

УТВЕРЖДАЮ  
Директор Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки  
«Федеральный исследовательский центр  
«Казанский научный центр  
Российской академии наук»  
420111, Российская Федерация, Татарстан,  
г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31.  
Чл.-корр. РАН, д.ф.м.н. \_\_\_\_\_ Калачев А.А.  
« 7 » июня 2024 г.

### **ОТЗЫВ**

ведущей организации 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**

Теоретические и экспериментальные исследования тонкоплёночных магнитных гетероструктур привели к грандиозному прогрессу в хранении информации на магнитных носителях, а работы по энергонезависимой магниторезистивной памяти интенсивно ведутся, обещающая на выходе новое поколение модулей памяти, на один-два порядка превосходящей полупроводниковую по быстродействию и энергоэффективности. Идет поиск новых материалов и физических принципов реализации магниторезистивной памяти, которые обеспечат наилучшие потребительские характеристики. Поэтому работы по исследованию магниторезистивных свойств гелимагнитных материалов и гетероструктур на их основе **несомненно актуальны** как в фундаментальном, так и в прикладном аспектах.

#### **Структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и списка публикаций автора по теме диссертации, изложена на 151 странице машинописного текста, включает в себя 33 рисунка, 4 таблицы и список цитированной литературы из 184 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной тематики, научная значимость и практическая ценность проведенных исследований.

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

**Во второй главе** выполняется построение теории, пригодной для описания спинового и зарядового транспорта в неоднородно намагниченных металлах. Взаимодействие электронов проводимости с магнитной подсистемой локализованных электронов рассмотрено в рамках  $s-d$  обменной модели. В приближении среднего поля действие на спины электронов проводимости магнитной подсистемы локализованных электронов, обладающих намагниченностью  $M$ , описывается как действие эффективного обменного поля. Для описания электронного спинового транспорта в условиях действия на электроны проводимости неоднородных электрического и магнитного полей, использовалось квантовое кинетическое уравнение функции распределения. В локальном приближении «грязного металла», система уравнений для функции распределения была преобразована в систему уравнений для плотности электронов, вектора спиновой плотности, вектора плотности потока электронов и тензора плотности спинового тока. Полученная система уравнений для плотностей и потоков описывает широкий круг известных гальваномагнитных явлений в металлах и полупроводниках, а также может применяться для описания новых гальваномагнитных явлений, обусловленных действием на спин электронов проводимости сил, создаваемых пространственно-неоднородными магнитными полями внешнего и внутреннего происхождения произвольной пространственной конфигурации.

**В третьей главе**, используя полученную во второй главе систему уравнений для плотностей и потоков, 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. Был рассмотрен случай, когда в неограниченном проводящем гелимагнетике волновой вектор спирали намагниченности локализованных электронов  $q$ , вектор постоянного однородного магнитного поля  $B$  и вектор постоянного однородного электрического поля  $E$  ориентированы вдоль одного направления. В результате решения уравнений было показано, что при наличии в гелимагнетике спинового упорядочения типа простая спираль, текущий вдоль оси магнитной геликоида электрический ток индуцирует продольную относительно оси спирали намагниченность электронов проводимости, пропорциональную приложенному току и имеющую разные направления для разных магнитных хиральностей  $K$  (кинети́ческий магнитоэлектри́ческий

эффект). Дана оценка эффекта и ссылка на экспериментальную работу, в которой этот эффект наблюдался.

Расчет электросопротивления гелимагнетика показал, что текущий вдоль оси магнитного геликоида электрический ток индуцирует увеличение электросопротивления гелимагнетика, зависящее от хиральности  $K$  гелимагнетика и взаимной ориентации магнитного поля и электрического тока (магнетохиральный эффект). Оценена его величина порядка 1% общего сопротивления, что является вполне измеряемой величиной. Предсказано новое физическое явление – резонансное усиление электрического магнитохирального и кинетического магнитоэлектрического эффектов до гигантских величин, получившее название «магнито-хиральный кинетический резонанс» (МХКР). Явление МХКР реализуется, 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** выполняется построение теории, пригодной для описания эффекта передачи спинового момента (ПСМ) в хиральных проводящих гелимагнетиках. Для описания влияния электрического тока на намагниченность гелимагнетика, уравнение (7), описывающее динамику намагниченности электронов проводимости, было дополнено уравнениями Максвелла и уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта. Решение уравнений позволило показать, что передача спинового момента, которая является следствием обменного взаимодействия между электронами проводимости и локализованными спинами, приводит к вращению спирали намагниченности гелимагнетика вокруг её оси под действием протекающего электрического тока. Было показано, что протекающий электрический ток одновременно с вращением магнитной спирали трансформирует магнитную структуру типа «простая спираль» в структуру типа «коническая спираль». Частота вращения спирали может достигать 1 ГГц.

**В пятой главе** описано влияние эффекта передачи спинового момента на электросопротивление хиральных гелимагнетиков. С использованием результатов решения уравнений, полученных в предыдущей главе, было вычислен вклад в электросопротивление гелимагнетика, возникающий из-за наличия вращающейся под действием эффекта ПСМ спирали намагниченности. Рассмотрены два случая: переторможенного вращения спирали и легкого вращения при маленьком факторе затухания Гильберта. Показано, что во втором случае вклад вращения геликоида в сопротивление гелимагнетика всегда меньше, чем в первом случае.

**В шестой главе** выполняется построение теории, пригодной для описания инжекции в гелимагнетик чисто спинового тока, возникающего в немагнитном металле как проявление спинового эффекта Холла. В результате было показано, что затухание спинового тока, инжектированного вдоль оси магнитной спирали, описывается двумя характерными длинами: длиной спиновой диффузии и длиной затухания поляризации спинового тока, перпендикулярной намагниченности локализованных электронов гелимагнетика. В результате обнаружен «эффект хиральной поляризации чисто спинового тока», который заключается в возникновении в гелимагнетике продольно-поляризованного (относительно оси спирали) чисто спинового тока при инжекции из немагнитного металла поперечно-поляризованного чисто спинового тока. Показано, что когда граница не является высокопрозрачной, и когда процессами переворота спина на границе можно пренебречь, инжекция чисто спинового тока в гелимагнетик будет тем более эффективной, чем больше в немагнитном металле длина спиновой диффузии превышает длину свободного пробега электронов проводимости.

**На защиту выносятся** сформулированные в диссертации пять научных положений. Положения и все выводы хорошо обоснованы и не вызывают возражений.

**Научная новизна и достоверность защищаемых положений:**

- построена квантовая теория электронного спинового транспорта в металлах и полупроводниках, которая позволяет описывать как известные гальваномагнитные эффекты – магнетосопротивление, эффект Холла и спиновый эффект Холла, так и новые эффекты, обусловленные неоднородностями внешнего магнитного поля и/или внутренних полей обменного происхождения;
- построена теория электрического магнитохирального и кинетического магнитоэлектрического эффектов в гелимагнетиках. Определены условия экспериментального наблюдения резонансного усиления этих спиновых эффектов, получившего название «магнитохиральный кинетический резонанс»;
- построена теория магнитной динамики проводящего хирального гелимагнетика в условиях протекания в нем электрического тока. Найдена связь частоты вращения магнитной спирали гелимагнетика и плотности протекающего электрического тока;
- исследовано влияние эффекта передачи спинового момента на электросопротивление проводящих хиральных гелимагнетиков. Установлено, что при возникновении вращения спиновой спирали под действием протекающего электрического тока электросопротивление гелимагнетика будет всегда меньше сопротивления гелимагнетика, в котором спиновая спираль неподвижна;

– построена теория, позволяющая описать инжекцию чисто спинового тока из немагнитного металла с сильным спин-орбитальным взаимодействием в гелимагнетик. Описано пространственное распределение поляризации инжектированного в гелимагнетик спинового тока и определены характерные длины затухания различных компонент вектора поляризации спинового тока.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием современного аппарата квантовой статистики транспортных явлений в проводящих магнетиках, экспертизой профильных научных журналов, в которых опубликованы статьи с результатами, вошедшими в диссертацию, непротиворечивостью с результатами для частных/предельных случаев, которые были рассмотрены ранее в научной литературе.

### **Научная и практическая значимость работы**

Полученные в диссертации научные результаты являются качественно новыми и вносят существенный вклад в понимание физических свойств электронного и спинового транспорта в хиральных магнетиках и гетероструктурах на их основе. Описанная теоретически связь электросопротивления и намагниченности электронов проводимости с хиральностью может быть использована для определения хиральности гелимагнетиков по результатам гальваномагнитных экспериментов. Импонирует стремление автора количественно оценить получаемые эффекты с использованием физических параметров, взятых из известных экспериментов или вычисленных с применением надежных, проверенных методов. Построенная теория может быть использована в качестве теоретической основы для конструирования спиновых устройств, в которых хиральные проводящие гелимагнетики будут использованы как функциональный компонент.

**К наиболее важным результатам** диссертационной работы И.А. Ясюлевича можно отнести следующие:

1. построена квантово-статистическая теория электронного спинового транспорта для описания гальваномагнитных явлений в металлах и полупроводниках с учетом неоднородностей внешнего магнитного поля и/или внутренних полей обменного происхождения;
2. с помощью построенной теории было продемонстрировано, что взаимодействие спинов электронов проводимости с пространственно-неоднородным эффективным магнитным полем обменного происхождения в хиральных гелимагнетиках приводит к двум спин-транспортным эффектам: электрическому магнитохиральному эффекту и кинетическому магнитоэлектрическому эффекту.

3. построена теория эффекта передачи спинового момента в проводящих хиральных гелимагнетиках. Показано, что передача спинового момента в хиральных гелимагнетиках приводит к вращению спирали намагниченности гелимагнетика вокруг её оси под действием протекающего электрического тока.

4. показано, что передача спинового момента от электронов к геликоиду магнитной структуры приводит к вкладу в электросопротивление проводящих хиральных гелимагнетиков. Установлено, что при возникновении вращения спиновой спирали под действием протекающего электрического тока электросопротивление гелимагнетика будет всегда меньше сопротивления гелимагнетика, в котором спиновая спираль неподвижна.

5. рассмотрена инжекция в гелимагнетик чисто спинового тока, возникающего в немагнитном металле как проявление спинового эффекта Холла. Предсказано существование «эффекта хиральной поляризации чисто спинового тока», который заключается в возникновении в гелимагнетике продольно-поляризованного (относительно оси спирали) чисто спинового тока и продольной компоненты неравновесной намагниченности электронов, зависящих от хиральности спирали гелимагнетика.

Каждый из этих результатов обладает несомненной научной новизной и является практически значимым. Результаты работы достаточно полно изложены в 8 статьях, опубликованных в высокорейтинговых, профильных рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, а также неоднократно докладывались на международных и российских конференциях.

Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты и выводы диссертационной работы И.А. Ясюлевича могут быть **рекомендованы к использованию** многими организациями Российской Федерации: ИОФ РАН, ФИ РАН, КФТИ КазНЦ РАН, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Институт физики микроструктур РАН, ведущими университетами, такими как МГУ, Санкт-Петербургский университет, МИЭТ, МИРЭА, Уральский федеральный университет и др.

#### **Вопросы и замечания.**

1. Как выделяется вклад от рассмотренного в работе механизма взаимодействия электронов проводимости с геликоидальным магнетизмом от других возможных механизмов магнитосопротивления?

2. При рассмотрении магнитосопротивления ничего не говорится о возможном влиянии магнитного поля на период геликоида, а только на его конусность. Можете прокомментировать?

3. В шестой главе текст написан так, что можно понять, что ток течет только через слой немагнитного металла с сильной спин-орбитой, а через интерфейс в слой гелимагнитного металла проникает только неравновесный спиновый ток (спиновая поляризация электронов проводимости), индуцированный электрическим током в немагнитном металле. Причем, рассматриваются пределы высокопрозрачного интерфейса и низкопрозрачного интерфейса. В то же время, с электрической точки зрения, эти два металлических слоя соединены параллельно. Соответственно, даже если разность потенциалов приложена к немагнитному металлу за пределами гелимагнитного слоя, при высокой прозрачности интерфейса ток течет и через гелимагнитный слой. Немагнитный металл, как правило, платина или вольфрам, не слишком хорошие проводники по удельному сопротивлению, поэтому, если гелимагнетик имеет меньшее удельное сопротивление, большая часть тока уйдет в гелимагнетик. Кажется, что модель хорошо работает только в случае низкой (туннельной) прозрачности интерфейса между немагнитным металлом и гелимагнетиком. Можете прокомментировать?

4. стр. 27, «... намагниченность вдоль слоя ...» как-то не очень аккуратно. Либо в плоскости слоя, либо нужно указать вдоль какой по смыслу координаты слоя.

5. стр. 66, дана ссылка на формулу (3.19) вместо (3.20).

6. стр. 77, величины  $\chi_{\perp}$ ,  $\chi_{\parallel}$  в пропорциональности между магнитным моментом и индукцией поля названы проницаемостью (вместо восприимчивости).

Сделанные замечания не снижают оценку качества диссертации. Тем более, что диссертация в целом написана очень грамотным русским языком с минимумом опечаток. С научной точки зрения, диссертационная работа И.А. Ясюевича представляет собой цельное теоретическое исследование, выполненное на высоком научном уровне. Работа обладает значительной научной и практической значимостью.

### **Заключение**

Диссертация И.А. Ясюевича «Электрический и спиновый транспорт в хиральных гелимагнетиках и гетероструктурах на их основе» отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (с последующими изменениями), и предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам диссертант – Ясюевич Иван Алексеевич – несомненно заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Диссертационная работа была доложена и обсуждена на объединенном научном семинаре лабораторий нелинейной оптики, проблем сверхпроводимости и спинтроники и радиоспектроскопии диэлектриков Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», 31 мая 2024 г, отзыв одобрен на заседании Ученого Совета КФТИ-ОСП ФИЦ КазНЦ РАН, протокол № 17 от 05 июня 2024 г.

Ведущий научный сотрудник  
Лаборатории нелинейной оптики,  
КФТИ – обособленного структурного  
подразделения ФИЦ КазНЦ РАН,  
телефон: 8 (843) 2319074  
E-mail: ltagirov@mail.ru  
д. ф.-м. н., профессор

Тагиров Ленар Рафгатович

Подпись д.ф.-м.н. Л.Р. Тагирова заверяю.  
Главный ученый секретарь ФИЦ КазНЦ РАН,  
к.х.н.

Зиганшина С.А.

*С отзывом ознакомлен*

*10.06.2024*

*✓ / Ясюневич И.А.*



## СВЕДЕНИЯ О ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

по диссертации 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.

1.	Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»»
2.	Сокращенное наименование организации	ФИЦ КазНЦ РАН
3.	Организационно-правовая форма организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
4.	Ведомственная принадлежность организации	Министерство образования и науки Российской Федерации
5.	Место нахождения	Российская Федерация, Татарстан, г. Казань
6.	Почтовый адрес организации	420111, Российская Федерация, Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261.
7.	Телефон организации	Телефон: +7(843) 292-75-97 Факс: +7(843) 292-77-45
8.	Адрес электронной почты организации	presidium@knc.ru
9.	Адрес официального сайта организации в сети Интернет	<a href="http://knc.ru/">http://knc.ru/</a>
10.	Руководитель организации	Чл-корр. РАН Калачев Алексей Алексеевич
11.	Наименование профильного структурного подразделения, занимающегося проблематикой диссертации	Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук»
12.	Сведения о лице, утверждающем отзыв ведущей организации	Директор ФИЦ КазНЦ РАН, чл-корр. РАН, д.ф.-м.н. Калачев Алексей Алексеевич
13.	Сведения о составителе отзыва из ведущей организации	Тагиров Ленар Рафгатович, доктор физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник
14.	<p>Список публикаций работников ведущей организации по теме диссертации Ясюлевича И.А. за последние 5 лет:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Exchange spin waves in thin films with gradient composition / I.A. Golovchanskiy, I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, B.F. Gabbasov, N.N. Abramov, R.V. Yusupov, R.I. Khaibullin, L.R. Tagirov // Physical Review Materials.-2022.-V.6(6). - p.064406.</li> <li>2. Ultrafast signatures of magnetic inhomogeneity in Pd<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> (x ≤ 0.08) epitaxial thin films / A.V. Petrov, S.I. Nikitin, L.R. Tagirov, A.I. Gumarov, I.V. Yanilkin, R.V. Yusupov // Beilstein Journ Nanotechnol. – 2022. – V.13. – P.836–844.</li> <li>3. Engineering the Exchange Spin-Waves in Graded Thin Ferromagnetic Films / I. Yanilkin, A. Gumarov, I. Golovchanskiy, B. Gabbasov, R. Yusupov, L. Tagirov // Nanomaterials (MDPI). – 2022. – V.12. – Art.4361.</li> </ol>	

4. Epitaxial thin-film  $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$  alloy – a tunable ferromagnet for superconducting spintronics / A. Esmaeili, I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, I.R. Vakhitov, B.F. Gabbasov, R.V. Yusupov, D.A. Tatarsky, L.R. Tagirov // Science China Materials (Springer). - 2021. - V. 64. - p. 1246-1255.
5. Controllable two- and three-state magnetization switching in single-layer epitaxial  $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$  films and an epitaxial  $\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}/\text{Ag}/\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}$  heterostructure / I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, G.F. Gizzatullina, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // Beilstein Journal of Nanotechnol. – 2022. – V.13. – P.334–343.
6. Synthesis, characterization, and magnetoresistive properties of the epitaxial  $\text{Pd}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}/\text{VN}/\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}$  superconducting spin-valve heterostructure / I.V. Yanilkin, W.M. Mohammed, A.I. Gumarov, A.G. Kiiamov, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // Nanomaterials (MDPI). – 2021. – V.11. – Art.64.
7. Chirality of Bloch domain walls in exchange-biased CoO/Co bilayer studied by waveguide-enhanced neutron spin-flip scattering // Yu. N. Khaydukov, D. Lenk, V. Zdravkov, R. Morari, T. Keller, A. S. Sidorenko, L. R. Tagirov, R. Tidecks, S. Horn, and B. Keimer // Physical Review B. – 2021. – V.104. – Art.174445.
8. Superconducting Spin-Valve Effect in Structures with a Ferromagnetic Heusler Alloy Layer / A.A. Kamashev, N.N. Garif'yanov, A.A. Validov, Y.V. Fominov, I.A. Garifullin // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2020. – V. 131, P. 311-321.
9. Epitaxial growth and superconducting properties of thin-film PdFe/VN and VN/PdFe bilayers on MgO substrate / W.M. Mohammed, I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, A.G. Kiiamov, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // Beilstein Journal of Nanotechnol. – 2020 – V.11. – P.807–813.
10. Superconducting switching due to a triplet component in the Pb/Cu/Ni/Cu/Co<sub>2</sub>Cr<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>Al<sub>y</sub> spin-valve structure / Andrey Kamashev, Nadir Garif'yanov, Aidar A. Validov, Joachim Schumann, Vladislav Kataev, Bernd Büchner, Yakov V. Fominov, Ilgiz A. Garifullin // Beilstein Journ Nanotechnol. – 2019. – V.10. - P. 1458-1463.
11. Giant Spin-Valve Effect in Heterostructures with a Superconducting Layer / Andrey Kamashev, Nadir Garif'yanov, Aidar A. Validov, Joachim Schumann, Vladislav Kataev, Bernd Büchner, Yakov V. Fominov, Ilgiz A. Garifullin // JETP Letters. – 2019. – V.110. - P. 342–347.
12. Superconducting spin-valve effect in heterostructures with ferromagnetic Heusler alloy layers / Andrey Kamashev, Nadir Garif'yanov, Aidar A. Validov, Joachim Schumann, Vladislav Kataev, Bernd Büchner, Yakov V. Fominov, Ilgiz A. Garifullin // Physical Review B. – 2019. – V.100. – Art.134511.

Ведущая организация подтверждает, что соискатель не является ее сотрудником и не имеет научных работ по теме диссертации, подготовленных на базе ведущей организации или в соавторстве с ее сотрудниками.

Главный ученый секретарь ФИЦ КазНИИ РАН

К.Х.Н.

24.04.24

> Зиганшина С.А.