

Утверждаю  
зам.директора по научной работе  
доктор физико-математических наук



Брунков П.Н.

2 ноября 2023 года

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) на диссертационную работу 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»

**Актуальность темы** диссертационной работы заключается в предмете ее исследования, так как топологические полуметаллы представляют из себя новый и не полностью изученный класс объектов исследования. Ключевой особенностью данных материалов является нетривиальный энергетический спектр, благодаря которому в нем существуют топологически защищенные поверхностные электронные состояния. При этом существование таких состояний подтверждается с помощью методики фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES), которая демонстрирует сложную форму таких состояний в импульсном пространстве, приводящая к образованию так называемых «Ферми-арок». При этом наличие сильной спин-орбитальной связи приводит к появлению новых нетривиальных эффектов, составляющих предмет исследования данной работы.

В частности, существуют теоретические предпосылки для исследования динамики намагниченности, вызванной протеканием электрического тока большой плотности в структурах на основе топологических материалов. Таким образом, формируется одно из направлений представленной диссертации – исследование спинового диода на основе топологического материала – магнитной структуры, состоящей из двух ферромагнитных слоёв с разной толщиной. В качестве одного из слоёв, в данном случае, может выступать спин-поляризованный объём топологического полуметалла или поверхностный слой с топологически защищенными поверхностными состояниями.

Вторым направлением диссертации является исследования нелинейного эффекта Холла в магнитных и немагнитных топологических полуметаллах. Теоретически предсказано существование данного эффекта в исследуемом классе материалов. Так как существование поверхностных состояний основано на отличной от нуля кривизне Берри в импульсном пространстве, то прямой демонстрацией её наличия в транспортном эксперименте служит наблюдение нелинейного эффекта Холла.

Экспериментальное исследование таких систем представляется актуальным, поскольку отклик поверхностных состояний в таких транспортных экспериментах всё ещё не до конца изучен и вышеупомянутые явления должны демонстрировать сложное поведение в магнитном поле.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертация Есина В.Д. состоит из введения, 3-х глав и заключения. Полный объём представленной диссертации составляют 96 стр., включающих в себя основной текст и 53 иллюстрации. Список используемой литературы насчитывает 155 наименований.

**Во введении** представленной диссертационной работы описана актуальность выбранной тематики, поставлены цели, задачи и сформулированы методы их решения. Кроме того, в этом разделе описывается научная и практическая значимость работы, степень её достоверности и апробация работы. Также в нём перечислены положения, выносимые на защиту и описана научная новизна проведённых исследований. В конце приведён личный вклад автора диссертационной работы.

**В первой главе** диссертации проведён обзор литературы по исследуемой тематике. Первый параграф раскрывает понятие топологического материала и показано образование топологически защищённых поверхностных состояний и их реализации в твёрдом теле («Ферми-арки»). Также, в данной главе была произведена классификация исследуемых материалов на топологические полуметаллы Вейля и Дирака, а также полуметаллы с узловой линией. Качественно продемонстрирована разница между исследуемыми типами материалов и их значимость для данной работы. Второй параграф представляет из себя краткий ретроспективный взгляд на проблематику исследования, а именно, рассмотрена модель генерации спин-волновых возбуждений с помощью электрического тока в ферромагнитных многослойных структурах. Заключительный, третий параграф посвящён обзору второго направления диссертации – исследованию нелинейного эффекта Холла в топологических материалах. Приведены теоретические предпосылки для существования данного эффекта в нескольких классах материалов-кандидатов, среди которых находится класс топологических материалов, лежащий в основе исследований по теме диссертации. Дополнительно, описана актуальность исследования данного эффекта в магнитных топологических материалах.

**Вторая глава** диссертации является оригинальной и полностью посвящена вопросам постановки эксперимента, начиная с методики изготовления образцов и заканчивая описанием проведения транспортных измерений в условиях низких и сверхнизких температур, а также при наличии сильного магнитного поля. В первом параграфе описан процесс роста всех исследуемых в диссертации кристаллов. Второй параграф посвящён методике изготовления образцов на основе запатентованной технологии, которая заключается в изготовлении контактов к тонким трёхмерным чешуйкам слоистых кристаллов. Также в параграфе описаны процессы оптической фотолитографии и термического напыления, как часть методик, направленных на изготовление образцов. В третьем параграфе упомянуты условия работы с низкими температурами, рассмотрен принцип работы криостата на жидком гелии  ${}^4\text{He}$ , а также криостата растворения, работающего на циркуляции изотопов  ${}^3\text{He}$ . Кроме того, в

параграфе описана методика генерации магнитного поля с помощью сверхпроводящего соленоида. В последнем, четвёртом параграфе затрагиваются аспекты электрической схемы, с помощью которой проводились все измерения, посвящённые данной работе. Описаны трёхточечные и четырёхточечные схемы измерения с заданием электрического тока для исследования интерфейсных эффектов и нелинейного эффекта Холла, соответственно.

В третьей главе, приведены оригинальные экспериментальные результаты, полученные диссертантом. В ней впервые продемонстрированы теоретически предсказанные спин-волновые возбуждения (магноны) в ферромагнитном топологическом полуметалле  $Co_3Sn_2S_2$ . Также, показано влияние спин-поляризованных поверхностных состояний на полученные результаты. Дополнительно, были проведены аналогичные транспортные эксперименты с другими топологическими материалами – были созданы две интерфейсные структуры с магнитным и немагнитным вейлевскими полуметаллами, что позволило показать ключевую роль поверхностных состояний и продемонстрировать схожие результаты на других системах. Одним из созданных интерфейсов является контакт между нормальным слоем золота и магнитным полуметаллом Вейля  $Ti_2MnAl$ . Другой – контакт между ферромагнитным слоем никеля и немагнитным вейлевским полуметаллом  $WTe_2$ . Несмотря на разнородность используемых материалов, экспериментально были показаны одинаковые с качественной точки зрения результаты. Общим для используемых структур является только поверхностные состояния в вейлевских полуметаллах, что демонстрирует их ключевую роль в полученных результатах. Сильная зависимость от температуры и необычная эволюция магнонных пиков во внешнем магнитном поле подтверждают спин-поляризованный перенос через поверхностные состояния. Кроме того, в диссертации был экспериментально исследован спин-поляризованный транспорт в киральном, монокристаллическом  $CoSi$ . Как и в предыдущих работах, была показана индуцированная током спиновая поляризация, а также появление магнонных мод и их необычная эволюция в магнитном поле, как эффект совместного поверхностного ферромагнетизма и спин-орбитальной связи в киральном топологическом полуметалле  $CoSi$ .

Вторым направлением в диссертационной работе стало исследование нелинейного эффекта Холла в немагнитных трёхмерных топологических полуметаллах  $WTe_2$  и  $Cd_3As_2$ , являющимися полуметаллами Вейля и Дирака, соответственно. Впервые, был продемонстрирован нелинейный сигнал, квадратичный по току, связанный с нелинейным эффектом Холла на второй гармонике. Также подтверждена нечётная зависимость полученного сигнала от внешнего магнитного поля, что отличается от сигнала термо-ЭДС, демонстрирующего чётную зависимость. Помимо этого, был исследован нелинейный эффект Холла для магнитного вейлевского полуметалла  $Fe_3GeTe_2$ . Данные материалы известны возникающим в них аномальным эффектом Холла, который демонстрирует классические петли гистерезиса, как и при прямых магнитометрических измерениях. Нелинейности на этих петлях должны проявлять себя в сигнале высоких гармоник, что и составляет мотивацию для проведения такого рода исследований. В работе была продемонстрирована нетривиальная зависимость поперечного сигнала на второй гармонике от величины внешнего магнитного поля с гистерезисом, наблюдаемом в сильных магнитных полях и плоской областью в слабых полях. Результатом исследования

нелинейного эффекта Холла в магнитных вейлевских полуметаллах стала демонстрация связи между гармоническим анализом Холла и нетривиальными спиновыми текстурами.

Кроме того, был исследован продольный и поперечный отклик на второй гармонике для магнитного вейлевского полуметалла  $Co_3Sn_2S_2$ , который известен аномальным эффектом Нернста в различных термоэлектрических устройствах. Результатом исследования стала демонстрация сложного взаимодействия нелинейного эффекта Холла и термоэлектрического отклика – в сильных магнитных полях, квадратичная зависимость сигнала на второй гармонике подтверждает теоретические предсказания, в то время как линейная зависимость в области слабых магнитных полей может отражать вклад как нелинейного эффекта Холла, так и вклада «Ферми-арок» в магнитотермический транспорт.

**В заключении** диссертационной работы были сформулированы основные результаты, полученные лично диссертантом.

**Наиболее важными результатами диссертации являются следующие:**

1. Впервые были продемонстрированы спин-волновые возбуждения для магнитного топологического полуметалла, ферромагнетика  $Co_3Sn_2S_2$ . Показана взаимосвязь между полученными результатами и топологически защищёнными поверхностными состояниями.

2. Для двух различных интерфейсов на основе топологических полуметаллов были обнаружены качественно одинаковые результаты, показывающие ключевую роль поверхностных состояний в генерации спин-волновых возбуждений.

3. В транспортном эксперименте было показано возникновение магнотных мод как результат взаимодействия эффектов поверхностного ферромагнетизма и спин-орбитальной связи в киральном топологическом полуметалле  $CoSi$ .

4. Впервые обнаружен нелинейный эффект Холла в немагнитных трёхмерных полуметаллах Вейля и Дирака. С помощью магнитного поля, продемонстрирована нечётная зависимость холловского сигнала, что подтверждает теоретические предсказания.

5. Для магнитного вейлевского полуметалла  $Co_3Sn_2S_2$  показано сложное взаимодействие эффектов нелинейного Холла и термоэлектрического отклика. Также, подтверждена квадратичная зависимость поперечного сигнала на второй гармонике в сильном магнитном поле.

6. Показана связь между гармоническим анализом Холла и необычными спиновыми текстурами, возникающими в результате сильной корреляции между спином и импульсом на поверхности топологического полуметалла с узловой линией  $Fe_3GeTe_2$ .

**Научная новизна работы** заключается в выполнении полного цикла работ, посвящённого исследованию транспортных свойств в магнитных и немагнитных топологических полуметаллах. В частности, исследование влияние топологически защищённых поверхностных состояний на генерацию спин-волновых возбуждений – показаны, качественно, одинаковые результаты для разных топологических материалов, общими для которых являются спин-поляризованные поверхностные состояния. Также, впервые исследован нелинейный эффект Холла в рассматриваемых материалах – с помощью внешнего магнитного поля получилось разделить в эксперименте вклад

нелинейного эффекта Холла от термоэлектрического отклика в исследуемом сигнале на второй гармонике. Также, удалось продемонстрировать связь между сигналом нелинейного эффекта Холла и нетривиальными спиновыми текстурами для магнитных топологических полуметаллов.

**Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов** обусловлена использованием современного научного оборудования, согласованность и воспроизводимость всех полученных экспериментальных результатов, а также соответствие полученных результатов с теоретическими предсказаниями и ранними исследованиями.

**Научная и практическая значимость работы** состоит в экспериментальных транспортных измерениях динамики намагниченности в магнитной структуре типа спиновый диод на основе магнитных топологических материалов в области низких и сверхнизких температур, а также магнитных полей. Немаловажными также являются исследования нелинейного эффекта Холла в магнитных и немагнитных топологических материалах. В совокупности, представленная диссертационная работа даёт возможность оценить вклад топологически защищённых поверхностных состояний в транспорт заряда.

#### **Замечания по диссертации:**

Имеется общее замечание как к тексту диссертации, так и к выступлению на семинаре. Автор не даёт ясного изложения физических эффектов, лежащих в основе исследуемых явлений. Второе положение выносимое на защиту сформулировано слишком размыто. Конкретные замечания сформулированы ниже:

1. Не пояснено качественно, почему происходит возбуждение спиновых волн из поверхностного слоя при пропускании тока, и как это связано с наблюдаемыми зависимостями дифференциальной проводимости от магнитного поля.
2. Не указано, симметричны ли кривые дифференциального сопротивления по направлению пропускания тока.
3. На экспериментальных картах дифференциальной проводимости от магнитного поля и пропускаемого тока видны пики, однако из текста не ясно, с чем это связано.
4. В диссертации говорится о возбуждении магнитных мод в исследуемых структурах при пропускании тока. Почему следует их ассоциировать именно со спин-волновыми возбуждениями, а не с другими спиновыми возбуждениями (например, с коллективным стоячим колебанием спиновой плотности).
5. Не пояснена причина пороговой зависимости от величины пропускаемого тока в дифференциальном сопротивлении.

Несмотря на все приведенные замечания, общая оценка диссертации остаётся высокой. Подводя итог, следует отметить, что диссертационная работа Есина Варнавы Денисовича демонстрирует высокую степень квалификации её автора в области экспериментальной физики. Автор диссертации освоил навыки и методики пользования современным научным оборудованием, а также знания и умения интерпретировать полученные экспериментальные результаты, продемонстрировал умение анализировать возможные физические причины наблюдаемых эффектов. Данные качества существенно повышают

достоверность и значимость представленных в диссертации результатов. Основные результаты диссертации опубликованы в шести статьях в высоко рейтинговых международных научных журналах, входящих в перечень ВАК, а также докладывались на ряде российских конференций. Автореферат диссертации полностью отражает её основное содержание.

По своему содержанию, объёму, новизне, достоверности, и практической значимости полученных результатов диссертация на тему «Транспорт в топологических полуметаллах в нелинейном режиме: спиновый диод и нелинейный эффект Холла» удовлетворяет требованиям, установленным "Положением о порядке присуждения степеней" п.п. 9, 11, 13, 14, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, и паспорту специальности 1.3.8, а её автор, Есин Варнава Денисович, заслуживает присуждения Ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 –«физика конденсированного состояния».

**Отзыв составлен по результат изучения диссертационной работы и выступления Есина Варнавы Денисовича на семинаре сектора теории оптических и электрических явлений в полупроводниках 2 ноября 2023 года.**

Аверкиев Никита Сергеевич, профессор, доктор физико-математических наук (01.04.10– физика полупроводников), главный научный сотрудник, заведующий сектором  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

«2» ноября 2023 г.

 Аверкиев Н.С.

Согласен на обработку персональных данных.


«2» ноября 2023 г.

 Аверкиев Н.С.

Подпись Аверкиева Н.С. заверяю:

Учёный секретарь

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, к.ф.-м.н.

 Патров М.И.

#### Сведения об организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (Ioffe Institute),  
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 26, (812) 297-22-45  
post@mail.ioffe.ru  
http://www.ioffe.ru