2 . Основным предположением о причине возникновения сверхпроводимости является наличие плоской зоны на поверхности Cd_3As_2 . Дираковский полуметалл находится близко к границе раздела различных топологических фаз [14], поэтому может существовать механизм возникновения плоских зон, аналогичный предсказанному для полуметаллов с нодальной линией [15]. Такое объяснение выглядит особенно привлекательным при учете недавнего открытия сверхпроводимости в поликристаллических пленках Cd_3As_2 [16].

Пятый раздел содержит заключение к данному исследованию.

Третья глава посвящена исследованию Андреевского отражения в транспорте через контакт между сверхпроводником и магнитным Вейлевским полуметаллом $Co_3Sn_2S_2$.

Первый раздел содержит описание и перспективы исследования известных и теоретически предсказанных на данный момент свойств $Co_3Sn_2S_2$ как Вейлевского полуметалла и эффектов, связанных с наведенной сверхпроводимостью в нем.

Во втором разделе описываются образцы и измерительная техника. Образцы представляют собой тонкие монокристаллические чешуйки $Co_3Sn_2S_2$, прижатые на подложку с предварительно сформированной матрицей сверхпроводящих (Nb) контактов. Основной измерительной схемой служила трехточечная схема с задачей тока и измерением напряжения и дифференциального сопротивления, что позволяет исследовать транспортные характеристики одиночного контакта в режиме Андреевского отражения. Магнетотранспортные измерения подтвердили наличие аномального эффекта Холла с легкой магнитной осью перпендикулярно плоскости чешуйки и полем насыщения около 0.5 Т, что согласуется с данными из литературы [17].

Третий раздел посвящен экспериментальным результатам.

Голубая кривая на Рисунке 3 показывает дифференциальный сигнал $dV/dI(V)$, полученный с одиночного контакта Nb- $Co_3Sn_2S_2$ при низкой температуре 30 мК. В целом, поведение кривой соответствует Андреевскому отражению [6]: мы на-

блюдаем сверхпроводящую щель ниобия как провал в $dV/dI(V)$. Щель Δ отмечена голубыми штриховыми линиями. Значение $\Delta = 0.9$ мэВ соответствует сверхпроводящей щели ниобия, уменьшенной на 40% из-за близости с ферромагнитным $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ по сравнению с щелью в чистом ниобии $\Delta_{\text{Nb}} = 1.5$ мэВ.

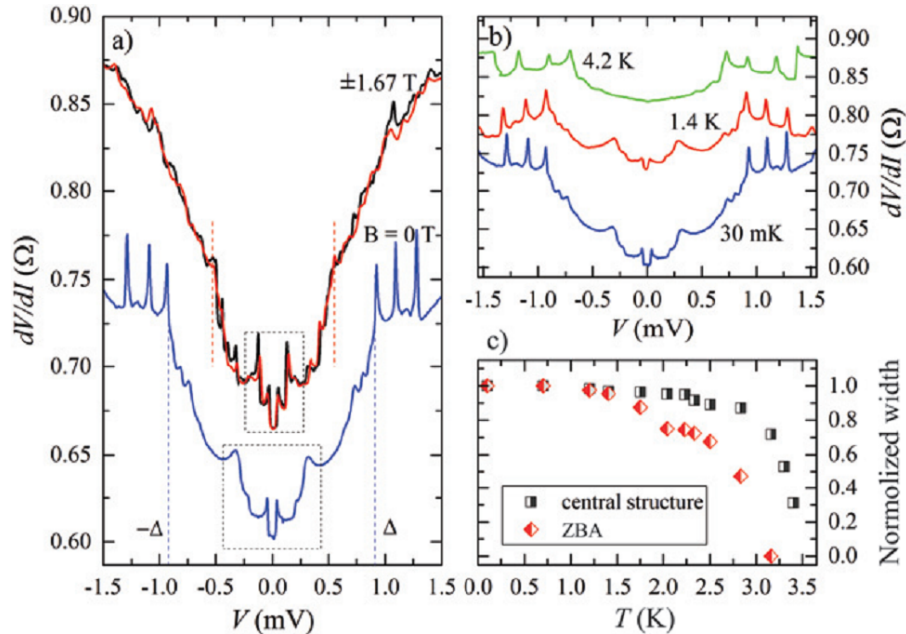


Рис. 3: (a) $dV/dI(V)$ характеристики одного из $\text{Nb-Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ контактов при температуре 30 мК. Внешнее магнитное поле перпендикулярно плоскости образца. Оно равно 0 для голубой кривой, и равно ± 1.67 Т для черной и красной кривых. Сверхпроводящая щель, выделенная штриховой линией, подавляется магнитным полем, в то время как ZBA, напротив, имеет постоянную ширину. (b) $dV/dI(V)$ того же контакта при различных температурах. ZBA чувствительна к повышению температуры и исчезает к 3.5 К. (c) Зависимость ширины ZBA и широкой внутрищелевой особенности (выделена прямоугольником в (a)) от температуры.

Наиболее нетривиальный результат - аномалия нулевого напряжения (в англоязычной литературе принята аббревиатура ZBA - zero-bias anomaly), которая проявляется как узкий (± 0.06 мВ) провал в $dV/dI(V)$. Черная и красная кривые на Рисунке 3(a) демонстрируют, что ширина ZBA показывает устойчивость по отношению к внешнему магнитному полю, в отличие от сверхпроводящей щели, которая, ожидаемо, уменьшается с ростом поля, как и остальные внутрищелевые особенности. Это поведение не зависит от знака магнитного поля, что показано сравнением черной (+1.67 Т) и красной (-1.67 Т) кривых на Рисунке 3(a). В отличие от поля, повышение температуры оказывает влияние на ZBA: она сжимается и исчезает к 3.5 К, в то время как сверхпроводящая щель все еще наблюдается (Рисунке 3(b)).

Цветные графики на Рисунке 4(a,b) демонстрируют стабильность ZBA по отношению ко внешнему магнитному полю при двух различных температурах 30 мК и 1.4 К. При обеих температурах ширина ZBA остается постоянной при повышении поля, в то время как ее высота испытывает слабое (5%) немонотон-

ное изменение. Подавление ZBA начинается только вблизи критического поля ниобия: после 3.3 Т при 30 мК и после 2.2 Т при 1.4 К (Рисунок 4(a,b)).

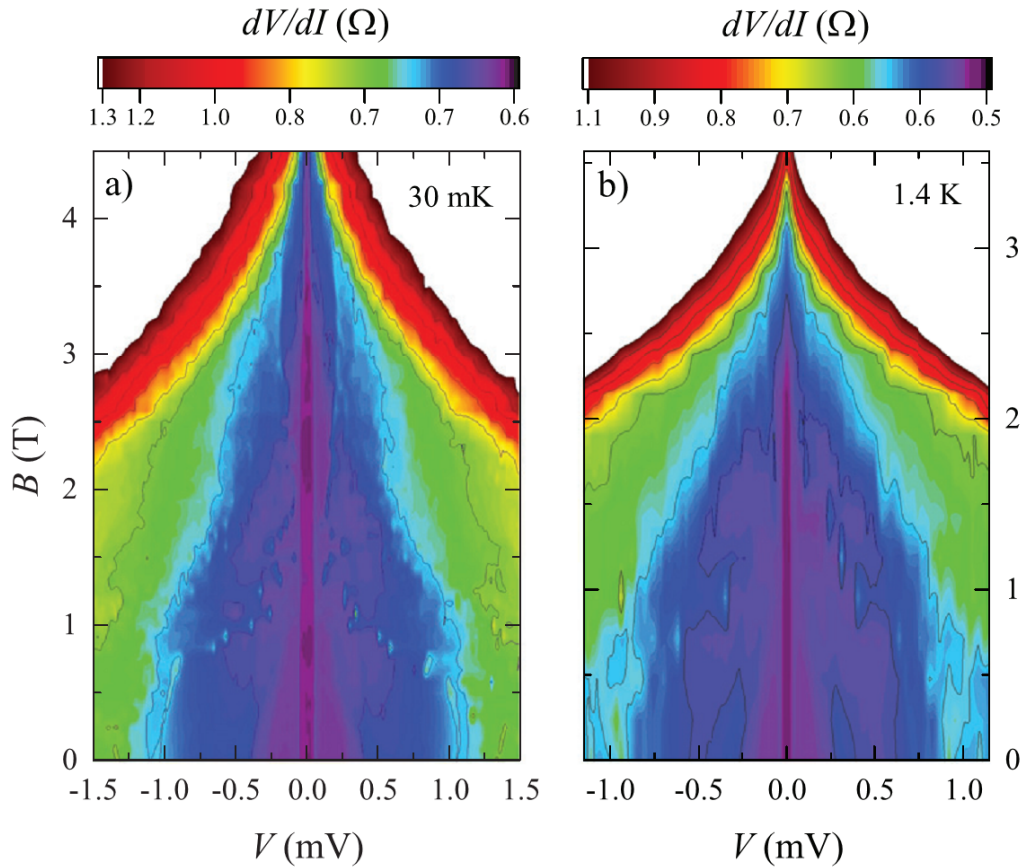


Рис. 4: (a,b) Изменение $dV/dI(V)$ в зависимости от магнитного поля для контакта Nb-Co₃Sn₂S₂ при температурах 30 мК и 1.4 К. Для обеих температур наблюдается ZBA, ширина которой стабильна по отношению к магнитному полю. Она уменьшается только вблизи критического поля Nb.

В четвертом разделе приводится обсуждение экспериментальных результатов.

Аномалии нулевого напряжения (ZBA) обширно исследовались последние годы в контексте поиска Майорановских фермионов в полупроводниковых нанопроводах с наведенной сверхпроводимостью и сильным спин-орбитальным взаимодействием [11]. Так как поверхностные состояния Вейлевского полуметалла киральные (т.е. имеют выделенное направление групповой скорости) и обладают сильным спин-орбитальным взаимодействием [3], транспорт в них аналогичен транспорту в полупроводниковых нанопроводах, и для них релевантна та же физика.

Андреевские уровни в одномерных системах с сильным спин-орбитальным взаимодействием схлопываются в один низкоэнергетический Андреевский уровень, если к системе приложено внешнее магнитное поле [11]. В транспорте это выражается как устойчивая к дальнейшему увеличению внешнего поля анома-

лия ZBA, аналогичная той, что мы наблюдали в Андреевском транспорте через Nb-Co₃Sn₂S₂ контакт. В нашем случае внешнего поля изначально не требуется, так как его роль выполняет сильное обменное взаимодействие в ферромагнитном Вейлевском полуметалле Co₃Sn₂S₂ [17].

Пятый раздел содержит заключение к данной главе.

Пятая глава посвящена исследованию эффекту Джозефсона в длинных (5 мкм) латеральных переходах на основе магнитного Вейлевского полуметалла Co₃Sn₂S₂.

В первом разделе обсуждается перспективность исследования Джозефсоновских переходов на основе топологического Вейлевского полуметалла.

Во втором разделе описываются образцы и измерительная техника. Образцы представляют собой тонкие монокристаллические чешуйки Co₃Sn₂S₂, прижатые на подложку с предварительно сформированной матрицей сверхпроводящих (In) контактов. Основной измерительной схемой служила четырехточечная схема с задачей тока и измерением напряжения и дифференциального сопротивления между соседними контактами, что позволяет исследовать транспортные характеристики Джозефсоновских переходов.

Третий раздел посвящен экспериментальным результатам.

Примеры кривых $dV/dI(I)$ для In-Co₃Sn₂S₂-In перехода при температуре 40 мК показаны на Рисунке 5(a) до и после намагничивания, соответственно, для одного и того же образца в том же охлаждении. До намагничивания (синяя кривая) дифференциальное сопротивление конечно и испытывает провал в диапазоне токов ± 0.075 мА, что соответствует значению сверхпроводящей щели $\Delta = 0.25$ мэВ. После намагничивания реализуется состояние с нулевым сопротивлением (зеленая кривая) с значением критического тока 0.026 мА.

Зависимости критического тока от температуры и магнитного поля представлены на вставках к Рисунку 5. $I_c(T)$ демонстрирует слабую температурную зависимость вплоть до 0.75 К и падает вдвое при максимальной температуре 1.2 К. Экстраполяция $I_c(T)$ в большие температуры дает оценку критической температуры 2 К. $I_c(T)$ не показывает экспоненциальной зависимости, характерной для длинных SNS переходов [18].

Состояние с нулевым сопротивлением при $I = 0$ можно подавить внешним магнитным полем ± 7 мТ (Рисунок 5(b)). Зависимость критического тока от поля $I_c(B)$ представлена на вставке к Рисунку 5(b). При низкой температуре $I_c(B)$ является несимметричной зависимостью со слабым изменением вплоть

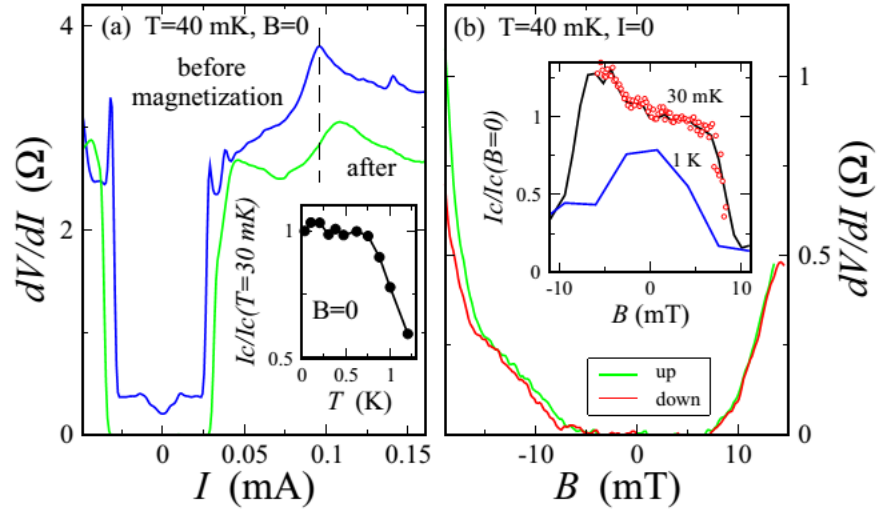


Рис. 5: (a) Сравнение кривых $dV/dI(I)$ до (синяя) и после (зеленая) намагничивания. Состояние с нулевым сопротивлением возникает только после намагничивания. Вставка демонстрирует зависимость критического тока от температуры. (b) Подавление эффекта Джозефсона во внешнем магнитном поле при разном направлении развертки поля. Вставка демонстрирует зависимость критического тока от магнитного поля для двух различных температур. При 40 мК $I_c(B)$ ведет себя асимметрично, критическое поле равно ± 7 мТ. Красные кружки показывают шаг по полю при снятии зависимости, их размер характеризует стандартное отклонение значений I_c . Симметричность восстанавливается при повышении температуры более 1 К. Магнитное поле перпендикулярно плоскости образца.

до критического поля ± 7 мТ. Несимметричность ослабевает с повышением температуры (черная кривая при 1 К).

Четвертый раздел содержит объяснение результатов.

Транспорт по топологическому поверхностному состоянию, вероятно, является ключевым пунктом для объяснения экспериментальных результатов. В случае $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ наличие Ферми арок было напрямую подтверждено сканирующей туннельной спектроскопией [19]. Гигантский аномальный эффект Холла также связывают с поверхностными состояниями [3], и в нашем случае эффект Джозефсона достигается только в состоянии с определенной намагниченностью. Важная роль Ферми арок в переносе сверхтока также подкрепляется их топологической защитой и латеральной геометрией образцов.

Так как эффект Джозефсона достигается только в состоянии с однородной намагниченностью, структура магнитных доменов в чешуйке $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ может иметь значительное влияние на свойства перехода. Характерный латеральный размер доменов в $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ составляет около микрона [20], так что на длине перехода может уместиться несколько доменных стенок. В противоположно намагниченных доменах киральность Вейлевских точек также имеет противоположный знак [3], следовательно, непрерывное поверхностное состояние может существовать только внутри одного домена. Смена киральности при переходе

через доменную стенку приводит к частым процессам рассеяния с переворотом спина, что устраняет топологическую защиту транспорта в поверхностном состоянии и препятствует возникновению эффекта Джозефсона. В связи с этим, в неоднородно намагниченном состоянии (сразу после охлаждения в нулевом поле) наблюдается только Андреевское отражение с конечным сопротивлением. Когда образец намагничен однородно, напротив, киральность поверхностного состояния, несущего ток, не меняется на протяжении всего перехода, и мы наблюдаем эффект Джозефсона.

Так как Ферми арки имеют спиновую поляризацию [3], и объем ферромагнитного $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ также сильно поляризован [21], можно ожидать, что сверхток, протекающий на большой длине 5 мкм, имеет триплетную спиновую симметрию [22]. Реализация триплетного спаривания также подкрепляется асимметричной зависимостью критического тока от магнитного поля $I_c(B)$ (Рисунок 5(b)), характерной для спин-зависимого транспорта [23]. В общем случае, спин-поляризованный сверхток в магнитном Вейлевском полуметалле может переноситься одновременно поверхностным и объемным проводящими состояниями [13].

Пятый раздел содержит заключение к данной главе.

Шестая глава посвящена исследованию эффекту Джозефсона в длинных (3 мкм) латеральных переходах на основе магнитного полуметалла с нодальной линией Fe_3GeTe_2 (FGT).

В первом разделе обсуждаются физические свойства ферромагнитного топологического полуметалла FGT, описываются Джозефсоновские спиновые вентили и возможность их реализации в Джозефсоновских переходах на основе топологических полуметаллов.

Во втором разделе описываются образцы и измерительная техника. Образцы представляют собой тонкие монокристаллические чешуйки FGT, прижатые на подложку с предварительно сформированной матрицей сверхпроводящих (In) контактов. Основной измерительной схемой служила четырехточечная схема с задачей тока и измерением напряжения и дифференциального сопротивления между соседними контактами, что позволяет исследовать транспортные характеристики Джозефсоновских переходов. В дополнение, для характеристики образцов были проведены магнетотранспортные измерения. Они подтвердили наличие аномального эффекта Холла с легкой магнитной осью перпендикулярно плоскости чешуйки [12]. Кроме того, мы наблюдали планарный эффект Холла и немонотонное продольное магнетосопротивление в параллельном по-

ле [24].

Третий раздел посвящен экспериментальным результатам.

Рисунок 6 демонстрирует эффект Джозефсона для двух различных образцов S1 и S2 (синие кривые). Качественное поведение схоже, хотя значение критических токов I_c отличаются ($I_c = 0.17$ мА (S1) и $I_c = 0.018$ мА (S2)). Как и ожидалось, состояние нулевого сопротивления возникает при температурах ниже критической, которые чуть ниже 0.88 К и 0.34 К для образцов S1 и S2 (красные кривые).

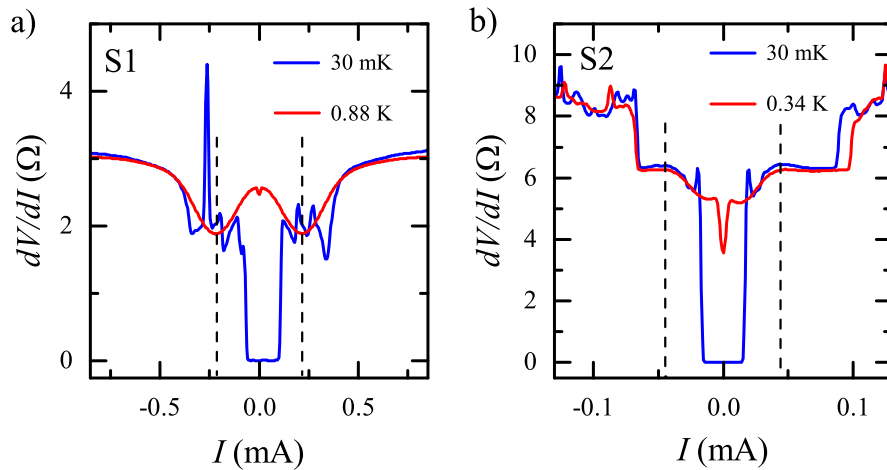


Рис. 6: Эффект Джозефсона для двух разных In-Fe₃GeTe₂-In переходов (образцы S1 и S2). Синие кривые получены при минимальной температуре 30 мК, красные - при температуре чуть выше критической, 0.88 К и 0.34 К соответственно. Штриховые линии обозначают сверхпроводящую щель.

На Рисунке 7 изображены цветные графики зависимости $dV/dI(B, I)$. Направление развертки поля указано сверху словами up (из - в +) или down (из + в -). S1 исследовался в параллельной ориентации поля (a,b), S2 – в перпендикулярной (c,d). Кривые асимметричны, но эта асимметрия зеркально отражается при смене направления развертки.

Черные области на Рисунке 7 соответствуют состоянию с нулевым сопротивлением. Эти области выделены белой линией, которая представляет собой зависимость критического тока от поля $I_c(B)$. В параллельной ориентации $I_c(B)$ демонстрирует зеркально отражающуюся асимметрию, однако кривая дополнительно сопровождается частыми аperiодическими флуктуациями. В перпендикулярной ориентации магнитного поля, напротив, флуктуации не наблюдались. Что наиболее удивительно, кривые для развертки вверх и вниз испытывают качественное изменение, которое проявляется в том, что минимум $I_c(B)$ в 12 мТ переходит в максимум в -12 мТ.

В четвертом разделе содержится обсуждение полученных результатов.

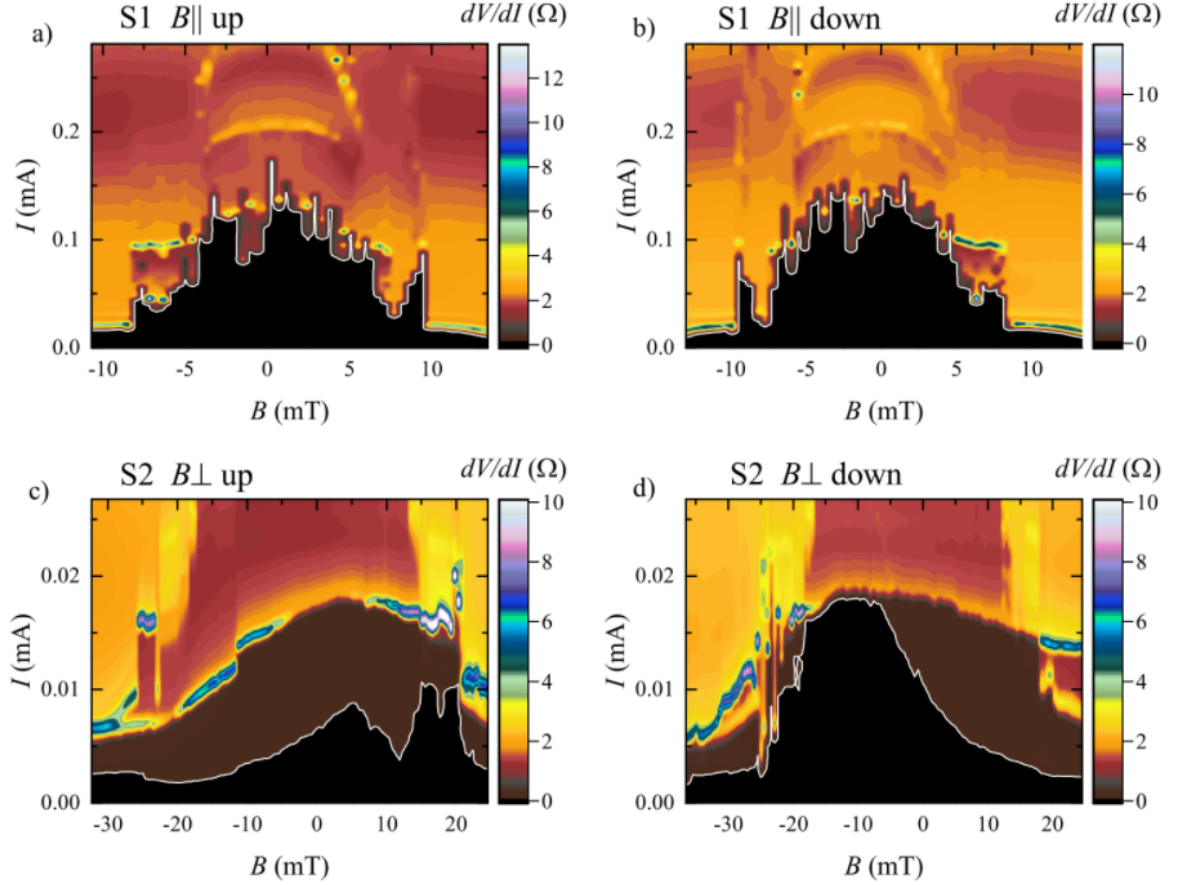


Рис. 7: Цветные графики $dV/dI(I, B)$ для образцов S1 и S2 в параллельной и перпендикулярной ориентациях внешнего магнитного поля, соответственно. (a) и (b), или (c) и (d) отличаются направлением развертки магнитного поля. Черные области на цветных графиках соответствуют состоянию с нулевым сопротивлением. Эти области выделены белой линией, которая представляет собой зависимость критического тока от магнитного поля $I_c(B)$.

Мы обнаружили асимметричные по магнитному полю $I_c(B)$ паттерны. Асимметрия зеркально отражается при смене знака развертки. Этот эффект наблюдается для обеих ориентаций поля, однако в перпендикулярном поле $I_c(B)$ дополнительно испытывает качественные изменения при перемагничивании: минимум $I_c(B)$ в отражается в максимум.

Магнитные топологические полуметаллы могут иметь транспортные свойства, характерные для спиновых вентилях [25, 26], где спин-поляризованное поверхностное состояние играет роль тонкого магнитного слоя, а намагниченный объем выступает в роли толстого слоя спинового вентиля. В случае Fe_3GeTe_2 , присутствие спин-поляризованных топологических поверхностных состояний было визуализировано при помощи ARPES [12].

С другой стороны, асимметричные $I_c(B)$ паттерны характерны для Джозефсоновских спиновых вентилях [27] (это Джозефсоновские переходы, в которых роль барьера выполняет спиновый вентиль). В Джозефсоновском спиновом вентиле амплитуда критического тока определяется в основном относительной

магнитной ориентацией слоев, в то время как в обычных переходах Джозефсона она модулируется магнитным потоком [6]. Намагниченность слоев в спиновом вентиле испытывает гистерезис, что и приводит к асимметрии $I_c(B)$ и ее зеркальному перевороту при перемагничивании.

Очень необычной является смена минимума $I_c(B)$ на максимум при перемагничивании в перпендикулярном поле (Рисунок 7(c,d)). Такое поведение требует нарушения определенных симметрий. Для Fe_3GeTe_2 возможно нарушение симметрии пространственной инверсии на интерфейсе [28]. Отсутствие центра инверсии в системах с сильным спин-орбитальным взаимодействием способно привести к тому, что возникнет нечетный по намагниченности вклад в спиновую поляризацию [29], что и приводит к нарушению зеркального отражения паттерна $I_c(B)$ при смене знака развертки магнитного поля.

Пятый раздел содержит заключение к данной главе.

В заключении сформулированы основные результаты данной работы, которые заключаются в следующем:

1. На интерфейсе между нормальным металлом (Au) и Дираковским топологическим полуметаллом Cd_3As_2 было обнаружено Андреевское отражение. Такое поведение было продемонстрировано для Au- Cd_3As_2 контактов, изготовленных различными методами. Его можно интерпретировать как поверхностную сверхпроводимость вблизи интерфейса с нормальным металлом. Предполагается, что за возникновение сверхпроводимости ответственно формирование плоской зоны на поверхности топологического полуметалла Cd_3As_2 .
2. Для одиночного Андреевского контакта к Вейлевскому полуметаллу Nb- $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ была обнаружена аномалия нулевого напряжения (ZBA), которая демонстрирует выраженную стабильность по отношению ко внешнему магнитному полю вплоть до критического поля Nb. В качестве возможной интерпретации было рассмотрено формирование Андреевских уровней на интерфейсе Nb- $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ при участии поверхностных состояний Вейлевского полуметалла.
3. Для 5 мкм In- $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ -In контактов было обнаружено, что в неоднородно намагниченном образце возникает только Андреевское отражение на интерфейсах In- $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, однако после перемагничивания образца до насыщения становится возможным протекание бездиссипативного Джозефсоновского тока, который демонстрирует необычные зависимости от температуры и внешнего магнитного поля. Мы связываем такое поведение с переносом до-

минирующей части сверхпроводящего тока по топологическим поверхностным состояниям магнитного Вейлевского полуметалла $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$.

4. Для латерального транспорта в 3 мкм Джозефсоновских переходах $\text{In-Fe}_3\text{GeTe}_2\text{-In}$, где Fe_3GeTe_2 является собой ферромагнитный топологический полуметалл с нодальной линией, был обнаружен эффект Джозефсона, демонстрирующий необычную зависимость критического тока от внешнего магнитного поля различных ориентаций. В целом, паттерны $I_c(B)$ асимметричны, но эта асимметрия зеркально отражается при перемагничивании образца. В дополнение, в перпендикулярном поле возникает смена минимума $I_c(B)$ на максимум при перемагничивании. Такое поведение характерно для Джозефсоновских спиновых вентилях. Наиболее вероятный сценарий для реализации Джозефсоновского спинового вентиля связан с различно ориентированным спиновым поляризациям ферромагнитного объема и топологического поверхностного состояния полуметалла с нодальной линией Fe_3GeTe_2 .

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Surface superconductivity in a three-dimensional Cd_3As_2 semimetal at the interface with a gold contact / O. O. Shvetsov, V. D. Esin, A. V. Timonina [et al.] // Phys. Rev. B. — 2019. — Vol. 99, Iss. 12. — P. 125305.
- A2. Magnetically stable zero-bias anomaly in Andreev contact to the magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ / O. O. Shvetsov, Yu. S. Barash, S. V. Egorov [et al.] // EPL. — 2020. — Vol. 132, Iss. 6. — P. 67002.
- A3. Lateral Josephson effect on the surface of the magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ / O. O. Shvetsov, V. D. Esin, Yu. S. Barash [et al.] // Phys. Rev. B. — 2020. — Vol. 101, Iss. 3. — P. 035304.
- A4. Josephson spin-valve realization in the magnetic nodal-line topological semimetal Fe_3GeTe_2 / O. O. Shvetsov, Yu. S. Barash, A. V. Timonina [et al.] // Pis'ma v ZhETF. — 2022. — Vol. 115, Iss. 5. — P. 304.

Список литературы

1. Volkov, B. A. Two-dimensional massless electrons in an inverted contact / B. A. Volkov, O. A. Pankratov // Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. — 1985. — Vol. 42, Iss. 4. — P. 145–148.
2. Quantum Spin Hall Insulator State in HgTe Quantum Wells / M. König, S. Wiedmann, C. Brüne [et al.] // Science. — 2007. — Vol. 318, Iss. 5851. — P. 766–770.
3. Armitage, N. P. Weyl and Dirac semimetals in three-dimensional solids / N. P. Armitage, E. J. Mele, A. Vishwanath // Rev. Mod. Phys. — 2018. — Vol. 90, Iss. 1. — P. 015001.
4. Okugawa, R. Dispersion of Fermi arcs in Weyl semimetals and their evolutions to Dirac cones / R. Okugawa, S. Murakami // Phys. Rev. B. — 2014. — Vol. 89, Iss. 23. — P. 235315.
5. Hasan, M. Z. Colloquium: Topological insulators / M. Z. Hasan, C. L. Kane // Rev. Mod. Phys. — 2010. — Vol. 82, Iss. 4. — P. 3045–3067.
6. Tinkham, M. Introduction to Superconductivity / Michael Tinkham. — 2 edition. — New York : Dover Publications, 2004. — ISBN: 0486435032.

7. Signature of Fermi arc surface states in Andreev reflection at the WTe₂ Weyl semimetal surface / A. Kononov, O. O. Shvetsov, S. V. Egorov [et al.] // EPL. — 2018. — Vol. 122, Iss. 2. — P. 27004.
8. Local and Nonlocal Fraunhofer-like Pattern from an Edge-Stepped Topological Surface Josephson Current Distribution / J. H. Lee, G.-H. Lee, J. Park [et al.] // Nano Lett. — 2014. — Vol. 14, Iss. 9. — P. 5029–5034.
9. Proximity-induced surface superconductivity in Dirac semimetal Cd₃As₂ / C. Huang, B. T. Zhou, H. Zhang [et al.] // Nat. Commun. — 2019. — Vol. 10, Iss. 1. — P. 2217.
10. Reducing Electronic Transport Dimension to Topological Hinge States by Increasing Geometry Size of Dirac Semimetal Josephson Junctions / C.-Z. Li, A.-Q. Wang, C. Li [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Vol. 124, Iss. 15. — P. 156601.
11. Pan, H. Physical mechanisms for zero-bias conductance peaks in Majorana nanowires / H. Pan, S. Das Sarma // Phys. Rev. Research. — 2020. — Vol. 2, Iss. 1 — P. 013377.
12. Large anomalous Hall current induced by topological nodal lines in a ferromagnetic van der Waals semimetal / K. Kim, J. Seo, E. Lee [et al.] // Nat. Mater. — 2018. — Vol. 17, Iss. 9. — P. 794–799.
13. Dutta, P. Finite bulk Josephson currents and chirality blockade removal from interorbital pairing in magnetic Weyl semimetals / P. Dutta, F. Parhizgar, A. M. Black-Schaffer // Phys. Rev. B. — 2020. — Vol. 101, Iss. 6. — P. 064514.
14. Three-dimensional Dirac semimetal and quantum transport in Cd₃As₂ / Z. Wang, H. Weng, Q. Wu [et al.] // Phys. Rev. B. — 2013. — Vol. 88, Iss. 12. — P. 125427.
15. Kopnin, N. B. High-temperature surface superconductivity in topological flatband systems / N. B. Kopnin, T. T. Heikkilá, G. E. Volovik // Phys. Rev. B. — 2011. — Vol. 83, Iss. 22. — P. 220503.
16. Observation of subkelvin superconductivity in Cd₃As₂ thin films / A. V. Suslov, A. B. Davydov, L. N. Oveshnikov [et al.] // Phys. Rev. B. — 2019. — Vol. 99, Iss. 9. — P. 094512.
17. Giant anomalous Hall effect in a ferromagnetic kagome-lattice semimetal / E. Liu, Y. Sun, N. Kumar [et al.] // Nat. Phys. — 2018. — Vol. 14, Iss. 11. — P. 1125–1131.

18. Josephson critical current in a long mesoscopic S-N-S junction / P. Dubos, H. Courtois, B. Pannetier [et al.] // Phys. Rev. B. — 2001. — Vol. 63, Iss. 6. — P. 064502.
19. Fermi-arc diversity on surface terminations of the magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{Se}_2$ / M. Noam, B. Rajib, N. Pranab Kumar [et al.] // Science. — 2019. — Vol. 365, Iss. 6459. — P. 1286–1291.
20. Topological surface Fermi arcs in the magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{Se}_2$ / Q. Xu, E. Liu, W. Shi [et al.] // Phys. Rev. B. — 2018. — Vol. 97, Iss. 23. — P. 235416.
21. Signatures for half-metallicity and nontrivial surface states in the kagome lattice Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{Se}_2$ / L. Jiao, Q. Xu, Y. Cheon [et al.] // Phys. Rev. B. — 2019. — Vol. 99, Iss. 24. — P. 245158.
22. Bergeret, F. S. Odd triplet superconductivity and related phenomena in superconductor-ferromagnet structures / F. S. Bergeret, A. F. Volkov, K. B. Efetov // Rev. Mod. Phys. — 2005. — Vol. 77, Iss. 4. — P. 1321–1373.
23. Banerjee, N. Reversible control of spin-polarized supercurrents in ferromagnetic Josephson junctions / N. Banerjee, J. W. A. Robinson, M. G. Blamire // Nat. Commun. — 2014. — Vol. 5, Iss. 1. — P. 4771.
24. Angular dependence of the topological Hall effect in the uniaxial van der Waals ferromagnet Fe_3GeTe_2 / Y. You, Y. Gong, H. Li [et al.] // Phys. Rev. B. — 2019. — Vol. 100, Iss. 13. — P. 134441.
25. Spin-dependent transport through a Weyl semimetal surface / V. D. Esin, D. N. Borisenko, A. V. Timonina [et al.] // Phys. Rev. B. — 2020. — Vol. 101, Iss. 15. — P. 155309.
26. Multiple magnon modes in the $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{Se}_2$ Weyl semimetal candidate / Shvetsov, O. O., Esin, V. D., Timonina, A. V. [et al.] // EPL. — 2019. — Vol. 127, Iss. 5. — P. 57002.
27. Observation of the dominant spin-triplet supercurrent in Josephson spin valves with strong Ni ferromagnets / O. M. Kapran, A. Iovan, T. Golod, V. M. Krasnov // Phys. Rev. Research. — 2020. — Vol. 2, Iss. 1. — P. 013167.
28. Néel-type skyrmions and their current-induced motion in van der Waals ferromagnet-based heterostructures / T.-E. Park, L. Peng, J. Liang [et al.] // Phys. Rev. B. — 2021. — Vol. 103, Iss. 10. — P. 104410.

29. Current-induced spin-orbit torques in ferromagnetic and antiferromagnetic systems / A. Manchon, J. Železný, I. M. Miron [et al.] // Rev. Mod. Phys. — 2019. — Vol. 91, Iss. 3. — P. 035004.