

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертационную работу
Есина Варнавы Денисовича
“Транспорт в топологических полуметаллах в нелинейном режиме: спиновый диод и
нелинейный эффект Холла”,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

В течение уже почти полувека физика мезоскопических систем является одним из наиболее важных направлений физики конденсированного состояния, что не удивительно, так как ее рождение и развитие полностью связано с возможностью, благодаря высоким технологиям, изучать электронные свойства практически бесконечного разнообразия твердотельных структур в современном физическом эксперименте. Подобный факт гарантирует не меньшее разнообразие новых наблюдаемых физических эффектов. И открытие эффектов слабой локализации и взаимодействия, квантования баллистического контакта и его универсальных флуктуаций, эффектов близости и Андреевского отражения в гибридных системах сверхпроводник-нормальный металл, сверхпроводник-ферромагнетик более чем убедительно подтвердили указанный факт. В последние десятилетия в обсуждаемой области физики родилось и в настоящее время бурно развивается новое направление, связанное с топологическими материалами (топологические изоляторы, дираковские и вейлевские полуметаллы), в которых существование различных состояний твердого тела (диэлектрика и металла, сверхпроводника и нормального металла, ферромагнетика и парамагнетика,) оказалось возможным, грубо говоря, в одно куске материала. Диссертация В.А. Есина полностью относится к указанному направлению. Поэтому **актуальность темы** его диссертационной работы не вызывает каких-либо сомнений.

Она состоит из введения, литературного обзора и двух оригинальных глав. В литературном обзоре автором дается анализ основных идей, а также языка физики топологических материалов. Надо признать, и идеи, и язык, - в этом оппонент убедился при чтении обзора, - носят вполне топологический уклон, состоящий из целого набора понятий (кривизна Бери, магноны, спиновые текстуры и волны, спиновый диод, нелинейный эффект Холла, топологические полуметаллы с узловой линией), ясный физический смысл которых остается за пределами рассуждений автора. То есть диссертант уже в обзоре демонстрирует прекрасное умение, которое текст оригинальной части диссертации только усиливает, работать в жанре топологического жонглирования.

Первая наиболее интересная глава диссертации посвящена описанию методики

приготовления экспериментальных образцов, техники приготовления к ним контактов и описанию схем измерения их транспортного отклика. Данная глава показывает, что это далеко не простое дело, так как исследуемые в диссертации материалы ($\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, Ti_2MnAl , WTe_2 , CoSi , Cd_3As_2 , Fe_3GeTe_2) являются по-настоящему топологическими, то есть не поддающимися никакому стандартному способу приготовления. К примеру, холловские мостики, которые обычно изготавливаются с помощью стандартной фотолитографии и последующего травления, на основе таких материалов создать невозможно. Поэтому в диссертации разработана специальная технология по созданию измерительной структуры, на основе которой можно изучать транспортный отклик кусочков (см. вышеприведенный список). Она включает изготовление с использованием обычной фотолитографии металлических полос различных конфигураций на слое SiO_2 , выращенном путем термического окисления на поверхности кремниевой шайбы. Затем отдельный кусочек (автор называет его чешуйкой) накладывается на сформированные описанным выше образом металлические контакты, а затем прижимается к ним при помощи нажатия на размещаемую сверху вторую пластину оксидированного кремния. Усилие прижима подбирается экспериментально для каждого материала так, чтобы быть заведомо меньше усилия, приводящего к механическому повреждению исследуемого образца. Особым достоинством данного метода является его уникальность, так как никакого альтернативного способа «приконтачивания» к исследуемым структурам, не видно. И диссертанту удалось показать, что в его руках, описанная методика изготовления экспериментального образца позволяет получить контакты, которые дают возможность проводить воспроизводимые измерения в течение необходимого времени.

Результаты проведенных экспериментов и их анализ даны в третьей главе диссертационной работы. В указанных экспериментах диссертант провел детальные и систематические измерения продольной R_{xx} и поперечной R_{xy} (которую автор называет Холловской) компонент дифференциального сопротивления, а также сигнала второй гармоники $V_{2\omega}$ всех его многочисленных кусочков в зависимости от прикладываемого к ним постоянного смещения в широком диапазоне температур и магнитных полей. На основе анализа этих измерений ему удастся сделать далеко идущие выводы.

1. Пики дифференциальной проводимости, обнаруженные на вольт-амперных характеристиках гибридной системы $\text{Au-Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ при низкой плотности тока и возникающие в режиме полностью спин-поляризованного объема, позволяют говорить о наблюдении новых магнетонных ветвей в магнитных Вейлевских полуметаллах.

2. ВАХ, полученные при измерении систем Ni-WTe_2 $\text{Au-Ti}_2\text{MnAl}$, их сильная температурная зависимость и нетривиальная эволюция пиков дифференциального сопротивления во внешнем

магнитном поле дают основание говорить о наблюдении спин-поляризованного переноса через поверхностные состояния в вейлевских полуметаллах.

3. Экспериментально исследован спин-поляризованный транспорт через систему Au-монокристаллический CoSi. Обнаружена индуцированная током спиновая поляризация. Все найденные особенности ВАХ свидетельствуют о влиянии спин-орбитального взаимодействия на поверхностный ферромагнетизм в киральном топологическом полуметалле.

4. Впервые исследован нелинейный эффект Холла в немагнитных трёхмерных топологических полуметаллах Вейля и Дирака. Показано, что сигнал нелинейного эффекта Холла имеет нечётную зависимость от внешнего магнитного поля, в отличие от сигнала термоэдс, демонстрирующего чётную зависимость.

5. Гармонический анализ Холла был впервые использован для исследования спиновых текстур на поверхности топологического полуметалла с узловой линией – магнитных скирмионов. Продемонстрирована нетривиальная зависимость поперечного сигнала на второй гармонике от магнитного поля.

Теперь замечания. Начну с имеющих общий характер.

По существу, непосредственно измеряемыми в экспериментах диссертанта являются продольное R_{xx} и поперечное R_{xy} дифференциальные сопротивления, а также сигнал второй гармоники $V_{2\omega}$ как функции пропускаемого через исследуемую систему постоянного тока. И их основной, надо сказать, красивой в своем разнообразии, особенностью является остроты пики R_{xx} и R_{xy} , возникающие при определенных значениях тока. Очевидно, что ясная физическая интерпретация указанных пиков является одной из основных задач диссертации. К сожалению, она подменяется типичной топологической фразеологией, ничего не дающей для построения ясной физической картины того, как особенности наблюдаемых ВАХ отражают, к примеру, формирование магнитных мод или индуцированной током спиновой поляризации. Слова "магнитные моды", "спиновая поляризация", "магнитные скирмионы", "спиновые текстуры и торки" произносятся, а тому, почему они могут приводить к пикам R или видоизменять их внятного объяснения не дается.

При анализе паразитных эффектов, могущих исказить сигнал второй гармоники, автор правильно говорит о термоэдс, но ничего не говорит о другом намного более очевидном эффекте - её генерации вследствие неомичности контактов.

Второе замечание касается терминологии. Нелинейным эффектом Холла в диссертации называется поперечная компонента сопротивления, существование которой естественно для

любой анизотропной системы. Но диссертант, правда, не сам, а следуя многочисленной армии любителей броских фраз на пустом месте, пренебрегает тем, что эффект Холла является физическим явлением, возникающим только при наличии магнитного поля,

Форма изложения материала диссертации производит впечатление наличием заметного хаоса. К примеру, немалая часть третьей главы внезапно всплывает во введении. Да и с главами непросто разобраться, поскольку в тексте они нередко называются частями. Как водится, в силу своей молодости диссертант страдает чрезмерным употреблением англицизмами. Но употребление в подписи к рисункам "колормепа" произвело особое впечатление.

Более мелкие замечания.

1. Не один и не два раза встречаются ${}^2_3\text{He}$ и ${}^2_4\text{He}$. Чтобы это означало?
2. Показанная на рис.26 схема является двухточечной, но диссертант приводит ее в качестве примера четырехточечной.
3. Бросается в глаза любовь автора к слову "подавляется". Скажем, вместо того чтобы написать стандартную фразу, что величина пиков при повышении температуры уменьшаются, а затем они просто исчезают, автор пишет грозное "полностью подавляются".

Нередки в тексте диссертации и всякого рода смысловые и стилистические казусы. Приведем наиболее яркие. Читаем на стр.5 "...создание гетероструктур...и, как следствие, проведение транспортных экспериментов", на стр. 58 "непрерывная температурная зависимость", а на стр.61 "пики...исчезают из-за размытия температуры". Самый замечательный встретился на стр. 68 "ссылка [117] настаивает на практически центросимметричной структуре". Особую прелесть придают ему две лишние запятые.

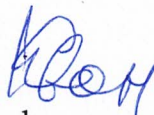
Оценивая диссертацию в целом можно сказать, что она представляет собой работу высокого научного уровня, который хаотическая подача материала парадоксальным образом только подтверждает. Видно, что Есин В.Д. делал ее увлеченно и азартно. Замечания оппонента носят частный характер и не требуют изменения ни основных результатов, ни защищаемых положений. **Достоверность и обоснованность** полученных диссертантом результатов очевидны. Это подтверждается публикациями ее результатов в ведущих физических журналах мира, начиная с Писем в ЖЭТФ и кончая PRB, а также выступлениями с многочисленными докладами как на российских, так и на международных конференциях. Результаты можно рекомендовать для использования в ФИАН, ФТИ им. Иоффе, ИПТМ РАН, ИРЭ РАН, ИФМ РАН, ИФП СО РАН. И в этом заключается несомненная **практическая значимость** работы.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на многочисленных российских и международных конференциях, а также на семинарах ИФТТ РАН и ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Они также опубликованы в 6 статьях в научных реферируемых журналах, индексируемых международной реферативной базой данных Web of Science и даже в патенте на изобретение. Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации.

Переходя к заключению можно сказать, что диссертационная работа Есина Варнавы Денисовича, удовлетворяет всем требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а соискатель заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент



Квон Дмитрий Харитонович - доктор физико-математических наук, профессор, член-корр. РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН), заведующий лабораторией физики низкоразмерных электронных систем.(01.04.10 – физика полупроводников) Новосибирск, пр. Лаврентьева, 13, 6300090, Россия

7-383-3306733

kvon@isp.nsc.ru

Подпись сотрудника ИФП СО РАН Квона Дмитрия Харитоновича заверяю

Ученый секретарь ИФП СО РАН
канд. физ.-мат. наук.



Аржанникова София Андреевна