

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Ясюлевича Ивана Алексеевича «**Электрический и спиновый транспорт в хиральных гелимагнетиках и гетероструктурах на их основе**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Ясюлевича И.А. посвящена теоретическому исследованию спин-транспортных эффектов в металлах и полупроводниках при наличии неоднородностей внешнего магнитного поля и/или внутренних полей обменного происхождения. Гальваномагнитные явления в металлах и полупроводниках – магниторезистивный эффект и эффект Холла – обусловлены влиянием магнитного поля на движение электронов проводимости из-за наличия силы Лоренца. В спин-транспортных явлениях существенную роль может играть неоднородность магнитного поля. Можно ожидать, что квантовые спиновые эффекты, типа наблюдавшихся в экспериментах Штерна-Герлаха, будут влиять на электрические свойства проводящих магнитных материалов с неоднородным магнитным порядком. В таких материалах определяющую роль может играть не внешнее неоднородное магнитное поле, но и внутреннее эффективное магнитное поле, создаваемое атомами, спиновые моменты которых формируют неоднородную намагниченность. Таким образом, квантовые спиновые эффекты типа Штерна-Герлаха, можно ожидать в кристаллах с неоднородным магнитным порядком.

Важными представителями таких кристаллов являются гелимагнетики, в которых атомные магнитные моменты формируют спиральную структуру. Например, такой вид магнитного порядка реализуется в тяжёлых редкоземельных металлах, в большом классе проводящих кубических магнетиков без центра инверсии и ряде других соединений. Гелимагнетики, в которых спираль образуется из-за наличия взаимодействия Дзялошинского-Мория, получили название «хиральные гелимагнетики».

Недавно появились экспериментальные работы, в которых было показано, что в проводящих гелимагнетиках возникают электрический магнитохиральный и кинетический магнитоэлектрический эффекты. Электрический магнитохиральный эффект выражается в том,

что электросопротивление гелимагнетиков зависит от их магнитной хиральности и от относительной ориентации электрического тока и внешнего магнитного поля. Кинетический магнитоэлектрический эффект – это эффект, выражающийся в появлении намагниченности вдоль направления приложенного тока, создаваемой электронами проводимости и пропорциональной приложенному току. Направление этой намагниченности зависит от хиральности магнитной спирали.

В выполненных к настоящему времени работах по спин-зависящим гальваномагнитным явлениям вопросы учёта неоднородностей магнитного поля рассматривались лишь фрагментарно. Поэтому актуальной задачей является построение квантовой теории спин-транспортных явлений, пригодной для описания гальваномагнитных явлений в металлах и полупроводниках при наличии неоднородных внешних и/или внутренних магнитных полей, например, таких, как определенные выше электрический магнитохиральный и кинетический магнитоэлектрический эффекты.

В литературе имеется много публикаций, посвящённых изучению движения магнитной подсистемы проводящего ферромагнитного материала под действием протекающих токов. Установлено, что если через ферромагнетик протекает спин-поляризованный электрический ток, то вследствие обменного взаимодействия со спинами, локализованными на узлах кристаллической решётки, спиновый момент движущихся электронов может передаваться в магнитную подсистему магнетика. Это приводит к возникновению вращающего момента, действующего на намагниченность ферромагнетика при протекании через него спин-поляризованного электрического тока. Естественно предположить, что при протекании электрического тока в гелимагнетиках из-за передачи спинового момента (PCM), происходящей одновременно в каждой точке спирали намагниченности, может возникнуть движение спирали намагниченности в виде гармонического вращения вокруг своей оси с течением времени. Этот эффект также подробно исследуется в диссертации в рамках общего формализма.

Структура и основное содержание работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, 6 глав, заключения, списка литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 151 страницу, 33 рисунка, 4 таблицы. Список литературы содержит 184 наименования на 15 страницах.

Во **введении** приведено обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, научная и практическая значимость работы. Также приводятся положения, выносимые на защиту, обоснование достоверности и апробация результатов на конференциях, данные о публикациях, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертации.

В **первой** главе представлен краткий обзор основных литературных данных, посвящённых влиянию геликоидального магнетизма на зарядовые и спиновые токи, влиянию зарядовых и спиновых токов на геликоидальный магнетизм, особенностям инжекции чисто спинового тока в геликоидальные магнетики.

Во **второй** главе формулируется теория, используемая в дальнейшем для описания спинового и зарядового транспорта в металлах с неоднородной намагниченностью. Построенная квантовая теория электронного спинового транспорта в проводящих магнетиках может применяться для описания новых гальваномагнитных явлений, обусловленных действием на спин электронов проводимости сил, создаваемых пространственно-неоднородными магнитными полями произвольной пространственной конфигурации – как внешними, так и внутренними полями квантового обменного происхождения.

В **третьей** главе, используя полученную во второй главе систему уравнений для плотностей и потоков, было показано, что действие на электроны проводимости, обладающие магнитным моментом, неоднородного в пространстве обменного поля, приводит к возникновению в гелимагнетиках электрического магнитохирального и кинетического магнитоэлектрического эффектов. Предсказано новое физическое явление – резонансное усиление электрического магнитохирального и кинетического магнитоэлектрического эффектов до гигантских величин, получившее название «магнито-хиральный кинетический резонанс» (МХКР). Явление МХКР возникает, если магнитный момент электрона, движущегося вдоль оси геликоида, прецессирует во внешнем магнитном поле синхронно с изменением направления внутреннего обменного поля. Определены условия экспериментального наблюдения МХКР.

В **четвертой** главе представлена теория, пригодная для описания эффекта передачи спинового момента (ПСМ) в проводящих хиральных гелимагнетиках.

В **пятой** главе описано влияние эффекта передачи спинового момента на электросопротивление хиральных гелимагнетиков.

В **шестой** главе развита теория, пригодная для описания инжекции в гелимагнетик чисто спинового тока, возникающего в немагнитном металле вследствие спинового эффекта Холла. Рассмотрен контакт немагнитного металла с сильным спин-орбитальным взаимодействием и гелимагнитного металла, в котором спин-орбитальное взаимодействие пренебрежимо мало.

В **заключении** приведены обобщенные результаты и выводы по диссертационной работе.

Научная новизна результатов диссертационной работы

К **новым научным результатам**, представляющим наибольший научный интерес, можно отнести:

1. Объяснение электрического магнитохирального эффекта и кинетического магнитоэлектрического эффекта в хиральных гелимагнетиках.

2. Формулировку теории передачи спинового вращающего момента от электронной подсистемы в подсистему локализованных моментов, в рамках которой удастся объяснить взаимосвязь направления движения магнитного геликоида, направления тока электронов проводимости и хиральности магнитной спирали.

3. Построение теории, объясняющей влияние эффекта передачи спинового момента на электросопротивление хиральных гелимагнетиков.

4. Теоретическое описание явлений, возникающих при инжекции поперечно-поляризованного спинового тока из немагнитного металла с сильным спин-орбитальным взаимодействием в хиральный гелимагнетик.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается обоснованным выбором физических приближений, использованием широко апробированных методов и подходов для описания кинетики, а также согласием с экспериментальными данными и данными предыдущих теоретических работ.

Практическая значимость полученных результатов

Построенная теория может быть использована в качестве теоретической основы для конструирования спиновых устройств, в которых хиральные проводящие гелимагнетики будут использованы как функциональный компонент.

Результаты диссертации были широко представлены на Всероссийских и международных конференциях, опубликованы в реферируемых журналах из списка ВАК. Используемые в работе методы, применяются во многих областях физики конденсированного состояния, поэтому полученные результаты могут оказаться полезными при решении задач, связанных с другими физическими системами.

Замечания по диссертационной работе

По диссертации имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. В литературном обзоре (стр. 27) перечисляются работы, посвященные теоретическим исследованиям спектра связанных спиновых и упругих волн в геликоидальных магнетиках. Приводятся ссылки на работы [106, 107], в которых рассматривались коническая и спиральная фазы моноосиального гелимагнетика. Для полноты следовало бы отметить работу [A. A. Tereshchenko, A. S. Ovchinnikov, Igor Proskurin, E. V. Sinitsyn, and Jun-ichiro Kishine, Theory of magnetoelastic resonance in a monoaxial chiral helimagnet. Phys. Rev. B 97, 184303 (2018)], в которой был рассчитан спектр связанных магнитоупругих волн фазы солитонной решетки моноосиального хирального гелимагнетика.
2. Перед формулой (2.27) стоит фраза "Можно показать..." и затем приводится сама формула. Следовало бы привести соответствующую ссылку.
3. На стр. 52 имеется фраза: "Хиральные магнетики как материалы, демонстрирующие спин-зависящие эффекты не взаимности, привлекают все больший интерес, поскольку в них нарушается как симметрия пространственной инверсии, так и симметрия обращения времени". Вообще говоря, симметрия обращения времени не обязана нарушаться, определение хиральности, учитывающее время, требует нарушения пространственной четности и

сохранения симметрии обращения времени. Последнюю можно нарушить, например, внешним магнитным полем.

4. При численной оценке получаемых соотношений (это касается тех разделов диссертации, где такая оценка проводится) самым "уязвимым" местом является оценка времен релаксации (например, диффузионная скорость релаксации, скорость спин решёточной релаксации). Стоит признать, что автор диссертации честно указывает на эту проблему, но остается впечатление, что теория применима только к металлическим системам, а ее использование для полупроводниковых систем уже не так очевидно. Кроме того, в заключении можно было бы предложить схему экспериментов по измерениям этих величин, или отметить теоретические работы, в которых проводились соответствующие вычисления для других систем.

5. На стр. 67 имеется фраза: "Экспериментальные доказательства существования кинетического магнитоэлектрического эффекта недавно были получены в работе [89], где изучался ядерный магнитный резонанс в теллуре – немагнитном полупроводнике с сильным спин-орбитальным взаимодействием, имеющем хиральное атомное упорядочение". Не совсем ясно, как этот пример связан с гелимагнетиками. Действительно, имеется атомная структурная хиральность, но напрямую этот пример не связан с гелимагнетиками, обсуждаемыми в диссертации.

6. При обсуждении деформации конической структуры при движении никак не упоминается связь этого явления с работами Дёрринга о деформации доменных стенок при движении за счет генерации размагничивающих полей [W. Döring, Z. Naturforsch. B 3a, 374 (1948)]. Эффект носит достаточно универсальный характер для неоднородных магнитных структур и вполне уместно было бы вставить данную ссылку.

7. В разделе 4.3 при рассмотрении продольной составляющей намагниченности, возникающей при протекании тока, учитываются решения, не зависящие от координаты z . Возможны ли в данной теории пространственно-модулированные решения, зависящие от этой координаты?

8. В разделе 5.1 система уравнений движения для намагниченности дополняется уравнениями Максвелла, поскольку движение намагниченности порождает неоднородное переменное электромагнитное поле. Как такой подход согласуется с теорией Воловика [G.E. Volovik, J. Phys. C.: Solid State Phys. 20, L83 (1987)] о генерации электрического и магнитного полей динамической неоднородной намагниченностью?

9. Рис. 5.4 дает слабое представление о том, как будет вести себя полное сопротивление, было бы полезно добавить соответствующий график для экспериментальной проверки.

10. Имеются ли какие-либо экспериментальные работы по структурам «металлический гелимагнетик-немагнитный металл», обсуждаемым в главе 6? Данный вопрос возник после следующего утверждения, содержащегося в конце раздела 6.6: "Отметим, что полученные результаты для гелимагнетика ... применимы для качественного описания картины инжекции чисто спинового тока в большом классе проводящих кубических длиннопериодных гелимагнетиков без центра инверсии: $MnSi$, $Fe_{1-x}Co_xSi$, $Mn_{1-x}Fe_xSi$, $Mn_{1-x}Co_xSi$, $MnGe$, $Mn_{1-x}Fe_xGe$, $Fe_{1-x}Co_xGe$."

Отмеченные замечания, как и встречающиеся погрешности стиля и оформления, не снижают общей положительной оценки диссертации.

Заключение (выводы о работе)

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне с привлечением современных вычислительных средств. На защиту выносятся ряд новых важных результатов, представляющих большой интерес для раздела теоретической физики, связанного с описанием кинетических явлений в магнитных средах. Материал диссертации в полной мере представлен в опубликованных работах, а автореферат точно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Ясюлевича И.А. «Электрический и спиновый транспорт в хиральных гелимагнетиках и гетероструктурах на их основе» по актуальности решаемых задач, степени достоверности, научной новизне и практической значимости

результатов, полностью отвечает требованиям ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (с последующими изменениями)), а ее автор, Ясюлевич Иван Алексеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук, доцент,
Доцент кафедры теоретической
и математической физики Института
естественных наук и математики ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Бострем Ирина Геннадьевна

03.06.2024,

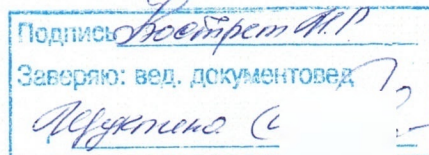
Контактные данные:

Тел.: 89222036308, E-mail Irina.Bostrem@urfu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация 01.04.11 – «Физика магнитных явлений»,

Адрес места работы:

620002, г. Екатеринбург, пр. Ленина 48, УрФУ



С отзывом ознакомлен

04.06.2024

с

/ Ясюлевич И.А. /

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Бострем Ирина Геннадьевна

Ученая степень, звание: кандидат физико-математических наук, специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений, доцент

Полное наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Должность: доцент кафедры теоретической и математической физики Института естественных наук и математики

Почтовый адрес: 620002. г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 48

Тел.: +7(343)2694431

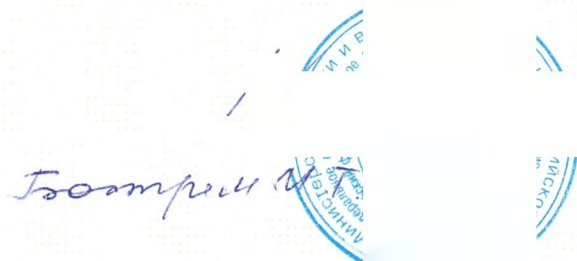
E-mail: Irina.Bostrem@urfu.ru

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. Bostrem, I. G. Theory of spin current in chiral helimagnets / I. G. Bostrem, J. Kishine, A. S. Ovchinnikov. – Текст: непосредственный // Phys. Rev. B. – 2008. – Vol. 78. – № 6. – P. 064425.
2. Bostrem, I. G. Transport spin current driven by the moving kink crystal in a chiral helimagnet / I. G. Bostrem, J. Kishine, A. S. Ovchinnikov. – Текст: непосредственный // Phys. Rev. B. – 2008. – Vol. 77. – № 13. – P. 132405.
3. Теория антиконтинуального предела для спиновых гамильтонианов: поиск дискретных бризерных мод / И. Г. Бострем, А. С. Овчинников, Е. Г. Екомасов, В. Е. Сеницын, А. Е. Федоров, А. А. Воронина. – Текст: непосредственный // Теоретическая и математическая физика. – 2023. – Т. 214. – № 2. – P. 291-307.
4. Численное моделирование дискретных магнитных бризеров в гайзенберговских спиновых цепочках с дополнительными взаимодействиями / И. Г. Бострем, Е. Г. Екомасов, А. С. Овчинников, В. Е. Сеницын, М. И. Фахретдинов. – Текст: непосредственный // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68. – № 1. – P. 75-82.
5. Discrete Magnetic Breathers and Their Stability in a Finite-Size Monoaxial Chiral Helimagnet / I. G. Bostrem, V. E. Sinitsyn, M. V. Mokronosov, A. S. Ovchinnikov, J. Kishine, E. G. Ekomasov,

М. I. Fakhretdinov. – Текст: непосредственный // IEEE Transactions on Magnetics. – 2022. –
Vol. 58. – № 2. – P. 1-4.

Босирин И. Г.



Подпись Босирин И. Г.
Заверяю: вед. документовед. /
С. В. Шумов