



Министерство просвещения Российской Федерации

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Московский педагогический государственный университет»

улица М. Пироговская дом 1, строение 1, Москва, 119991, ГСП-1

Тел: +7 (499)245-03-10, факс: +7 (499)245-77-58, e-mail: mail@mpgu.ru

ОКПО 02079566, ОГРН 1027700215344, ИНН/КПП 7704077771/770401001

№ _____
на № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор МПГУ
доктор географических наук
академик РАО
Дронов Виктор Павлович



«25» апреля 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Швецова Олега Олеговича "Исследование транспорта в топологических полуметаллах с наведенной сверхпроводимостью", представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - физика конденсированного состояния.

Диссертация Швецова Олега Олеговича посвящена фундаментальным исследованиям транспорта между трёхмерными топологическими полуметаллами и сверхпроводниками.

Взаимодействие между сверхпроводимостью и нетривиальной топологией волновых функций в топологических материалах является одним из горячих направлений в современной физике конденсированного состояния. Это обусловлено как большим количеством предсказанных при этом новых физических явлений, так и возможностью использования топологически защищённых состояний для реализации квантовых вычислений. Таким образом, тема диссертационной работы актуальна и значима как с фундаментальной, так и с практической точки зрения.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка публикации автора по теме диссертации и списка литературы.

Во введении обосновывается актуальность исследования, сформулированы его цели и задачи, раскрываются его новизна и практическая значимость. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава является обзорной. Она содержит хорошо написанное введение в топологические явления в физике конденсированного состояния, имеющее, на наш взгляд, и определённую педагогическую ценность как простое и краткое введение в предмет. Также приводятся сведения об андреевском отражении и эффекте Джозефсона, и об основных полученных к настоящему времени фундаментальных результатах по эффекту Джозефсона в топологических полуметаллах.

Во второй главе описаны использованные методики эксперимента, отчасти разработанные автором. В их числе следует особенно отметить технику прижима чешуйки исследуемого материала к заранее изготовленной методом фотолитографии матрице контактов из нормального металла или сверхпроводника. Ее главное достоинство состоит в универсальности по отношению к широкому классу слоистых материалов, к которому относятся исследуемые в работе топологические полуметаллы.

Третья глава посвящена возможной поверхностной сверхпроводимости в дираковском топологическом полуметалле Cd_3As_2 . Обнаружена нелинейность вольт-амперных характеристик контактов между золотом и арсенидом кадмия, состоящая в уменьшении дифференциального сопротивления при малых напряжениях. Убедительно показано, что эффект связан не с объёмом образца, а именно с контактами. Поведение провала в дифференциальном сопротивлении соответствует картине андреевского отражения на границе нормального металла со сверхпроводником. Ширина провала уменьшается с увеличением температуры или при наложении магнитного поля, причём критическое поле коррелирует с критической температурой, как это и ожидается для сверхпроводника. Рассуждая о возможной природе сверхпроводимости, автор в качестве наиболее вероятного объяснения склоняется к формированию плоских зон на интерфейсах образца арсенида кадмия.

В четвертой главе аналогичные исследования транспорта через границу со сверхпроводящим ниобием проведены для кандидата в магнитные вейлевские полуметаллы, ферромагнетика $Co_3Sn_2S_3$. Предварительно, автор провёл измерения холловского сопротивления, подтвердившие существование гигантского аномального эффекта Холла - характерной особенности магнитного вейлевского полуметалла $Co_3Sn_2S_2$. В транспортных измерениях были обнаружены особенности на вольт-амперных характеристиках, характерные для андреевского отражения, при этом щель соответствует ниобию (с учётом эффекта близости с ферромагнетиком). Однако, наблюдается также аномалия нулевого смещения (ZBA), поведение которой качественно отличается от поведения прочих особенностей ВАХ. Ширина пика избыточной проводимости остаётся

неизменной вплоть до критического поля ниобия, при этом амплитуда также слабо меняется с полем. В то же время, с ростом температуры обнаружено уменьшение амплитуды ZBA и полное ее подавление при температуре значительно ниже температуры перехода ниобия. В качестве интерпретации, предлагается квазиодномерный транспорт по связанным андреевским состояниям, возникающим в потенциале конфинмента на неоднородностях интерфейса $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ и схлопывающимся в один уровень в присутствии сильного спин-орбитального взаимодействия.

Пятая глава продолжает исследования контактов сверхпроводник-полуметаллический ферромагнетик $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, но уже с точки зрения сверхпроводимости, наведённой в $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, и стационарного эффекта Джозефсона. Автор демонстрирует, что, в случае однородной намагниченности образца, имеет место сверхток через $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, соответствующей эффекту близости на длине не менее 5 мкм. В то же время, в случае существования магнитных доменов, наблюдается лишь андреевское отражение. Наблюдения естественным образом интерпретируются транспортом по топологическим поверхностным состояниям вейлевского полуметалла, с наведенной сверхпроводимостью за счёт эффекта близости. Автор приводит аргументы в пользу триплетного характера сверхпроводящих корреляций в этих состояниях.

Шестая глава посвящена эффекту близости и джозефсоновскому транспорту в магнитном топологическом полуметалле Fe_3GeTe_2 . Как и для $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, обнаружен сверхток на длине в несколько мкм. Установлено, что зависимость сверхтока от магнитного поля асимметрична, причём асимметрия зеркально отражается при смене направления развёртки поля. Для перпендикулярной ориентации поля, кроме того, при смене направления развёртки минимум сверхтока переходит в максимум. Эти наблюдения хорошо объясняются гипотезой о реализации в Fe_3GeTe_2 естественного спинового вентиля, что возможно благодаря разной ориентации намагниченности в объёме образца и на его поверхности. Гипотеза подтверждается дополнительными измерениями на образцах с нормальными контактами, которые демонстрируют аналогичное асимметричное поведение магнитосопротивления. Смена максимума на минимум требует также нарушения пространственной инверсии на интерфейсах, что автор считает вполне возможным для Fe_3GeTe_2 .

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Список литературы содержит 134 источника.

Представленные в диссертации результаты получены впервые и являются новыми. Они также являются научно значимыми, так как представляют собой фундаментальный интерес для исследования новых топологических фаз в физике твёрдого тела и наведенной сверхпроводимости в топологических материалах. Практическая значимость обусловлена близостью темы диссертации к актуальной проблеме создания топологических кубитов.

В проведённых исследованиях авторский вклад состоит в изготовлении образцов из имеющихся кристаллов, проведении экспериментальных измерений, обработке полученных результатов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается выполнением прецизионных измерений на нескольких образцах с использованием стандартных низкотемпературных транспортных техник, систематичностью полученных данных.

Апробация работы.

Результаты опубликованы в 4 статьях в высокорейтинговых научных журналах (все – из перечня ВАК) и докладывались на международных и российских конференциях. Диссертация написана хорошим и прозрачным языком, а автореферат правильно и полно отражает её содержание.

К диссертации есть следующие замечания.

В третьей главе, на стр. 42 и 45 сказано, что измеренная зависимость глубины провала в дифференциальном сопротивлении контакта золото- Cd_3As_2 , представленная на рисунке 20(с), согласуется с предсказанием теории БТК для прозрачного NS контакта. Это утверждение не подкреплено каким-либо сравнением с теорией; в частности, на рисунке 20(с) представлены только экспериментальные точки, но отсутствует фит теоретической кривой. Сравнение было бы весьма желательно, поскольку наблюдаемая в эксперименте зависимость провала от температуры является весьма слабой, что представляется как раз плохо согласующимся с предсказанием БТК.

В той же третьей главе, обсуждая, на стр. 42, зависимость ширины провала в дифференциальном сопротивлении (интерпретируемого как сверхпроводящая щель) от магнитного поля, автор отмечает, что зависимость от ориентации магнитного поля незначительна. Не очень понятно, насколько это экспериментальное наблюдение согласуется с гипотезой о сверхпроводимости в поверхностном слое на границе образца Cd_3As_2 . Для сверхпроводимости в тонком слое, естественно было бы ожидать значительно больший эффект от перпендикулярного магнитного поля. К сожалению, обсуждение этого вопроса в работе отсутствует.

В пятой главе, на стр. 57, при описании процедуры измерения критического тока упоминается, что каждая точка по магнитному полю и температуре получалась усреднением по 10 разверткам по току от нулевого тока до заведомо превышающего критический, при этом "точки, разбросанные более чем на два стандартных отклонения, исключались". Описанная процедура кажется не вполне стандартной. Неясно, каково было количество исключённых точек и какую точность измерения критического тока в итоге гарантирует автор. Вопрос актуален в связи с необычными зависимостями критического тока от поля, представленными далее в той же главе на рис. 30b.

В диссертации есть некоторое количество дефектов оформления и опечаток. Например, рис. 23 и рис 27b дублируют друг друга. На стр. 37 в одной из групп ссылок ссылка 47 встречается дважды, а в другой - трижды. Отметим, однако, что общее количество таких дефектов невелико.

Сделанные замечания ни в коей мере не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация Швецова О.О. представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на мировом научном уровне.

По объёму, структуре, актуальности, научной новизне и значимости полученных результатов диссертация полностью соответствует 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, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Доклад по материалам диссертации был представлен на семинаре Лаборатории квантовых детекторов МПГУ, отзыв на диссертацию обсуждён и одобрен на заседании семинара лаборатории 30 марта 2022.

Составитель отзыва:

Семенов Александр Владимирович – кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиоп физика, доцент кафедры общей и экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет».

«25» апреля 2022 г.



Семенов А.В.

Подпись Семенова А.В. заверяю



Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет».

Адрес: 119991, город Москва, улица М. Пироговская, дом 1, строение 1. Телефон: +7(499)245-03-10. Сайт: <http://mpgu.su>.

