



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
(МГУ)**

Ленинские горы, Москва,
ГСП-1, 119991
Телефон: 939-10-00
Факс: 939-01-26

24.03.2025 № 146-25/013-03

На № _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор Московского
государственного университета
имени М.В. Ломоносова,
проф. А. А. Федянин



2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» на диссертационную работу Темной Ольги Станиславовны на тему «Управление затуханием волн и колебаний намагниченности спиновым током в связанных ферромагнитных структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Диссертация О.С. Темной посвящена исследованию механизмов управления затуханием спиновых волн в магнетонных структурах за счет спинового тока, а также влиянию спинового тока на спектральные свойства, нелинейные эффекты и динамику связанных магнетонных систем.

Спиновые волны вызывают интерес исследователей благодаря возможности использования их уникальных свойств для создания устройств обработки и передачи информации нового типа. В частности, спиновые волны могут распространяться в магнитных материалах с малыми потерями, а на заданной частоте их длины волн могут быть на 2-3 порядка меньше, чем у электромагнитных. Одной из главных задач при создании магнетонных устройств является управление собственным затуханием колебаний намагниченности. В настоящее время исследованы несколько способов

компенсации затухания, в том числе спиновый эффект Холла, который заключается в возникновении спин-поляризованного тока вследствие влияния спин-орбитального взаимодействия на протекание электрического тока в металле. В тонкопленочных структурах типа "ферромагнетик-нормальный металл" амплитуды спиновых волн увеличиваются благодаря переносу магнитного момента из металлического слоя в ферромагнитный.

Частотные характеристики связанных структур такого типа могут иметь интересную особенность. Перенесенный из металла в ферромагнетик магнитный момент может увеличивать либо ослаблять амплитуды спиновых волн в зависимости от направления протекания электрического тока. Нормальные частоты и моды такой системы могут претерпевать вырождение в особой точке в случае, когда направления протекания электрического тока в двух структурах противоположны. Подобный эффект наблюдается и в связанных спинтронных осцилляторах, где амплитуда колебаний намагниченности свободного слоя зависит от величины постоянного электрического тока. Вырождение нормальных частот и мод магнетонных систем с подобной компенсацией затухания позволяет увеличить невзаимность спиновых волн и избирательность нормальных частот.

Из вышесказанного следует, что тема диссертации Темной Ольги Станиславовны является **актуальной**, а появление публикаций, в которых опубликованы результаты исследований, было весьма важно и своевременно.

В работе показано, что в связанных структурах "ферромагнетик-нормальный металл" в зависимости от поляризации спинового тока могут меняться величины избирательности связанных спин-волновых мод, также в таких системах могут возникать особые точки, где вырождаются нормальные частоты и моды; в связанных спинтронных осцилляторах вырождение может происходить при разных ориентациях вектора внешнего магнитного поля. В единичной структуре перенос спинового момента из металлического слоя в ферромагнитный приводит к частотному сдвигу.

Диссертационная работа по содержанию и структуре отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Работа изложена на 100 страницах, включает 33 рисунка и 1 приложение. Библиографический список включает 85 наименований. Содержание диссертации включает введение, литературный обзор, три главы с

оригинальными результатами, заключение, одно приложение, библиографический список и список публикаций по теме диссертации.

Во **Введении** обоснована актуальность темы работы, описана степень ее разработанности, сформулированы основные цели и задачи, аргументирована научная новизна исследований, а также теоретическая и практическая значимость полученных результатов; описана методология и методы исследования, указан личный вклад автора в работу, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена литературному обзору. Приведено описание используемых теоретических подходов: рассмотрены методы расчета спектров спиновых волн исходя из теорий плоских волн и спин-волновых мод; перечислены механизмы диссипации энергии в магнонных структурах и методы компенсации потерь; приведен обзор работ, в которых исследовались особые точки в магнонных и спинтронных системах.

В **Главе 2** приведены результаты исследования влияния усиления спиновых волн в структуре "ферромагнетик-нормальный металл" на резонансные частоты и величины компонент тензора магнитной восприимчивости при резонансе. Была использована модель Ландау-Лифшица-Гильберта с токовым членом в форме Слончевского-Берже, отвечающим за перенос спинового момента. Проведено сравнение полученного решения с экспериментальными данными. Показано, что спиновый ток увеличивает резонансные частоты такой структуры, то есть, уменьшение эффективного затухания делает возможным возбуждение спиновых волн с более высокими частотами при одной и той же длине волны.

В **Главе 3** исследованы характеристики идентичных связанных структур "ферромагнетик-нормальный металл". Амплитуды спиновых волн, распространяющиеся в ферромагнитных пленках, претерпевали усиление и ослабление при протекании в металлических слоях постоянного электрического тока. Структуры связаны дипольным взаимодействием. Рассчитан спектр спиновых волн, распространяющихся в связанных структурах, с учетом компенсации затухания. Найдены условия вырождения собственных частот и мод системы. Показано, что в случае, когда в обеих структурах электрический ток протекает в одном направлении, избирательность нормальных частот растет; в случае же, когда токи

протекают в противоположных направлениях, сохраняется только одна частота.

В Главе 4 проведен анализ модели связанных математических осцилляторов ДUFFинга, обладающих кубической нелинейностью, с симметричной компенсацией потерь. Показано, что в такой системе параметры, при которых появляется особая точка, могут меняться благодаря нелинейности. Исследовано влияние неизохронности на параметры системы связанных спин-трансферных наноосцилляторов. При изменении ориентации внешнего магнитного поля от положения в плоскости структур до положения, перпендикулярного к плоскости, коэффициент неизохронности резко возрастает, что приводит к сильному сдвигу собственных и нормальных частот. Показано, что направление приложения внешнего магнитного поля является параметром, который позволяет изменить величину вносимых потерь, при которых возникает вырождение.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

В **Приложении 1** даны детали некоторых вычислений.

Все перечисленные выше результаты, приведенные в Главах 2-4, получены **впервые и определяют научную новизну** работы. Кратко можно сказать, что новизна работы состоит в построении математических моделей, описывающих влияние спинового тока на динамику намагниченности дипольно связанных магнетонных волноводов и спинтронных осцилляторов, определении условий существования особых точек на плоскости параметров «электрический ток - частота»; также показана возможность управления положением особой точки за счет нелинейности спинтронных осцилляторов.

Однако, работа не свободна от недостатков, о которых следует сказать:

1. В первой главе подробно обсуждаются особые точки в магнетонных структурах и перспективы создания высокочувствительных сенсоров, при этом нигде далее нет теоретического анализа чувствительности подобного сенсора.

2. Во второй и третьей главах рассматриваются возбуждения поверхностных спиновых волн. Известно, что в магнетонных структурах также могут существовать прямые и обратные объемные волны. В тексте никак не приведено объяснение выбора частного случая выбора только одного типа волн.

3. Автор не всегда четко оговаривает ограничения рассматриваемых моделей и обосновывает выбор параметров для расчета. Например, в главе 2 принимается концепция макроспина и однородности инжектированного спинового тока, хотя ясно, что ситуация более сложная, не говоря уже об отражении магнонных мод от границ и поверхности образца. Значение феноменологического параметра C вообще не указано при сравнении с результатами работы [69].

4. В работе указывается, что усиление амплитуд спиновых волн может происходить при больших плотностях постоянного электрического тока. На практике такие плотности тока могут приводить к тому, что структуры физически разрушаются. В тексте диссертации отсутствует обсуждение этого вопроса.

5. В работе встречаются неточности в формулировках, опечатки в формулах. Например, вместо “эластичных и неэластичных” процессов рассеяния (стр.23) следует говорить об упругих и неупругих процессах; в формулах 1.27 на стр. 28 пропущен штрих у эpsilon в последнем члене, (после нее идет почему-то формула 1.24), и она же на стр 37 пишется в других обозначениях, причем под номером 1.26, который ранее был присвоен уравнению Ландау-Лифшица.

Отмеченные недостатки ни в коей мере не затрагивают основных выводов и результатов диссертации, не снижают их ценности и не ставят под сомнение положения, выносимые на защиту.

Особо следует отметить выполненный огромный объем весьма трудоемких аналитических и численных расчетов авторов, что свидетельствует о ее высокой квалификации.

Полученные в диссертационной работе результаты **имеют научную и практическую значимость**. Они вносят существенный вклад в развитие представлений о распространении спиновых волн в магнонных структурах вблизи особых точек при компенсации собственных потерь спиновым током. Они позволяют определить условия существования особых точек как в магнонных волноведущих структурах, так и в спинтронных осцилляторах при компенсации потерь и при условии дипольной связи.

Обоснованность и достоверность вошедших в диссертационную работу результатов и положений, выносимых на защиту, обеспечивается адекватным выбором физических моделей, используемым современным

математическим аппаратом, большим фактическим материалом, приведенным в работе.

Результаты диссертации могут быть рекомендованы для ознакомления и использованы в научных и образовательных организациях, где осуществляются теоретические и экспериментальные исследования магнитоупорядоченных материалов и многоплечных структур, например, ФГБУН «Институт физики им. Х.И. Амирханова» ДФИЦ РАН (г. Махачкала), ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова» (г. Москва), ФГБУН ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург), ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС» (г. Москва), ФГБОУ ВО «БашГУ» (г. Уфа), ФГАОУ ВО «БФУ им. Иммануила Канта» (г. Калининград), ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина» (г. Сыктывкар), ФГБОУ ВО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского» (г. Омск), ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН (г. Ижевск) и других научно-исследовательских учреждениях.

Результаты работы представлены в 6 статьях, опубликованных в ведущих российских и зарубежных журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus и РИНЦ, а также в 4 тезисах докладов международных и всероссийских конференций, хорошо известны специалистам.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертационная работа Темной Ольги Станиславовны на тему «Управление затуханием волн и колебаний намагниченности спиновым током в связанных ферромагнитных структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, имеющие значение для развития физики конденсированного состояния. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния (пункт 2 - Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности).

Работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе критериям раздела II Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 с последующими

изменениями, а ее автор Темная Ольга Станиславовна несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа и заключение обсуждены на заседании кафедры магнетизма физического факультета ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова» «17» марта 2025 г., протокол №3.

Доктор физико-математических наук,
профессор,



Перов Н.С.

адрес 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, стр.2

Тел.+7-495-939-1847, e-mail: perov@magn.ru

заведующий кафедрой магнетизма Физического факультета
ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова»

Доктор физико-математических наук,
профессор,



Грановский А.Б.

адрес 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, стр.2

Тел.+7-495-939-2435, e-mail: granov@magn.ru

профессор кафедры магнетизма Физического факультета
ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова»

Сведения о ведущей организации по диссертации Темной Ольги Станиславовны на тему «Управление загужением волн и колебаний намагниченности спиновым током в связанных ферромагнитных структурах», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - физика конденсированного состояния.

Организация:

Полное название: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Сокращенное название: «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Контактные данные:

Юридический адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Телефон: (495) 939-10-00

Факс: (495) 939-01-26

Адрес официального сайта в сети Интернет: <https://www.msu.ru/>

Адрес электронной почты: info@rector.msu.ru

Ректор:

академик Виктор Антонович Садовничий

Список избранных научных трудов работников организации по специальности диссертации за 2021-2025 годы:

1. E.A. Ganshina, V.V. Garshin, I.M. Pripechenkov, S.A. Ivkov, A.V. Sitnikov, and E.P. Domashevskaya, Effect of Phase Transformations of a Metal Component on the Magneto-Optical Properties of Thin-Films Nanocomposites $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$, *Nanomaterials* **11**, 1666 (2021). DOI: 10.3390/nano11071666.
2. А.М. Пикалов, А.В. Дорофенко, А.Б. Грановский, Плазмон-магнетонное взаимодействие в системе графен-антиферромагнитный диэлектрик, Письма в ЖЭТФ **113**:8, 527 (2021). DOI: 10.1134/S0021364021080105
3. E.A. Fadeev, E. Lähderanta, B.A. Aronzon, A.B. Mekhiya, Yu.E. Kalinin, V.A. Makagonov, S.Yu. Pankov, V.A. Foshin, and A.B. Granovsky, Unconventional magnetoresistance in ZnO/C multilayers at low temperatures, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **535**, 167963 (2021). DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.167963.
4. L.N. Oveshnikov, A.B. Granovsky, A.B. Davydov, A.V. Bogach, A.M. Kharlamova, and B.A. Aronzon, Magnetic and magnetotransport properties of MnSb polycrystals near equatomic composition. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **563**. 169873 (2022). DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169873.
5. Krichevsky D.M., Gusev N.A., Ignatyeva D.O., Prisyazhnyuk A.V., Semuk E.Yu, Polulyakh S.N., Berzhansky V.N., Zvezdin A.K., Belotelov V.I., Unconventional spin dynamics in the noncollinear phase of a ferrimagnet, *Physical Review B*, том 108, № 17 (2023) DOI <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.108.1744428>.
6. С. Н. Николаев, К. Ю. Черноглазов, А. В. Емельянов, А. В. Ситников, А. Н. Галденков, Т. Д. Пацаев, А. Л. Васильев, Е. А. Ганьшина, В. А. Демин, Н. С. Аверкиев, А. Б. Грановский, В. В. Рыльков. Аномальное поведение туннельного магнетосопротивления в нанокompозитных пленочных

- структурах $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}/\text{Si}$ ниже порога перколяции: проявления со-туннельных и обменных эффектов, Письма в ЖЭТФ **118**:1, 46 (2023). DOI: 10.1134/S0021364023601550.
7. T.Y. Kiseleva, V.S. Rusakov, R. Abbas, E.V. Lazareva, P.Yu. Tyapkin, K.D. Martinson, A.S. Komlev, N.S. Perov, and V.I. Popkov, Thermally Stimulated Evolution of the Crystal and Magnetic Structure of Yttrium Ferrite Garnet Nanoparticles, Crystallography Reports **68**, 478 (2023). DOI: 10.1134/S1063774523700190.
 8. M.A. Simdyanova, A.N. Yurasov, M.M. Yashin, E.A. Gan'shina, I.V. Gladyshev, V.V. Garshin, I.M. Pripechenkov, A.B. Granovsky, and A.Yu. Vlasov, Effect of granule sizes on magneto-optical spectra of nanocomposites, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **595**, 171550 (2024). DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.171550.
 9. E.V. Harin, E.N. Sheftel, V.A. Tedzhetov, D.M. Gridin, V.V. Popov, T.P. Kaminskaya, and A.B. Granovsky, Comprehensive quantifying of the Fe-Ti-B film magnetic microstructure, Thin Solid Films **807**, 140544 (2024). DOI: 10.1016/j.tsf.2024.140544.
 10. L.Y. Fetisov, D.V. Savelev, L.A. Makarova, N.S. Perov, Y.J. Qi, P. Zhou, Y.K. Fetisov, Dynamics of resonant magnetoelectric effect in a magnetoactive elastomer based cantilever: Magnetic field induced orientation transition and giant frequency tuning, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **605**, 172330 (2024). DOI: 10.1016/j.jmmm.2024.172330.
 11. Калиш А.Н., Кричевский Д.М., Белотелов В.И., Перестраиваемое поле стоячей волны в слоистых фотонных структурах, Физика твердого тела, том 66, № 11, с. 2059-2063 (2024) DOI <http://dx.doi.org/10.61011/FTT.2024.11.59348.43>
 12. D.A. Vinnik, D.P. Sherstyuk, V.E. Zhivulin, S.A. Gudkova, D.A. Pankratov, N.S. Perov, Yu.A. Alekhina, E.D. Shipkova, S.V. Trukhanov, K.A. Astapovich, T.I. Zubar, and A.V. Trukhanov, Impact of the Zn/Ni concentration on crystal structure and magnetic properties of the $\text{Co}_{0.3}\text{Zn}_{0.7-x}\text{Ni}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 0.7$) spinel ferrites, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **605**, 172344 (2024). DOI: 10.1016/j.jmmm.2024.172344.
 13. Kolosov G.A., Shorokhov A.S., Fedyanin A.A., Numerical Simulation of a Photonic Tensor Core for the Hardware Acceleration of the Optical Matrix-Vector Multiplication, Письма в ЖЭТФ, том 120, № 12, с. 932-938 (2024) DOI <http://dx.doi.org/10.1134/s0021364024603956>
 14. Gladyshev I.V., Ganshina E.A., Simdyanova M.A., Yurasov A.N., Yashin M.M., Granovsky A.B., Pripechenkov I.M., Optical and Magneto-Optical Properties of Multilayer Magnetic Structures Based on Permalloy, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, том 88, с. s76-s79 (2025) DOI <http://dx.doi.org/10.1134/S1062873824708821>

Проректор
Московского государственного
университета имени М.В.Ломоносова
профессор



А.А. Федянин

Зав. кафедрой магнетизма
д.ф.-м.н., профессор

Н.С. Перов

документ