

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Варнавы Денисовича Есина «Транспорт в топологических полуметаллах в нелинейном режиме: спиновый диод и нелинейный эффект Холла», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Диссертация Есина В.Д. посвящена экспериментальным исследованиям нелинейных эффектов в полуметаллах Вейля, которые с недавних пор привлекают большое внимание физиков в связи с открытием в них топологически устойчивых поверхностных состояний, имеющих нетривиальную спиновую структуру и, кроме того, потенциальные перспективы применений в электронике и спинтронике. Изучение особенностей прохождения тока (транспортные измерения) в магнитном поле через структуры на основе таких материалов позволяет изучать их уникальные физические электронные свойства, в том числе магнитные и спиновые. Таким образом, **актуальность данных исследований не вызывает ни малейших сомнений.**

Диссертация состоит из введения, 3-х глав и заключения. Во **введении** обоснована актуальность тематики, сформулированы все требуемые пункты, в том числе положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор научной литературы, связанной с выбранной тематикой. Вначале в ней описываются основные представления о полуметаллах Вейля и Дирака, в том числе результаты фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением для визуализации Ферми поверхностей («арок») поверхностных состояний в этих материалах. Далее кратко приводятся основные, в основном исторические, сведения о динамике намагниченности в «ферромагнитной многослойке» («спиновом диоде»). В конце главы обсуждается нелинейный эффект Холла в топологических материалах.

Во второй главе описывается методика выращивания кристаллов в лаборатории Физико-химических основ кристаллизации ИФТТ РАН и методика изготовления из этих кристаллов образцов для экспериментальных исследований, в том числе оригинальная методика прижима к подложке и контактам. В конце главы описана схема электрических измерений и система охлаждения образца до низких температур.

В третьей главе приведены оригинальные экспериментальные результаты измерений, полученные на изготовленных образцах. В **разделе 3.1** исследуется зависимость дифференциального сопротивления, измеренного трехконтактной методикой, от плотности тока через образец $Co_3Sn_2S_2$ в магнитном поле. Возникающие пики в этой зависимости связываются со спин-волновыми или магнонными возбуждениями, появляющимися в результате спин-зависимого рассеяния между «фиксированным» и «свободным» ферромагнитными слоями, причем объем кристалла служит источником спин-поляризованных носителей (фиксированный слой), а спин-поляризованные поверхностные состояния представляют собой свободный слой, магнитный момент которого меняется/управляется. В **разделе 3.2** той же трехточечной методикой исследуются транспортные свойства интерфейсов $Ni - WTe_2$, т. е. ферромагнитный контакт – немагнитный (в объеме) полуметалл Вейля, и $Au - Ti_2MnAl$, т.е. немагнитный контакт и ферромагнитный (в объеме) полуметалл Вейля. Из того, что общим для этих структур является наличие поверхностных состояний с нетривиальной спиновой

структурой, делается вывод о том, что наблюдаемые в дифференциальном сопротивлении пики связаны с «магнонными возбуждения в топологических поверхностных состояниях». В разделе 3.3 в рамках того же подхода продемонстрированы множественные пики для кристалла $CoSi$. В последующих разделах исследуется нелинейный эффект Холла в немагнитных вейлевском полуметалле WTe_2 и дираковском полуметалле Cd_3As_2 (разделе 3.4), в магнитном вейлевском полуметалле $Co_3Sn_2S_2$ (раздел 3.5) и в магнитном полуметалле с узловой линией Fe_3GeTe_2 (раздел 3.6).

В заключении сформулированы основные результаты проделанной работы.

Достоверность полученных экспериментальных данных не вызывает сомнений. Работы диссертанта опубликованы в известных российских и международных журналах, докладывались на различных конференциях и научных семинарах, включая семинар в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

В то же время не могу не отметить, что к тексту диссертации имеются замечания и вопросы.

1. Ясность физического изложения некоторых результатов оставляет желать лучшего. Вот некоторые примеры:

- отсутствует физически понятное объяснение ключевого для понимания работы механизма возбуждения «спиновой прецессии» в «ферромагнитных многослойках», о котором впервые идет речь в разделе 1.2.

- на стр. 40 написано: «магнонные ветви в магнитных полуметаллах Вейля, ... можно понимать, как результат связи между двумя магнитными моментами, опосредованной фермионами Вейля». Та же самая фраза и без каких-либо пояснений встречается на стр. 23, 45 и 83. Хотелось бы понять, что это значит?

- на стр. 46: «спин-неполяризованный ток от золотых дорожек инжектируется в магнитоупорядоченный вейлевский полуметалл $Co_3Sn_2S_2$, что создает спиновую прецессию, или, другими словами, спин-волновое возбуждение». В этом месте диссертации, по-моему, непонятно почему это может происходить.

- на стр. 70 написано: «сообщалось о гигантском аномальном эффекте Холла [53,54] для ферромагнетика $Co_3Sn_2S_2$, что является признаком существования магнитной фазы Вейля». Что такое магнитная фаза Вейля я в тексте диссертации не нашел.

2. Неаккуратность в использовании ссылок на литературу, особенно при цитировании теоретических работ. Некоторые примеры:

- стр. 37 «... ожидать сложную, индуцированную током динамику намагниченности и для поверхностных магнитных текстур в топологических полуметаллах [12,35].» В ссылке [12] обсуждаются исключительно объемные (трёхмерные) спиновые текстуры в объеме материала, как и в ссылке [35] в части динамики намагниченности.

- Стр. 44-45 «В используемой модели, положение пика I_{sw} описывается уравнением...». Приведенное далее уравнение фактически приведено без ссылок. Оно вовсе отсутствует в обсуждаемых выше (и ниже) работах [10],[25]. В наиболее близкой работе [26] приведено похожее уравнение, но всё же в заметно отличающемся виде. Кроме того, про входящее в это уравнение анизотропное поле, как и вообще про анизотропию в измеряемых образцах, не сказано ничего (ни выше, ни ниже). Физическое содержание модели также не пояснено. И, кстати, в ссылке [10] указано название совершенно другой работы.

• стр. 47 «...можно ожидать индуцированную током спиновую динамику [84] для поверхностных магнитных текстур ...». В указанной ссылке [84] нет никакой динамики, т. к. изучается транспорт на постоянном токе.

3. Характеризация структур могла бы быть более полной. Так, например, в первой главе, представляющей обзор литературы, приведены данные фотоэлектронной спектроскопии только с не относящимся к работе полуметаллами Вейля. Не приведены данные о монодоменности образцов в разделе 3.1, хотя в конце раздела есть ссылка на работу 152, а в разделе 3.2 наоборот – о многодоменности. В разделе 3.1-3.4 не приведены обычные вольт-амперные характеристики. В разделах 3.1-3.3 они принципиально важны для того, чтобы показать омичность контактов, а в разделе 3.4, соответственно, осталось не показано, что эффект не связан с нагревом образца.

4. Из представленного в разделах 3.1-3.3 анализа осталось не ясно, с какими именно спин-волновыми возбуждениями (магнонами) связаны пики дифференциального сопротивления, т. е. с какими конкретно модами (и с какими волновыми векторами) связаны конкретные пики.

5. Для оценки максимальной плотности тока на стр. 44 считалось, что площадь соприкосновения кристалла с золотом определяется чисто геометрическим пересечением. Не может ли быть реальная площадь контакта существенно меньше и, соответственно, плотность тока выше, из-за неоднородной «ступенчатой» поверхности кристалла? Не проявляются ли в таком контакте туннельные особенности?

Сделанные замечания, хотя и существенно усложняют понимание работы, тем не менее не являются препятствием для защиты диссертационной работы. На мой взгляд, представленная работа полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК, а ее автор, Есин Варнава Денисович, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент

Кандидат физико-математических наук (01.04.10 – физика полупроводников), старший научный сотрудник лаборатории № 184 «Методы получения тонких пленок и пленочных структур» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова,

Адрес: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, к. 7,

тел. (917)5563494,

e-mail: zagorodnev@phystech.edu

И.В. Загороднев

Загороднев Игорь Витальевич

09 ноября 2023

Я, Загороднев Игорь Витальевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.136.01 (Д 002.100.02), и их дальнейшую обработку. *И.В. Загороднев*

Подпись И.В. Загороднева заверяю
ученый секретарь ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

И.И. Чусов
Чусов И.И.

