

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

Исследование особенностей протекания электрических и спиновых токов в гелимагнетиках представляет значительный интерес из-за существования специфических эффектов невзаимности, выражающихся в появлении более выгодного направления для распространения спинового и зарядового транспорта. Эффекты невзаимности были недавно обнаружены экспериментально; кроме того, существование в гелимагнетиках эффектов невзаимности было использовано для создания новых спиновых устройств. Разработка микроскопической теории, способной объяснить механизмы невзаимного транспорта в гелимагнетиках и определить условия, при которых невзаимные эффекты проявляются наиболее ярко, представляет собой актуальную задачу как в теоретическом, так и в практическом плане для описания работы спиновых устройств, в которых хиральные проводящие гелимагнетики будут использованы как функциональный компонент.

Недавно было экспериментально подтверждено, что электрический ток оказывает влияние на спираль намагниченности гелимагнетиков посредством эффекта передачи спинового момента. Очевидно, что такое воздействие тока на спираль намагниченности может существенно повлиять на работу спинового устройства, включающего в себя гелимагнетик. В связи с этим актуальной задачей является построение последовательной теории, описывающей эффект передачи спинового момента в проводящих гелимагнетиках.

Структура и основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения. Текст диссертации занимает 151 страницу. Список литературы содержит 184 наименования.

Во **введении** указана актуальность исследований, сформулированы цель и задачи исследования, отмечается научная новизна, теоретическая и практическая значимость

представляемой работы, достоверность результатов; представлены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен обзор литературных данных, посвящённых таким темам, как: гелимагнетизм, влияние гелимагнетизма на зарядовый и спиновый транспорт, влияние зарядового и спинового транспорта на гелимагнетизм, особенности инжекции чисто спинового тока в гелимагнетики.

Во **второй главе** приводится построение теории, пригодной для описания спинового и зарядового транспорта в неоднородно намагниченных проводящих кристаллах. Для построения теории был использован аппарат квантового кинетического уравнения. В главе продемонстрирован последовательный переход от описания системы электронов проводимости на языке квантовой функции распределения к описанию на языке плотности электронов, спиновой плотности, потока электронов и потока спинового тока. Для описания электронного спинового транспорта в гелимагнетиках $s-d$ -обменное взаимодействие электронов проводимости и локализованных электронов рассматривалось в приближении среднего поля.

В **третьей главе**, используя полученную во второй главе систему уравнений для плотностей и потоков, исследуется влияние гелимагнетизма на особенности зарядового и спинового транспорта. Рассмотрен случай неограниченного проводящего гелимагнетика с ориентацией векторов спирали намагниченности, постоянного однородного электрического и магнитного поля вдоль оси OZ . Используя систему уравнений, полученную во второй главе с учетом пренебрежения эффектов временной дисперсии спинового и зарядового тока, показано, что действие спирали намагниченности локализованных электронов на магнитные моменты электронов проводимости приводит к возникновению в гелимагнетиках электрического магнитохирального и кинетического магнитоэлектрического эффектов. Предсказано новое физическое явление – магнитохиральный кинетический резонанс, заключающееся в резонансном усилении данных эффектов при синхронной прецессии магнитного момента электрона, движущегося вдоль оси геликоида, с изменением направления внутреннего обменного поля.

В **четвертой главе** выполняется теоретическое описание влияния электрического тока на намагниченность хирального гелимагнетика посредством эффекта передачи спинового момента. Для описания эффекта передачи спинового момента система уравнений

для плотностей и потоков, полученная во второй главе, была дополнена уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта и уравнениями Максвелла. Показано, что передача спинового момента приводит к вращению спирали намагниченности вокруг ее оси под действием протекающего электрического тока. Как следствие, наблюдается трансформация магнитной структуры типа «простая спираль» в структуру типа «коническая спираль». Определено наивысшее возможное значение угла конусности спирали для металлических гелимагнетиков FeGe, MnSi, CrNb₃S₆ и Dy, составляющее 15°.

В **пятой главе** исследуется влияние возникающего вращения спирали намагниченности хирального гелимагнетика, вызванного протеканием электрического тока, на его электросопротивление. Принимая во внимание взаимосвязь между намагниченностью локализованных электронов и намагниченностью электронов проводимости, получено выражение электросопротивления гелимагнетика с учетом вклада от эффекта передачи спинового момента за счет вращения спирали намагниченности. Показано, что данный вклад в электросопротивление зависит от величины постоянной затухания Гильберта α и напрямую определяется величиной эффективного времени спиновой релаксации в случае большого значения параметра α .

В **шестой главе** приведено построение теории, пригодной для описания протекания чисто спинового тока, возникающего в условиях спинового эффекта Холла, в гетероструктурах: проводящий гелимагнетик – немагнитный металл с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Для описания спинового и зарядового транспорта в таких гетероструктурах система уравнений для плотностей и потоков, полученная во второй главе, была дополнена выведенными феноменологическими граничными условиями для потоков заряда и спина, позволяющими учесть возможность переворота спина электронов проводимости на поверхности контакта проводников. Показано, что затухание спинового тока, инжектированного вдоль оси магнитной спирали, определяется двумя характерными длинами. В случае высокопрозрачной границы раздела эффективность инжекции спинового тока в гелимагнетик будет тем выше, чем больше длина спиновой диффузии в немагнитном металле превышает длину свободного пробега электронов проводимости.

В **заключении** сформулированы выводы по результатам диссертационной работы, которые отражают выполнение поставленных задач диссертационной работы и достижение сформулированной цели.

Научная новизна результатов диссертационной работы

Новизна полученных результатов и их научная ценность заключаются в том, что в диссертации: разработан систематический подход для описания спин-транспортных эффектов в проводящих кристаллах при наличии неоднородностей внешнего магнитного поля или внутренних полей обменного происхождения; подход был успешно применен для описания известных и предсказания новых транспортных эффектов в хиральных гелимагнетиках; найдена частота вращения спирали намагниченности гелимагнетика, возникающего под действием электрического тока, которая выражена через параметры квантового обменного гамильтониана, задающего геликоидальное магнитное упорядочение в проводящем кристалле; установлено, что при возникновении вращения спиновой спирали под действием протекающего электрического тока электросопротивление гелимагнетика будет всегда меньше сопротивления гелимагнетика, в котором спиновая спираль неподвижна; исследованы особенности инжекции чисто спинового тока из немагнитного металла с сильным спин-орбитальным взаимодействием в гелимагнетик.

Достоверность результатов 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.

Основные результаты **апробированы** на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в восьми статьях в научных журналах, входящих в Перечень ВАК.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов заключается в том, что: построенная в работе теория позволяет предсказывать и исследовать новые спин-транспортные эффекты и гальваномагнитные явления в проводящих кристаллах; найденная связь электросопротивления и намагниченности электронов проводимости с хиральностью может быть использована для определения хиральности гелимагнетиков по результатам гальваномагнитных экспериментов; построенная теория может быть использована в качестве теоретической основы для конструирования спиновых устройств, в которых хиральные проводящие гелимагнетики будут использованы как функциональный компонент.

Замечания по диссертационной работе

В качестве замечаний к диссертационной работе можно указать следующие:

1. В оригинальных главах 3-6 фигурирует термин «численные расчеты». Однако из текста диссертационной работы остаются неясными некоторые детали расчетов. Например, какие численные методы, граничные условия, условия сходимости и критерии окончания итерационных процессов были применены? Кроме того, как известно, при использовании любого численного метода возникают погрешности, которые могут быть очень велики. В связи с этим, анализ погрешностей представляется неотъемлемой частью процесса решения прикладной задачи. Проводился ли соискателем такой анализ?
2. В главе 3 обсуждается определение хиральности спирали намагниченности гелимагнетика в рамках кинетического магнитоэлектрического эффекта. Однако способу определения хиральности спирали с помощью электрического магнитохирального эффекта не уделено должное внимание.
3. В диссертационной работе наряду с общеупотребимым термином «обратное время спиновой релаксации» используются редко употребляемые в литературе термины «скорость спиновой релаксации» и «частота спиновой релаксации». Для упрощения восприятия и понимания материала целесообразно было бы использовать термин «обратное время спиновой релаксации» по всему тексту диссертации.
4. Определения операций скалярных и тензорных произведений векторов и тензоров, используемых в диссертации, представлены сразу после их введения (см. стр. 46). В качестве рекомендации можно отметить, что определения этих операций можно было вынести в отдельное приложение, поскольку читатель сталкивается с ними во всех главах диссертации.

Указанные замечания являются незначительными, поскольку не затрагивают достоверность положений, представленных к защите, и не снижают общей положительной оценки работы.

Диссертация соответствует пункту 2 «Разработка теоретических моделей, объясняющих взаимосвязь магнитных свойств веществ с их электронной и атомной структурой, природу их магнитного состояния, характер атомной и доменной магнитных структур, изменение магнитного состояния и магнитных свойств под влиянием различных

внешних воздействий» Паспорта специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В заключении стоит отметить, что по объёму, достоверности, оригинальности полученных результатов, теоретической и практической значимости диссертационная работа «Электрический и спиновый транспорт в хиральных гелимагнетиках и гетероструктурах на их основе» соответствует всем квалификационным требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (с последующими изменениями) и предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Ясюлевич Иван Алексеевич, заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

профессор кафедры физики конденсированного состояния
ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»,
доктор физ.-мат. наук, доцент

В. В. Соколовский

« 15 » 05 2024 г.

Почтовый адрес: 454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129

Тел.: 799-71-17

E-mail: vsokolovsky84@mail.ru

Подпись В.В. Соколовского заверяю



С отзывом согласен

21.05.2024

/ Ясюевич И.А. /

Сведения об официальном оппоненте

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

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный университет»
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	ФГБОУ ВО «ЧелГУ»
Ведомственная принадлежность и тип организации	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, высшее учебное заведение
Место нахождения	454001, Уральский округ, Челябинская область, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных 129
Телефон	+7(351) 799-71-17
Email	vsokolovsky84@mail.ru
Фамилия, Имя, Отчество	Соколовский Владимир Владимирович
Ученая степень, ученое звание	Доктор физико-математических наук, доцент
Научная специальность	01.04.07 – физика конденсированного состояния
Должность	профессор кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»

Список публикаций в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. D.R. Baigutlin. Interplay of electronic structure and magnetism in Fe₂- and Rh₂-based Heusler alloys / D.R. Baigutlin, V.V. Sokolovskiy, V.D. Buchelnikov // Phys. Rev. B 107, 245130 (2023).
2. V. Sokolovskiy. Ab initio prediction of coexistence of two magnetic states in Mn₂YSn (Y = Sc, Ti, and V) Heusler alloys under applied pressure / V. Sokolovskiy, M. Zagrebin, D. Baigutlin, V. Buchelnikov // Comput. Mater. Sci. 228, 112365 (2023).
3. B. Wilfong. Helical spin ordering in room-temperature metallic antiferromagnet Fe₃Ga₄ / B. Wilfong, A. Fedorko, D.R. Baigutlin, O.N. Miroshkina, X. Zhouf, G.M. Stephen, A.L. Friedman, V. Sharma, O. Bishop, R. Barua, S.P. Bennett, D.Y. Chung, M.G. Kanatzidis, V.D. Buchelnikov, V.V. Sokolovskiy, B. Barbiellini, A. Bansil, D. Heiman, M.E. Jamer // J. Alloys. Compd. 917, 165532 (2022).
4. V.V. Sokolovskiy. Impact of local arrangement of Fe and Ni on the phase stability and magnetocrystalline anisotropy in Fe-Ni-Al Heusler alloys / V.V. Sokolovskiy, O.N.

- Miroshkina, V.D. Buchelnikov, M.E. Gruner // Phys. Rev. Mater. 6, 025402 (2022).
5. V.D. Buchelnikov. Prediction of a Heusler alloy with switchable metal-to-half-metal behavior / V.D. Buchelnikov, V.V. Sokolovskiy, O.N. Miroshkina, D.R. Baigutlin // Phys. Rev. B 103, 054414 (2021).
 6. V.D. Buchelnikov. Design of a Stable Heusler Alloy with Switchable Metal-to-Half-Metal Transition at Finite Temperature / V.D. Buchelnikov, V.V. Sokolovskiy, O.N. Miroshkina, D.R. Baigutlin, M.A. Zagrebin, B. Barbiellini, B. Singh, A. Bansil, and E. Lähderanta // Adv. Theory Simul. 4, 2100311 (2021).
 7. O.O. Pavlukhina. Phase transitions in Fe-(23–24)Ga alloys: Experimental results and modeling / O.O. Pavlukhina, V.V. Sokolovskiy, M.V. Matyunina, M.A. Zagrebin, O.N. Miroshkina, D.R. Baigutlin, V.D. Buchelnikov, A.K. Mohamed, V.V. Palacheva, V.A. Palachev, A.M. Balagurov, I.S. Golovin // J. Alloys. Compd, 885, 160917 (2021).
 8. Y. Sokolovskaya. A Ternary Map of Ni–Mn–Ga Heusler Alloys from Ab Initio Calculations / Y. Sokolovskaya, O. Miroshkina, D. Baigutlin, V. Sokolovskiy, M. Zagrebin, V. Buchelnikov, and A.T. Zayak // Metals, 11, 973 (2021).
 9. D.R. Baigutlin. Electronic structure beyond the generalized gradient approximation for Ni₂MnGa / D.R. Baigutlin, V.V. Sokolovskiy, O.N. Miroshkina, M.A. Zagrebin, J. Nokelainen, A. Pulkkinen, B. Barbiellini, K. Pussi, E. Lähderanta, V.D. Buchelnikov, and A. T. Zayak // Phys. Rev. B 102, 045127 (2020).
 10. M. Blinov. Effects of magnetic and structural phase transitions on the normal and anomalous Hall effects in Ni-Mn-In-B Heusler alloys / M. Blinov, A. Aryal, S. Pandey, I. Dubenko, S. Talapatra, V. Prudnikov, E. Lähderanta, S. Stadler, V. Buchelnikov, V. Sokolovskiy, M. Zagrebin, A. Granovsky, N. Ali // Phys. Rev. B 101, 094423 (2020).

Официальный оппонент:

профессор кафедры физики конденсированного состояния
ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»,
доктор физ.-мат. наук, доцент

В. В. Соколовский

« 15 » 05 2024 г.

Подпись В.В. Соколовского заверяю

