

УТВЕРЖДАЮ»
Башкирского
государственного университета по
научно-исследовательской работе
и инновационной работе
д.ф.н., Мустафина С.А.
«21» сентября 2021 г.

Отзыв ведущей организации

ведущей организации – Башкирского государственного университета – на диссертацию Савченко Сергея Павловича «Фокусировка, каустика и вырождение спиновых волн в магнитоупорядоченных средах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений

Задачи, решаемые в представленной диссертации, относятся к области спинтроники активно развивающегося раздела физики магнитных явлений. В диссертационной работе теоретически исследованы особенности связанных магнитостатических электронно-ядерных колебаний в ферромагнетиках вблизи электронно-ядерного резонанса, проанализирована анизотропия спектра спиновых волн в гейзенберговских ферромагнетиках вблизи границы зоны Бриллюэна, и выявлены возможности каустики магнитоупругих волн вблизи магнитоупругого резонанса. Исследуемые в диссертации особенности распространения спиновых волн — фокусировка и каустика, — являются важными для спинтроники, поскольку изучение способов передачи информации при помощи спиновых волн является одной из ее основных задач.

Актуальность диссертационной работы обусловлена тем, что в работе исследуются спиновые волны со сложными законами дисперсии вблизи особых точек спектра, а полученные результаты, среди которых найденные зависимости направлений фокусировки от частоты могут быть перспективными для создания устройств спинтроники.

Научная новизна и научно-практическая значимость работы. Для электронно-ядерных колебаний в легкоосных ферромагнетиках, имеющих форму сфероида, установлены зависимости положения запрещенной зоны колебаний от отношения полуосей сфероида (параметра формы), найдены зависимости частот и полей вырождения собственных мод от параметра формы. Результаты представляются важными для планирования экспериментов по исследованию электронно-ядерных колебаний. Для ферро- и антиферромагнетиков установлены условия, при которых может реализоваться каустика магнонов — явление резкого возрастания интенсивности распространения вдоль определенных направлений. Показано, что направлением каустики можно управлять при помощи частоты волны и величины постоянного магнитного поля. Этот результат может быть использован при разработке устройств спинтроники. Для магнитоупругих волн обнаружено, что вблизи магнитоупругого резонанса они ведут себя анизотропно, и для этих волн в определенной области частот должна наблюдаться каустика.

Достоверность результатов обеспечивается применением проверенных и хорошо апробированных методов теоретического расчета спектра волн в кристаллах, обоснованным выбором приближений, и согласованностью полученных результатов с имеющимися литературными данными.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения, списка работ автора, списка цитируемой литературы и двух приложений.

Первая глава диссертации носит обзорный характер. В ней собраны необходимые для дальнейшего изложения сведения о взаимодействиях в ферромагнетике — обменном, анизотропии, магнитном дипольном, магнитоупругом и сверхтонком. Сформулированы условия применимости макроскопического описания динамики спиновых волн.

Во второй главе диссертации исследованы тонкие особенности спектра связанных электронно-ядерных колебаний в ферромагнетиках. В частности, исследованы точки вырождения колебаний: если величина внешнего поля оказывается равной определенной величине, то различные собственные моды имеют одинаковые частоты. Положение этой точки определяется параметром формы — отношением полуосей эллипсоида (в работе исследуются образцы сферической формы). Интересно, что частоты вырождения являются возрастающей функцией параметра формы, тогда как поле вырождения зависит от этого параметра немонотонно. Второй важной задачей главы 2 было исследование границ запрещенной области колебаний: оказывается, что при фиксированном значении постоянного поля в спектре связанных колебаний возникает диапазон параметров формы, при которых собственные колебания невозможны, границы запрещенной зоны зависят от величины магнитного поля. Кроме того, при фиксированном параметре формы существует диапазон магнитных полей, при которых собственные колебания невозможны. Важным результатом второй главы является построение зависимости границ запрещенной зоны магнитных полей от параметра формы образца.

В третьей главе изучены спиновые волны в рамках модели Гейзенберга, учитывающей взаимодействие спина атома с первыми двумя координационными сферами. Исследованы ферро- и антиферромагнетики с различными типами кристаллической решетки: простая кубическая, объемно-центрированная кубическая, гранецентрированная кубическая и объемно-центрированная тетрагональная. Отношение обменных постоянных между первым и вторым ближайшим окружением полагается параметром теории. Для исследования эффектов фокусировки использован подход, развитый ранее для фокусировки фононов: исследуется кривизна изоэнергетических поверхностей, определяется коэффициент усиления волн (он обратно пропорционален гауссовой кривизне). Таким образом, точкам изоэнергетической поверхности с нулевой гауссовой кривизной соответствует каустика магнонов, и для определения направлений фокусировки и каустики достаточно провести исследование поверхностей постоянной частоты. Сложность задачи заключается в том, что спектр спиновых волн, в отличие от фононов, является нелинейным, поэтому для исследования поверхностей необходимо более широкое привлечение численных методов. Автор получил ряд важных результатов: при отрицательном отношении обменных постоянных возможна каустика магнонов, а при положительном — фокусировка магнонов незначительна, в ферромагнетиках с ГЦК и простой кубической решетками в плоскости (001) реализуются три направления каустики, а в ОЦК-ферромагнетиках — лишь одно. Установлено, что направление каустики определяется частотой волны и построены зависимости направления каустики от частоты.

Четвертая глава диссертации посвящена магнитоупругим волнам в упругоизотропном ферромагнетике вблизи магнитоупругого резонанса. Для описания спиновых волн использовано феноменологическое приближение. Метод исследования анизотропии спектра, как и в главе 3, взят из теории фокусировки фононов. Показано, что вдали от магнитоупругого резонанса спектр спиновых волн представляет собой магнитную

и три упругие моды, тогда как в окрестности резонанса моды сильно взаимодействуют, что приводит к анизотропии спектра, и появлению фокусировки магнитоупругих волн. В узкой области частот вблизи резонанса следует ожидать каустик магнонов.

Краткий анализ содержания позволяет сделать вывод о том, что диссертация С.П. Савченко является законченной научно-исследовательской работой. Решенные в диссертационной работе задачи представляют несомненный интерес для физики магнитных явлений, а аккуратность проведенных расчетов и точность изложения материала свидетельствуют о высокой квалификации автора.

Результаты, приведенные в главах 2-4, указывают на необходимость проведения детальных экспериментальных исследований фокусировки спиновых и магнитоупругих волн.

К диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В главе 2 не учитывается влияние диссипации на электронно-ядерные колебания, однако даже небольшое затухание может сказаться на тонких изучаемых эффектах: может сдвинуться положение запрещенной зоны. В связи с этим возникает вопрос о разрешимости в эксперименте пиков поглощения, соответствующих различным собственным частотам. Соответственно, вызывает сомнение в возможности наблюдения точек вырождения.

2. Вопрос об учете затухания также актуален и для исследования эффектов фокусировки спиновых и магнитоупругих волн. Особенно важно обсуждение роли затухания вблизи магнитоупругого резонанса: область частот, в которых возможна каустика, оказывается довольно узкой. Не приведет ли затухание к еще большему ее сжатию или полному исчезновению?

3. В главе 4 отсутствует критический анализ фазовой диаграммы кубического ферромагнетика при наличии внешнего поля и размагничивающих полей. Возникает вопрос: при каком значении поля, направленного вдоль оси [001], намагниченность также будет направлена вдоль оси [001], если выбранное значение параметров материала таково, что константа кубической анизотропии отрицательна ($K_1 < 0$). В этом случае намагниченность в отсутствие поля будет направлена вдоль одной из осей (111). Этот анализ тем более необходим, т.е. вблизи магнитных фазовых переходов (которые в этом случае будут иметь место) рассматриваемые эффекты могут также усиливаться.

4. Кроме того, в главе 4 не учтено, что в равновесном состоянии образец деформирован, поэтому для более точного расчета линеаризацию уравнений необходимо проводить на фоне спонтанных деформаций.

5. В работе мало конкретных рекомендаций для экспериментального обнаружения рассматриваемых эффектов.

6. Работа не лишена некоторого количества опечаток, орфографических ошибок и неточностей в изложении. Например, на с. 68 в строке после формулы (4.5) тензор напряжений назван тензором деформации; также в этой и следующей строках неравенство и равенство индексов i, k необходимо поменять местами, иначе будут ошибочными уравнения упругости.

Отмеченные замечания не снижают общей высокой оценки исследований, выполненных С.П. Савченко.

Полученные результаты могут быть использованы в Московском государственном университете, Уральском Федеральном университете, Дальневосточном Федеральном университете, Башкирском государственном университете, Челябинском государственном университете, Институте физики металлов УрО РАН, Институте радиотехники и электроники РАН, Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН при постановке задач в области физики магнитных явлений.

Характеризуя диссертационную работу в целом, следует отметить внутреннее единство ее структуры, логичность, связь результатов, выводов и положений, выносимых на защиту. Содержание диссертации соответствует заявленной научной специальности. Текст автореферата соответствует содержанию диссертации. Публикации автора в виде 9 статей в ведущих российских и международных научных журналах достаточно полно отражают содержание диссертации. Основные результаты работы были доложены на Всероссийских и международных научных конференциях.

Заключение

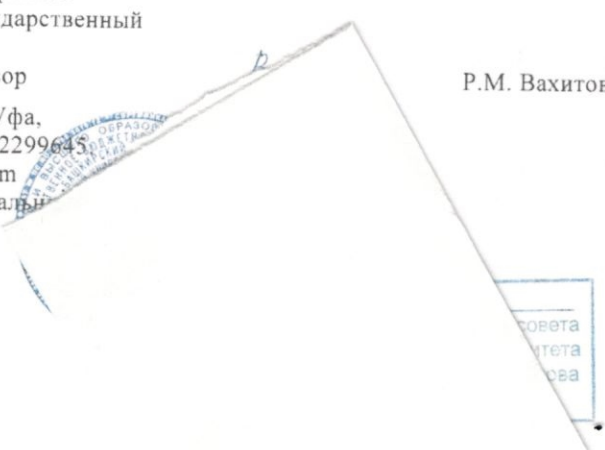
Считаем, что диссертационная работа «Фокусировка, каустика и вырождение спиновых волн в магнитоупорядоченных средах» соответствует требованиям пунктов 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 "О порядке присуждения ученых степеней", предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Савченко Сергей Павлович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, профессором, зав. кафедрой теоретической физики Вахитовым Робертом Миннисламовичем (научная специальность докторской диссертации 01.04.07. Физика конденсированного состояния), обсужден и утвержден на заседании кафедры теоретической физики Башкирского государственного университета (Протокол № 2 от 20 сентября 2021 г.).

Зав. кафедрой теоретической физики
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный
университет», доктор физико-
математических наук, профессор

Республика Башкортостан, г. Уфа,
ул. З. Валиди, 32. Тел. +7(347)2299645
E-mail: VakhitovRM@yahoo.com
Согласен на обработку персональн

Р.М. Вахитов



С отзывом ознакомлен 29.09.2021
Савченко С.П.

Сведения о ведущей организации
по диссертации **Савченко Сергея Павловича** «Фокусировка, каустика и вырождение спиновых волн в магнитоупорядоченных средах», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений

Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	БашГУ
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Место нахождения	г.Уфа,
Почтовый индекс, адрес организации	450076, Республика Башкортостан, г.Уфа, ул. Заки Валиди, д.32
Веб-сайт	http://www.bashedu.ru
Телефон	8(347)272-63-70
Адрес электронной почты	rector@bsunet.ru
Список публикаций сотрудников БашГУ по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не менее 5 и не более 15 публикаций)	<ol style="list-style-type: none"> 1. I.L. Kindiak, P.N. Skirdkov, K.A. Tikhomirova, K.A. Zvezdin, E.G. Ekomasov, and A.K. Zvezdin. Domain-wall dynamics in a nanostrip with perpendicular magnetic anisotropy induced by perpendicular current injection. PHYSICAL REVIEW B, 2021, v. 103 (2), 024442 (8). 2. Sharafullin, I. F., Diep, H. T. (2020). Skyrmion Crystal and Phase Transition in Magneto-Ferroelectric Superlattices: Dzyaloshinskii-Moriya Interaction in a Frustrated J1-J2 Model // Symmetry, 2020, 12, 26; doi:10.3390/sym12010026 3. R. M. Vakhitov, R. V. Solonetsky, A. A. Akhmetova. Stable States of Vortex-like Magnetic Formations in Inhomogeneous Magnetically Uniaxial Films and their behavior in a longitudinal magnetic Feed // J. Appl. Phys. 128, №15,153904 (2020) 4. Р.М. Вахитов, Р.В. Солонецкий, А.А. Ахметова. Особенности переманничивания магнитоодноосных пленок с колумнарными дефектами. Физика металлов и металловедение. 2020, Т. 121, № 5, стр. 462-468. 5. Екомасов Е.Г., Назаров В.Н., Гумеров А.М., Самсонов К.Ю., Муртазин Р.Р. Управление с помощью внешнего магнитного поля параметрами магнитного бризера в трёхслойной ферромагнит-

	<p>ной структуре // Письма о материалах. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 141–146. DOI: 10.22226/2410-3535-2020-2-141-146.</p> <p>6. Chevizovich D, Michieletto D, Mvogo A, Zakiryarov F, Zdravković S. A review on nonlinear DNA physics. // Royal Society Open Science, 2020, 7: 200774 – 23pp. https://doi.org/10.1098/rsos.200774.</p> <p>7. A.E. Ekomasov, S.V. Stepanov, K.A. Zvezdin, E.G. Ekomasov. Spin current induced dynamics and polarity switching of coupled magnetic vertices in three-layer nanopillars. Journal of Magnetism and Magnetic Materials Volume 471, 1 February 2019, Pages 513-520. doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.077.</p> <p>8. Maksutova F.A., Solonetskiy R.V., Vakhitov R.M., Pyatakov A.P. The electric-field-induced “zero-degree domain walls” in ferromagnets. Europhys. Lett. 2020, V. 129, 27004 (1-5).</p> <p>9. Р.М. Вахитов, З.В. Гареева, Р.В. Солонецкий, Ф.А. Мажитова. Микромагнитные структуры, индуцированные неоднородным электрическим полем, в магнитодносных пленках с флексомагнитоэлектрическим эффектом. Физика твердого тела, 2019, том 61, вып. 6, с.1120 – 1127. DOI: 10.21883/FTT.2019.06.47688.348.</p> <p>10. Степанов С.В., Екомасов А.Е., Звездин К.А., Екомасов Е.Г. Исследование связанной динамики магнитных вихрей в трехслойном проводящем нанопиллдре. Физика твёрдого тела. 2018 г., том 60, выпуск 6, с. 1045 – 1050. DOI: 10.21883/FTT.2018.06.45974.22M.</p> <p>11. Назаров В. Н., Екомасов Е. Г. Авторезонансная модель управления нелинейной динамикой намагниченности в трехслойной антиферромагнитной структуре с учетом затухания в системе //Письма о материалах. – 2018. – Т. 8. – №. 2. – С. 158-164.</p>
--	---

Проректор по научной и
инновационной работе,
д.ф.-м.н., профессор



С.А. Мустафина

21 сентября 2021 г.