

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Швецова Олега Олеговича

“Исследование транспорта в топологических полуметаллах с наведенной  
сверхпроводимостью”,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного  
состояния

**Актуальность темы.** Материалы с инвертированной зонной структурой, т.н. "топологические" материалы являются одной из наиболее горячих тематик на стыке науки о материалах, физики твердого тела и мезоскопической физики. Данные вещества характеризуются наличием приповерхностных состояний пониженной размерности с необычными свойствами, в частности поляризацией по спину или изоспину и ослабленным рассеянием. Наличие таких состояний в топологических изоляторах и вейлевских полуметаллах хорошо установлено и ставит вопрос: как проявляются и могут быть использованы свойства топологической защиты приповерхностных состояний? Основными направлениями поиска являются спинтроника (поверхностные топологические состояния могут выступать в роли преобразователя спиновой степени свободы в зарядовую и наоборот), электродинамика, т.е. взаимодействие с электромагнитным излучением, а также сверхпроводимость, обещающая также стать топологической, что может быть перспективно для квантовых вычислений. Номинально топологические материалы являются узкозонными полупроводниками и полуметаллами, имеют достаточно малую плотность электронных состояний на уровне Ферми, и, как следствие, не сверхпроводят. Существует два основных пути к сверхпроводимости в них: (i) модифицировать весь объем материала, например пролегировав его или приложив давление;

(ii) индуцировать сверхпроводимость при помощи эффекта близости, что позволит включить именно поверхностные состояния.

Удивительным обстоятельством оказывается то, что в топологических материалах часто при эффекте близости сверхпроводимость гораздо эффективнее наводится именно в топологических поверхностных состояниях, а не в объеме. Дираковские и вейлевские материалы представляют собой материальную платформу для исследования необычной сверхпроводимости. Наведенная в них сверхпроводимость является деликатным, но в то же время крайне заманчивым объектом, открывающим большое количество новых свойств и возможностей управления.

В этом смысле работа Швецова Олега Олеговича, в которой исследуется наведенная сверхпроводимость в вейлевских полуметаллах, является **крайне актуальной**.

### Общая характеристика работы.

Работа состоит из Введения, шести глав, заключения, списка публикаций автора и списка литературы. Во **Введении** описывается актуальность, новизна, структура, методы исследования, авторский вклад и формулируются защищаемые положения.

**Первая глава** представляет собой литературный обзор, написанный с педагогическим уклоном, включающий понятие топологических материалов, особенности спектра, классификацию топологических полуметаллов. Также в данной главе приводится необходимый обзор явлений, связанных со сверхпроводимостью: андреевские связанные состояния, эффект Джозефсона, информация из литературы об исследованиях эффекта

близости в топологических полуметаллах. Данная глава явно глубоко осмыслена автором, старавшимся минимизировать теоретическую справку и во всей своей работе максимально следовать феноменологическому подходу.

**Вторая глава** посвящена методике эксперимента: способам изготовления образцов, измерения вольт-амперных характеристик, криогенному оборудованию.

**Третья глава** посвящена поверхностной сверхпроводимости в дираковском полуметалле  $Cd_3As_2$ , проявляющейся в транспортных характеристиках структуры с нормальным (не сверхпроводящим) контактом.

Вывод о сверхпроводимости сделан на основании пониженного сопротивления, щелевого типа особенностей в трехконтактной проводимости, при этом щель возникает при низких температурах и подавляется магнитным полем. Данный оригинальный результат носит феноменологический характер. Наблюдение важно как одно из первых проявлений сверхпроводимости в дираковских полуметаллах, оно согласуется с результатами других групп, но вряд ли может быть согласовано объяснено на текущем уровне понимания. Автором приводится сценарий плоской зоны как вариант.

**Четвертая и пятая** главы посвящены разным аспектам наведенной сверхпроводимости в ферромагнитном вейлевском полуметалле  $Co_3Sn_2S_2$ . Автором путем систематического исследования вольт-амперных характеристик в различных трех- и четырехточечных геометриях экспериментов достаточно убедительно показано, что наводимая сверхпроводимость является приповерхностным свойством; получены убедительные доказательства спаривания с ненулевым спином (чувствительности сверхпроводимости к наличию доменной структуры ферромагнетика), а также наблюдается новый эффект – особенность вольт-амперных характеристик при нулевом смещении, которую можно считать характеристикой одномерных андреевских связанных состояний или даже активно дискутируемых состояний Майораны. Данные исследования, безусловно, носят пионерский характер.

**Шестая глава** посвящена наведенной сверхпроводимости в магнитном вейлевском полуметалле с линией узлов  $Fe_3GeTe_2$ . Наблюден новый эффект: наведенная сверхпроводимость испытывает гистерезис по магнитному полю в полях много меньших коэрцитивного. Показано, что данное поведение означает, что джозефсоновский переход является спиновым вентилем. Исследована феноменология наблюдаемых явлений с учетом магнитной анизотропии, свойственной материалу.

В **Заключении** перечислены полученные результаты.

**Новизна** работы состоит в открытии ряда новых явлений сопутствующих наведенной сверхпроводимости в топологических полуметаллах. Пионерский характер работ, по сути открытие простого способа получения новых платформ для исследования наведенной сверхпроводимости в топологических материалах, обуславливает **практическую значимость** полученных результатов, а необходимость объяснения наблюдаемых явлений — **теоретическую значимость**.

В проведённых исследованиях **авторский вклад** состоит в изготовлении образцов из имеющихся кристаллов, проведении всех экспериментов, обработке полученных результатов.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов обеспечивается выполнением измерений на нескольких образцах, систематичностью и объяснимостью полученных данных, использованием стандартных измерительных методик.

**Апробация работы.** Результаты опубликованы в 4 статьях в авторитетных журналах, включая 2 работы в *Physical Review B*, а также статьи в *European Physics Letters* и Письма в ЖЭТФ, докладывались на всероссийских и международных конференциях.

К сожалению, работа не свободна от недостатков, к ней можно сделать следующие замечания, многие из которых являются и пожеланиями в будущей работе диссертанта:

1. В работе присутствует **ряд отступлений от общепринятого формата научного доклада.**

В частности, название диссертации сформулировано не как тема, а как процесс, "Исследование ....".

Формулировки выносимых на защиту результатов, которые обычно называются положениями, содержат эмоциональные оценки: "Такая физическая картина имеет под собой хороший теоретический фундамент" (положение 1).

Подобно названию диссертации, результаты работы также отражают процессы:

"Были подробно исследованы температурные и магнетопольные зависимости особенностей  $dI/dV(V)$ ). В качестве возможной интерпретации было рассмотрено...".

Подобные утверждения надо формулировать по другому, например

"Особенности измеренных температурных и магнетопольных зависимости особенностей  $dI/dV(V)$  могут быть интерпретированы как..." (положение 2)

В положении 3 фраза "Была обсуждена..." опять же, характеризует не результат, а процесс.

В работе встречаются чересчур художественные выражения, граничащие с жаргоном и также нетипичные для научного формата:

- «дух слова "топология" в контексте физики» стр. 10

- «Физика может стать еще более интригующей» стр. 47

- «Эта физика может быть релевантна и в нашем случае» стр. 46

2. В главе 3, посвященной обнаружению поверхностной сверхпроводимости в арсениде кадмия, полностью **обойдены вниманием вопросы кристаллической, зонной структуры и ориентации кристалла.**

В частности, на странице 39 сделано утверждение о том, что «концентрация носителей  $n$  составляет  $2.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  по данным шубниковских осцилляций», но не сказано, каким образом эта величина получена из обработки данных. Скорее всего, автором подразумевалась сферическая Ферми-поверхность с определенным вырождением. Каково это вырождение в тексте не поясняется. С другой стороны, то что автором была отсложена тонкая чешуйка означает, что материал анизотропный, а значит предположение о сферичности поверхности  $\Pi$  может быть несправедливо. То, что носители - электроны, следует из использования буквы " $n$ ", но осцилляции не несут информацию о знаке носителей. Знак взят из измерений эффекта Холла?

В связи с приведенной величиной **концентрации** возникает вопрос, **почему** в данном материале она **столь мала** - порядка одной тысячной электрона на элементарную ячейку? Соответствует ли очень малая концентрация  $n$ , соответственно, крошечная Ферми-поверхность стехиометрическому материалу? Или может быть остаточная концентрация - результат естественного легирования материала или разной подвижности электронов и дырок? Данный вопрос в диссертации не обсуждается.

3. При огромном достоинстве диссертации, носящей характер феноменологического исследования и нарочито минимизирующей использование формул в пользу качественной

картины явлений, в работе явно не хватает обсуждения на микроскопическом уровне процессов, происходящих при транспорте. Особенно это относится к наиболее яркому результату - главе 5. Необходимо было дать свою версию явления на качественном уровне, для этого разобраться с теоретическими представлениями о сверхпроводящих свойствах состояний в Ферми-арках, объяснить как устроена спиновая структура и спаривание в этих состояниях и объяснить почему доменная граница сильно подавляет сверхпроводящий транспорт. В главе 4, где наблюдается особенность при нулевом смещении (ZBA), впоследствии объясняемая наличием андреевских уровней в одномерных каналах, происхождение этих самых каналов не объяснено. Где локализованы обсуждаемые уровни? Казалось бы, Ферми-арка одномерна только при энергии, соответствующей вейлевскому узлу, а в общем случае состояния двумерны и покрывают всю поверхность.

4. В главе 6 автором вводится обширный феноменологический понятийный аппарат, связанный с нарушениями симметрии, например "планарный топологический эффект Холла".

К сожалению, ничего не сказано о структуре материала  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  (кроме того, что она обладает центром инверсии) и ориентации его кристаллов, наличии анизотропии в плоскости чешуйки, а также магнитной анизотропии. Отсутствие наглядных пространственных иллюстраций затрудняет чтение главы. В рассматриваемой задаче о протекании сверхтока по поверхности магнитного полуметалла с узловой линией, очевидно, есть несколько направлений: направление протекания тока, направление намагниченности, направление поля, а также анизотропии ферромагнетизма. Существование рашбовского спин-орбитального взаимодействия у поверхности дополнительно может генерировать направления с векторным произведением к ее нормали. Наглядной иллюстрации этих направлений в работе нет.

В частности, направление протекания тока никак не обсуждалось, в наиболее интересной в этом смысле параллельной конфигурации относительно поля таких исследований в работе не представлено.

Мне представляется данное направление поиска крайне интересным и актуальным, в связи с тем, что сейчас в гибридных структурах из ферромагнетиков, и сверхпроводников и материалов с сильным спин орбитальным взаимодействием в литературе активно обсуждается сверхпроводящий диодный эффект (неэквивалентность положительного и отрицательного направлений пропускания тока). Есть ли он в данном материале?

5. Также существуют многочисленные мелкие замечания по представлению материала и языку. В частности, в качественной задаче со стержнем в главе 1 (стр. 10) явно не хватает рисунка; для гамильтонианов на стр. 15 не написано в каком пространстве их матрицы, аналогичная ситуация с уравнением Боголюбова-де Жена на стр. 22 и матрицами рассеяния на стр. 25; рисунок (фактически таблица) 13 содержит кем-то посчитанные амплитуды парных корреляций, но сама величина в тексте не обсуждается; при описании криостата растворения совершенно нет ссылок.

Отдельно нужно отметить не самое высокое качество русского языка. Текст изобилует грамматическими ошибками.

Наиболее распространенная и бросающаяся в глаза читателю состоит в том, что образованные от имен собственных прилагательные "Дираковский", "Андреевский", "Вейлевский", "Зеэмановский", "Майорановский" и т.д. - пишутся с большой буквы, а надо с маленькой. Также с маленькой буквы нужно написать слово "Аномальный" (стр. 48).

Помимо этой, ошибки присутствуют не менее чем на половине страниц диссертации, иногда не согласуются падежи, числа. Можно порекомендовать автору конвертировать текст в редактор и использовать автопроверку грамматики.

Указанные замечания не снижают, однако, научной ценности и общей высокой оценки диссертации.

Результаты диссертации, без сомнения, будут востребованы во многих университетах и научных организациях, как то Московский государственный университет, Московский физико-технический институт, ИТМО (Санкт-Петербург), ФИАН(Москва), Институт радиоэлектроники (ИРЭ, Москва), ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), Сколтех (Москва), Институт физики полупроводников (Новосибирск), Институт физики микроструктур (Нижний Новгород), Институт физики металлов (Екатеринбург) и другие. **Автореферат и опубликованные работы правильно отражают содержание диссертации.**

Диссертационная работа 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, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния».

**Официальный оппонент:**

Кунцевич Александр Юрьевич – доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, ведущий научный сотрудник отдела «Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

«25» апреля 2022 г.

Кунцевич А.Ю.

Даю согласие на обработку персональных данных

«25» апреля 2022 г.

Кунцевич А.Ю.

Подпись Кунцевича А.Ю. заверяю,  
Ученый секретарь ФИАН  
кандидат физико-математических наук



Колобов А.В.

**Контактная информация:**

Адрес: г. Москва, ГСП-1, Ленинский проспект 53, 119991, Россия  
Телефон: +79262638023  
e-mail: alexkun@lebedev.ru