

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Теплова Валентина Сергеевича «**Возбуждение и распространение слабозатухающих магнитных колебаний в пленках железо-иттриевого граната**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений

Актуальность темы диссертации

Диссертация Теплова В.С. посвящена **актуальной** проблеме исследования возбуждения и распространения спиновых колебаний в магнетиках с малыми диссипативными параметрами, в качестве объекта исследования выбраны пленки иттрий – железистого граната, в которых параметры затухания минимальны. В связи с активным развитием магноники, области наноэлектроники, направленной на изучение свойств спиновых волн и их применения для построения элементной базы приборов обработки и хранения информации, разработка новых подходов возбуждения и управления спиновыми волнами, представляет несомненный практический интерес. Изучение новых эффективных методов возбуждения и распространения магнитных колебаний, основанных на эффектах анизотропного распространения спиновых волн и авторезонанса, исследованных в диссертационной работе, представляется интересной и важной задачей как с прикладной, так и с фундаментальной точек зрения.

Структура и основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Общий объем диссертации 119 страниц, включая 38 рисунков, 1 таблицу, списка литературы. Список цитированной литературы содержит 100 наименований.

Во введении диссертации обоснована актуальность проведенных исследований, определены цель и задачи работы, показана новизна полученных результатов и их научная и практическая значимость, приведены основные защищаемые положения, изложены структура работы и ее краткое содержание, приведены основные данные о публикациях по

теме диссертации.

В первой главе диссертации обсуждаются основные уравнения и модели, необходимые для проведения запланированных исследований, рассматриваются приближения, используемые для описания движения намагниченности. Приводятся основные сведения о бегущих и стоячих спиновых волнах в магнетиках. Приводятся теоретические выкладки по расчетам параметров критического угла, необходимого для возникновения неотраженной спиновой волны. Обсуждаются возможности реализации авторезонанса в исследуемой системе, приводятся оригинальные аналитические расчеты авторезонансного возбуждения колебаний намагниченности в тонких магнитных пленках, позволяющие определить условия, необходимые для авторезонансного возбуждения нелинейных колебаний намагниченности, приводится оценка величины пороговой скорости изменения поля накачки.

Во второй главе диссертации представлены результаты экспериментального изучения процесса распространения слабозатухающих спиновых волн в пленках ЖИГ, предложен новый метод управления распространением спиновых волн, позволяющий значительно повысить скорость и длину свободного пробега спиновых волн за счет эффекта полного неотражения поверхностной магнитостатической волны от вытравленной периодической структуры, в виде линии дефектов. Для исследования процессов распространения СВ использовалась методика Мандельштам-Бриллюэновского рассеяния света. Результаты проведенных исследований показали, что неотражённая волна в пленке ЖИГ распространяется узким не расходящимся пучком вдоль и за линией дефектов, фазовая и групповая скорости этой волны взаимноперпендикулярны. Проанализированы механизмы возникновения неотраженной волны, показано, что ее появление связано с анизотропным характером распространения магнитостатических волн в пленке, определены основные характеристики неотраженной волны в пленке ЖИГ толщиной 2.2 мкм, показано увеличение длины свободного пробега по сравнению с каустической и ПМСВ.

В третьей главе на основе численного моделирования с использованием пакета MuMax были рассчитаны спектры спин-волнового резонанса (СВР) и гистерезисы намагниченности для 4 х моделей пленки ЖИГ. Из них были выбраны 2 модели пленки ЖИГ, позволяющие корректно учесть условия закрепления спинов на поверхности пленки

и получить спектр СВР удовлетворяющий аналитическому приближению Киттеля для однодоменной перпендикулярно намагниченной пластины. Также проведены оценки поля насыщения $H = 2$ кЭ и поля накачки $h_0 = 1$ Э для моделирования авторезонансного возбуждения намагниченности в пленках ЖИГ.

В **четвертой главе** проведено исследования авторезонанса, как источника возбуждения нелинейных магнитных колебаний, альтернативного СВЧ – токам высокой мощности и спин – поляризованным токам. На основе полученных в третьей главе моделей проведено моделирование авторезонансного возбуждения слабозатухающих магнитных колебаний в пленке ЖИГ с перпендикулярной магнитной анизотропией. Исследование авторезонанса было разделено на четыре этапа, позволяющих перейти от простой аналитической модели, полученной в первой главе, к моделям, учитывающим влияние полей размагничивания, затухание и вклады магнитокристаллической и поверхностной анизотропии. В результате проведенных исследований установлено, что поля размагничивания и затухание приводят к уменьшению порога скорости изменения частоты поля накачки. Учет затухания также обеспечивает более быструю стабилизацию процесса подстройки фаз между полем накачкой и собственными резонансными колебаниями намагниченности пленки. Учет магнитокристаллической анизотропии в пленке приводит к изменению пороговой скорости изменения частоты поля накачки для пленок с выделенным направлением [100] и [111], а также к появлению параметрической неустойчивости для плёнок ЖИГ [210]. Определены величины параметров материала, необходимых для реализации авторезонансного возбуждения спиновых волн.

В **заключении** приведены основные результаты и полученные на их основании выводы.

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Впервые экспериментально продемонстрировано существование неотраженной спиновой волны в пленках ЖИГ на линии дефектов и за ней.
2. На основе экспериментальных исследований определены основные характеристики неотраженной спиновой волны: длина волны, направление фазовой скорости, величина групповой скорости и длина свободного пробега, проведено сравнение с другими типами спиновых волн.

3. Предложен метод авторезонансного возбуждения нелинейных колебаний намагниченности как альтернатива СВЧ – токам высокой мощности и спин – поляризованным токам.
4. Проведена оценка влияния внутренних параметров системы (магнитостатики, магнитокристаллической анизотропии, диссипации) на условия возбуждения спиновых волн методом авторезонанса.
5. На основе численного моделирования определены параметры материала и условия, при которых возможна реализация авторезонансного возбуждения колебаний намагниченности переменным магнитным полем малой величины с линейно меняющейся частотой в тонких магнитных пленках ЖИГ с перпендикулярной магнитной анизотропией.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность полученных в данной диссертационной работе результатов и выводов обеспечивается обоснованным выбором физических приближений, использованием широко применяемых методов моделирования для теоретической интерпретации полученных экспериментальных данных, использованием современных приборов и апробированных методик изучения спин-волновых возбуждений в магнетиках. Выводы, сделанные в диссертации, логически следуют из представленных результатов и не противоречат современным научным представлениям. Результаты работы были апробированы на различных научных мероприятиях.

Практическая значимость полученных результатов

Результаты диссертационной работы В.С. Теплова имеют практическое и теоретическое значение. Результаты по исследованию особенностей возбуждения, распространения и свойств неотраженной волны могут быть использованы при разработке спин-волновых СВЧ-устройств, в частности, для увеличения расстояния передачи информации. С фундаментальной точки зрения большой интерес представляют результаты моделирования авторезонансных процессов, выступающих альтернативой традиционным способам возбуждения и распространения спин – волновых колебаний. Полученные автором результаты позволяют определить расчетные значения физических параметров, для дальнейшей разработки условий экспериментов по наблюдению авторезонансного

возбуждения слабозатухающих колебаний намагниченности в одноосных пленках ЖИГ.

Результаты и выводы диссертационной работы В.С. Теплова могут быть рекомендованы к использованию многими организациями Российской Федерации: ИОФ РАН, ФИ РАН, ИПФ РАН, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Институт физики микроструктур РАН, ведущими университетами, такими как МГУ, Санкт-Петербургский университет, МИЭТ, МИРЭА, Южно-Уральский государственный университет и др.

Замечания по диссертационной работе

1. В диссертации предлагаются новые подходы для возбуждения спиновых волн (СВ) в пленках, однако не проводится сопоставление полученных результатов с классическими методиками. Сопоставимы ли полученные характеристики СВ с аналогичными характеристиками СВ, возбуждаемых СВЧ – токами высокой мощности, спин – поляризованным токами?
2. В работе не обсуждается влияние упругих напряжений, индуцируемых ориентирующей подложкой; магнитоупругих взаимодействий на наблюдаемые эффекты, в частности, на появление неотраженной волны (НВ), связанной с анизотропным характером распространения магнитостатических волн.
3. Возможно более детальное рассмотрение основных механизмов возникновения неотраженной волны, в том числе, влияния магнитной анизотропии, кристаллографической ориентации подложки на НВ; зависимости свойств НВ от структуры дефектов (количества, формы дефектов, периодичности расположения дефектов).
4. Встречаются погрешности в терминологии, например, используется выражение «одноосевая анизотропия» вместо анизотропия типа «легкая ось» или «одноосная анизотропия», есть опечатки.

Заключение (выводы о работе)

Перечисленные замечания носят частный характер и не умаляют достоинств представленной диссертационной работы, свидетельствующей о профессиональной

квалификации соискателя. К достоинствам диссертационной работы следует отнести использование комплексного подхода, включающего экспериментальные измерения и теоретические исследования с применением как аналитических расчетов, так и численных методов микромагнитного моделирования. Диссертация и автореферат написаны ясным языком, и оформлены в соответствии с ГОСТом. Автореферат диссертации отражает основные результаты, полученные автором. Диссертация хорошо и логично структурирована. Результаты, изложенные в диссертации, соответствуют результатам опубликованных работ.

Диссертационная работа Теплова В.С. полностью удовлетворяет всем требованиям Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 20.03.2021), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Теплов Валентин Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико - математических наук по специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений.

Заведующий лабораторией теоретической физики
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики
молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра Российской
академии наук (ИФМК УФИЦ РАН),
доктор физико-математических наук,

Гареева Зухра Владимировна
«20» 10 2022 г.

Почтовый адрес: 450075, г. Уфа, пр. Октября, 151

Тел.: (347)921417

E-mail: zukhfragzv@yandex.ru

Подпись З.В. Гареевой заверяю
ученый секретарь ИФМК УНЦ РАН,
кандидат физико-математических наук

А.А. Бунаков



Сотрудник ознакомлен

- Теплов В. С.

02.11.2022

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Гареева Зухра Владимировна

Ученая степень, звание: доктор физико-математических наук, специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния, доцент

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра Российской академии наук

Должность: заведующий лабораторией теоретической физики, ведущий научный сотрудник

Почтовый адрес: 450075 г.Уфа, пр. Октября 151

Тел.: (347)2921417

E-mail: zukhragzv@yandex.ru

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. З.В. Гареева, С.М. Чен. Сверхбыстрая динамика доменных границ в антиферромагнетиках и ферримагнетиках с температурами компенсации магнитного и углового моментов, Письма в ЖЭТФ, т.114, в.4, с. 250 – 262 (2021). DOI: 10.31857/S1234567821160084
2. A.K. Zvezdin, Z.V. Gareeva, K.A. Zvezdin. Anomalies in the dynamics of ferrimagnets near the angular momentum compensation point. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, V. 509, 166876, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166876>, WOS, Scopus, РИНЦ, impact factor 2.717
3. З.В. Гареева, К.Ю. Гусlienко. Динамика магнитных скирмионов в наноточках. ФТТ, т. 60, в.6, 2018, с. 1135 – 1141. doi: 10.21188/FTT.2018.06.45988.23M
4. Z. V. Gareeva, K. Y. Guslienko. Collective magnetic skyrmion gyrotropic modes in a dot chain. Journal of Physics Communications, 2018, V. 2(3), 035009, <https://doi.org/10.1088/2399-6528/aab169>, WOS, Scopus, РИНЦ.
5. K. Y. Guslienko, Z. V. Gareeva. Magnetic skyrmion low frequency dynamics in thin circular dots. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 442, 176-182, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.094>, WOS, Scopus, РИНЦ, impact factor 3.046
6. Z. V. Gareeva, N. V. Shulga and R. A. Doroshenko, Hysteresis processes in a magnetoelectric nanoelement with Dzyaloshinskii–Moriya interaction, Eur. Phys. J. Plus, 1374 (2022) 454 DOI: <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-02648-0>, WOS, impact factor 3.911
7. A. I. Popov, K.A. Zvezdin, Z.V. Gareeva, A.V. Kimel, A.K. Zvezdin. Quantum theory of femtosecond optomagnetic effects for rare-earth ions in DyFeO₃. Physical Review B, 2020, V. 103(1), 014423, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.014423>, WOS, Scopus, РИНЦ, impact factor 3.575.
8. Z.V. Gareeva, N.V. Shulga, R.A. Doroshenko, Influence of the Dzyaloshinskii – Moriya interaction on the properties of magnetic states in nanostructures, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 536, 2021, 168079, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168079>, WOS, Scopus, РИНЦ, impact factor 2.993.
9. Z. Gareeva, A. Zvezdin, K. Zvezdin, X. Chen, Symmetry Analysis of Magnetoelectric Effects in Perovskite-Based Multiferroics. Materials 2022, 15 (2). <https://doi.org/10.3390/ma15020574>, WOS, Scopus, impact factor 3.623.
10. A.K. Zvezdin, Z.V. Gareeva, X.M. Chen. Multiferroic Order Parameters in Rhombic Antiferromagnets RCrO₃. J.Phys.Cond.Matter, 2021, 33. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ac0dd6>, WOS, Scopus, РИНЦ, impact factor 2.333.
11. Z.V. Gareeva, A.K. Zvezdin, L.A. Kalyakin, T.T. Gareev. Dzyaloshinskii–Moriya interaction, epitaxial strains, phase transitions in multiferroics with cycloidal structure. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, V. 515, 167255, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167255>, WOS, Scopus, РИНЦ, impact factor 2.717.
12. Z.V. Gareeva, L. A. Kalyakin, I. R. Kayumov, A.K. Zvezdin. Spin-Reorientation Transitions in Multiferroics with Cycloidal Spin Ordering. Physics of Metals and Metallography, 2020, V. 121, 310-315, DOI: 10.1134/S0031918X20040031 (перевод), WOS, Scopus, РИНЦ, impact factor 0.87

13. Z.V. Gareeva, K.A. Zvezdin, I.R. Kayumov, I. R., A.K. Zvezdin. Space-Modulated Structures in BiFeO₃ Films. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2019, V. 32(6), 1811-1815, <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4887-1>, WOS, Scopus, РИНЦ, Impact factor: 1.161
14. Z.V. Gareeva, K.A. Zvezdin, A.P. Pyatakov, A.K. Zvezdin. Novel type of spin cycloid in epitaxial bismuth ferrite films. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, V. 469, 593-597, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.08.079>, WOS, Scopus, РИНЦ, impact factor 2.717
15. A. I. Popov, Z. V. Gareeva, F.A. Mazhitova, R.A. Doroshenko. Magnetoelectric properties of epitaxial ferrite garnet films. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, V. 461, 128-131, WOS, Scopus, РИНЦ, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.04.042>, impact factor 2.717

Ученый секретарь ИФМК УФИЦ РАН,
кандидат физ.-мат. наук

А.А. Бунаков