

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Олега Олеговича Швецова «Исследование транспорта в топологических полуметаллах с наведенной сверхпроводимостью», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Швецова О.О. посвящена исследованию транспорта в гибридных структурах на основе топологических полуметаллов и сверхпроводников. Топологические полуметаллы представляют собой новый класс перспективных материалов, интерес к которым обусловлен особенностями их топологической зонной структуры и наличием в них топологических поверхностных состояний. Выделение вклада от топологических поверхностных состояний в транспорт является трудной задачей, поскольку поверхностная проводимость всегда шунтирована проводящим объемом полуметалла. Однако исследование структур сверхпроводник – топологический полуметалл позволяет косвенно выделить в эксперименте вклад топологических поверхностных состояний в транспорт заряда, что было продемонстрировано для топологических полуметаллов различных типов в диссертационной работе О.О. Швецова. Кроме того, такие гибридные структуры представляют интерес с точки зрения фундаментальной физики, так как в топологических полуметаллах с сильным спин-орбитальным взаимодействием в условиях эффекта близости со сверхпроводником возможно формирование нетривиальных типов спаривания электронов, в том числе предсказана возможная реализация топологической сверхпроводимости. Важным применением топологических материалов является возможность создания топологически защищенных квантовых битов, поэтому актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.

Структура и содержание 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.

Во **введении** обосновывается актуальность поставленных задач, формулируются цели, и обсуждается научная новизна диссертационной работы и практическая значимость, перечисляются основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о методах исследований, степени достоверности и апробации полученных результатов, публикациях, личном вкладе автора, а также структура и объем диссертации.

Первая глава представляет собой обзор научной литературы по теме диссертации. Приводятся основные сведения о топологических фазах в физике твердого тела и их классификация в зависимости от зонной структуры, а также описываются их топологические поверхностные состояния. Рассматривается физика процесса андреевского отражения, формирование андреевских связанных состояний и эффект Джозефсона. Также приведены краткие сведения о нетривиальных проявлениях эффекта близости в топологических полуметаллах. В разделе имеются иллюстрации из работ других авторов, которые корректно процитированы как в списке литературы, так и в подписях к рисункам.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной методики и технологиям изготовления образцов. Подробно описывается метод прижима для формирования контактов к сколотым чешуйкам топологических полуметаллов. Также приводится описание экспериментальной измерительной схемы и криогенной установки. Описываются экспериментальные методики, позволяющие проводить прецизионные измерения.

Третья глава посвящена обнаружению поверхностной сверхпроводимости в дираковском топологическом полуметалле Cd_3As_2 на интерфейсе с нормальным металлом. Особенности дифференциального сопротивления одиночного контакта Au- Cd_3As_2 при низкой температуре были интерпретированы как андреевское отражение, возникающее из-за поверхностной сверхпроводимости в дираковском полуметалле. Результат подтверждается температурной и магнетополевой зависимостями эффекта. Возникновение поверхностной сверхпроводимости на интерфейсе дираковского полуметалла и нормального металла приписывается формированию плоских зон на поверхности топологического полуметалла.

В **четвертой главе** приведены результаты исследования одиночного сверхпроводящего контакта Nb к магнитному вейлевскому топологическому полуметаллу $Co_3Sn_2S_2$. Среди ряда выявленных особенностей в дифференциальном сопротивлении такого контакта наибольшее внимание уделено аномалии нулевого напряжения, которая демонстрировала необычную устойчивость по отношению ко внешнему магнитному полю. Это поведение интерпретировано как следствие формирования низкоэнергетических андреевских уровней на интерфейсе Nb- $Co_3Sn_2S_2$ при участии киральных поверхностных состояний вейлевского полуметалла.

Пятая глава посвящена исследованию эффекта Джозефсона в длинных (5 мкм) латеральных переходах на основе магнитного вейлевского полуметалла $Co_3Sn_2S_2$. Было показано, что эффект Джозефсона на большой длине возникает только в том случае, когда кристалл магнитного вейлевского полуметалла однородно намагничен. Подавление сверхтока в неупорядоченном состоянии приписывается смене киральности поверхностного состояния вейлевского полуметалла на стенке между магнитными доменами.

Шестая глава посвящена исследованию эффекта Джозефсона в длинных (3 мкм) латеральных переходах на основе магнитного полуметалла с нодальной линией Fe_3GeTe_2 . Было обнаружено, что зависимости критического тока от магнитного поля в таких структурах обладают выраженной асимметрией, причем эта асимметрия зависит от направления развертки внешнего магнитного поля. Это поведение интерпретируется как реализация джозефсоновского спинового вентиля при участии спин-поляризованных поверхностных состояний топологического полуметалла Fe_3GeTe_2 . Такая интерпретация подкрепляется наблюдением в Fe_3GeTe_2 магнетотранспортных свойств, характерных для спиновых вентилях.

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, что интерпретируется как поверхностная сверхпроводимость вблизи интерфейса с нормальным металлом. Возникновение сверхпроводимости приписывается формированию плоской зоны на поверхности дираковского топологического полуметалла Cd_3As_2 .

2. Для одиночного сверхпроводящего Nb контакта к магнитному вейлевскому полуметаллу $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ была обнаружена аномалия нулевого напряжения, которая демонстрирует выраженную стабильность по отношению ко внешнему магнитному полю вплоть до критического поля Nb. Особенность интерпретирована как формирование низкоэнергетических 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 намагничивания образца до насыщения становится возможным протекание сверхпроводящего тока. Подавление сверхтока в неупорядоченном магнитном состоянии приписывается смене киральности поверхностного состояния вейлевского полуметалла на доменной стенке, что приводит к значительному рассеянию.

4. Для латерального транспорта в 3 мкм джозефсоновских переходах In- Fe_3GeTe_2 -In, где Fe_3GeTe_2 является ферромагнитным топологическим полуметаллом с нодальной линией, был обнаружен эффект Джозефсона, демонстрирующий необычную зависимость критического тока от внешнего магнитного поля различных ориентаций. Зависимости критического тока от магнитного поля асимметричны, но эта асимметрия зеркально отражается при перемагничивании образца. Такое поведение интерпретируется как реализация джозефсоновского спинового вентиля. Наиболее вероятный сценарий для реализации джозефсоновского спинового вентиля связан с наличием двух различно ориентированных спиновых поляризованных состояний в ферромагнитном объеме и в топологическом поверхностном состоянии полуметалла с нодальной линией Fe_3GeTe_2 .

Результаты, описанные в диссертации Швецова О.О., получены впервые, являются **новыми и научно значимыми** для решения актуальных задач современной физики конденсированного состояния.

Научные результаты, полученные в диссертации, являются **достоверными и обоснованными** в силу их всесторонней экспериментальной проверки. Материал, представленный в диссертации, изложен ясно и последовательно. Результаты работы опубликованы в четырех статьях в ведущих российских и зарубежных журналах, были представлены на российских конференциях и семинарах. Цели, поставленные в работе, полностью достигнуты. **Автореферат** правильно и полно передает содержание диссертации.

Тем не менее, по диссертации имеется ряд замечаний.

1. Недостаточно детально описана измерительная установка. Не указана модель криостата, в котором проводятся измерения, не описаны его характеристики, не дана основная схема, не указано какие фильтры на каких ступенях используются. В результате непонятно, почему минимальная рабочая температура составляет 30 мК, хотя у современных (выпущенных в пределах последних 10 лет) криостатов минимальная рабочая температура составляет 10 мК.

2. При описании длинных джозефсоновских контактов отсутствуют оценки джозефсоновских длин для различных температур, так что непонятно, на сколько контакты длинные.

3. В тексте есть ряд опечаток, стилистических неточностей, а также не совсем корректного использования терминов, что, видимо, связано с переводом

англоязычных терминов на русский язык. Например, вместо термина «режим задачи тока» следует употреблять термин «режим задания тока».

Данные замечания не снижают общей высокой оценки работы. Диссертационная работа Швецова Олега Олеговича. «Исследование транспорта в топологических полуметаллах с наведенной сверхпроводимостью» является законченным научным исследованием и полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а её автор, Швецов Олег Олегович, вне всякого сомнения, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент: Андрей Леонидович Панкратов, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика, ведущий научный сотрудник отдела терагерцовой спектроскопии Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

«25» апреля 2022 г.

Панкратов А.Л.

Согласен на обработку персональных данных

«25» апреля 2022 г.

Панкратов А.Л.



Подпись *А.Л. Панкратова*
ЗАВЕРЯЮ:
НАЧАЛЬНИК
ОТДЕЛА КАДРОВ ИФМ РАН
ОСИПЕНКО М.Л. *М.Л. Осипенко*
25.04.2022г.

Контактная информация:

Почтовый адрес: 603950, Нижний Новгород, ГСП-105, ИФМ РАН

Телефон: +79051913223

e-mail: alp@ipmras.ru