

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

Уральского федерального университета

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

А.В. Германенко

8 ноября 2022 г.



ведущей организации 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.**

Диссертационная работа Теплова В.С. посвящена теоретической и экспериментальной разработке новых подходов, позволяющих повысить эффективность возбуждения и распространения магнитных колебаний (спиновых волн) в пленках железо - иттриевого граната. Экспериментальное исследование распространения так называемой неотраженной магнитостатической спиновой волны, возбуждаемой в линейном режиме, показало возможность увеличения длины свободного пробега и скорости распространения спиновых волн, а микромагнитное моделирование продемонстрировало возможность возбуждения нелинейных магнитных колебаний в пленках малыми полями накачки с помощью эффекта авторезонанса.

В настоящее время при создании устройств магнонной спинтроники на первый план выходят исследования диэлектрических материалов. В диэлектрических материалах (и структурах на их основе) нет носителей электрического заряда и, следовательно, нет джоулевых потерь, что открывает перспективы применения магнонных структур на основе магнитных диэлектрических материалов для создания электронной компонентной базы на новых физических принципах, исследованию и разработке которых посвящена данная диссертационная работа.

#### **Структура и содержание работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и изложена на 119 страницах.

**Во введении** обоснована актуальность исследования, поставлены цели и задачи работы, показана научная новизна исследования и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** дан обзор основных типов и свойств бегущих и стоячих спиновых волн в магнетиках. Представлены аналитические решения для линейного и нелинейного авторезонансного возбуждения колебаний намагниченности в магнетиках, получены параметры поля насыщения и поля накачки для авторезонансного возбуждения нелинейных колебаний намагниченности.

**Вторая глава** содержит полученные автором результаты экспериментального исследования процесса распространения неотраженной магнитостатической спиновой волны, формирующейся в пленке железо - иттриевого граната из-за эффекта полного неотражения поверхностной магнитостатической волны от линии дефектов. С использованием оптической методики Мандельштам – Бриллюэновского рассеяния света определены групповая скорость, длина волны и длина свободного пробега неотраженной волны и показано наличие одного волнового вектора в спектре неотраженной волны в пленке железо - иттриевого граната, что согласуется с теорией.

**В третьей главе** методом микромагнитного моделирования на основе численного решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта получены оценки поля насыщения и спектры спин-волнового резонанса (СВР) в тонкой пленке железо - иттриевого граната. Определены оптимальные параметры модели, для которых первые моды СВР согласуются с приближением Киттеля.

**В четвертой главе** на основе полученных в третьей главе моделей методом микромагнитного моделирования проведено рассмотрение авторезонанса – нелинейного процесса возбуждения слабозатухающих магнитных колебаний в пленке железо - иттриевого граната с перпендикулярной магнитной анизотропией.

Установлено влияние на процесс авторезонансного возбуждения колебаний намагниченности размагничивающих полей, затухания, величины константы одноосной анизотропии и наличия магнитокристаллической кубической анизотропии.

Установлено, что влияние размагничивающих полей на авторезонансное возбуждение колебаний намагниченности заключается в незначительном уменьшении пороговой скорости изменения частоты поля накачки. Показано, что учёт магнитокристаллической кубической анизотропии, константа которой на два порядка меньше константы наведённой одноосной анизотропии, для плёнок с ориентацией

поверхности вдоль плоскостей (100) и (111) также приводит к незначительному изменению порогового значения скорости изменения частоты поля накачки, а для плёнок с ориентацией поверхности вдоль (210) приводит к появлению параметрической неустойчивости, т. е. выходу из режима авторезонансного возбуждения колебаний намагниченности.

Основные результаты, отражающие **научную значимость работы** состоят в следующем:

- 1) В пленках иттриевого феррита-граната методом Мандельштам – Бриллюэновского рассеяния света в геометрии Даймона – Эшбаха изучен новый волновой эффект, связанный с распространением спиновых волн вблизи искусственно созданной линейной системы дефектов и образованием неотраженной спиновой волны.
- 2) Изучены процессы затухания неотраженной спиновой волны, исходной поверхностной магнитостатической волны и каустической волны, возникшей в результате взаимодействия с отдельным дефектом. Показано, что при частотах  $f = 4,0 - 4,5$  ГГц длина свободного пробега неотраженной волны превышает длину свободного пробега для других типов спиновых волн.
- 3) Экспериментально установлено, что неотраженная волна в пленке иттриевого феррита-граната распространяется узким не расходящимся пучком как вблизи, так и за пределами формирующей ее структуры искусственно созданных дефектов.
- 4) Впервые проведено численное моделирование авторезонансного возбуждения высокоамплитудных колебаний намагниченности в трехмерной модели пленок железо - иттриевого граната на основании решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта с учетом полей размагничивания, константы затухания и магнитокристаллической анизотропии.
- 5) На примере тонких пленок железо - иттриевого граната с перпендикулярной магнитной анизотропией методами микромагнитного моделирования установлены условия экспериментального наблюдения авторезонансного возбуждения колебаний намагниченности переменным магнитным полем малой амплитуды с линейно меняющейся частотой.

**Достоверность** полученных Тепловым В.С. результатов подтверждается использованием аттестованных образцов – пленок железо - иттриевого феррита-граната и аттестованного современного экспериментального оборудования с высоким

пространственным, частотным и временным разрешением, сопоставлением с результатами других исследовательских групп.

Достоверность полученных результатов определяется также использованием при проведении расчётов современного программного обеспечения (пакет MuMax3), а также сопоставлением результатов расчётов с данными, полученными в аналитической модели авторезонансного возбуждения колебаний намагниченности.

**Обоснованность выводов** диссертации базируется на согласованности полученных результатов с результатами других независимых экспериментальных исследований, а также с выводами теоретических работ.

### **Практическая значимость полученных результатов.**

Результаты по распространению неотраженной волны в пленке железо - иттриевого граната показали возможность использования искусственно созданных дефектов для контроля величины затухания спиновых волн в пленках железо - иттриевого граната.

Показана возможность создания канала распространения спиновой волны намагниченности в виде узкого не расходящегося пучка. Неотраженная спиновая волна при этом имеет скорость распространения  $1,3 \times 10^4$  м/с и длину свободного пробега порядка 1 мм, что превышает аналогичные параметры для других типов спиновых волн, возбуждаемых в данном режиме.

Методом микромагнитного моделирования установлены условия для экспериментального наблюдения явления авторезонансного возбуждения колебаний намагниченности в плёнке железо - иттриевого граната толщиной 160 нм с перпендикулярной магнитной анизотропией.

Результаты исследований, представленные в диссертации В.С. Теплова, обсуждались на Международных и Всероссийских конференциях и симпозиумах. По теме диссертационной работы опубликовано 4 статьи в российских и зарубежных журналах, которые входят в Перечень ВАК и индексируются в системе Scopus.

**Замечания.** В работе отсутствуют оценки погрешностей величин, определённых в результате микромагнитного моделирования (линейная частота прецессии намагниченности, пороговая скорость изменения частоты поля накачки, максимальный угол отклонения намагниченности и т. д.). Наличие таких оценок было бы полезно для сопоставления результатов численного моделирования и результатов, получаемых в аналитических моделях.

Указанное замечание является пожеланием и не умаляет научную и практическую ценность диссертации Теплова В.С.

В целом, диссертационная работа Теплова В.С. является законченной научно – квалификационной работой, а полученные результаты имеют практическую значимость для разработки новых СВЧ-устройств. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации и изложенные в ней результаты.

По актуальности темы исследования, научной новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов, обоснованности выводов и положений представленная диссертационная работа **«Возбуждение и распространение слабозатухающих магнитных колебаний в пленках железо - иттриевого граната»** полностью удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», 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.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании объединенного семинара кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов и отдела магнетизма твердых тел НИИ физики и прикладной математики Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (протокол № 31 от 28 октября 2022 г.).

Заведующая лабораторией магнитной доменной структуры  
НИИ физики и прикладной математики  
Института естественных наук и математики УрФУ  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Л.А. Памятных

Подпись Памятных Л.А. заверяю:



Г. А. Загирова

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Почтовый адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Тел.: (343)375-45-07

E-mail: rector@urfu.ru

<http://www.urfu.ru/>

*С отзывом ознакомлен 15.11.2022*

*Теплов В.С.*

## **Сведения о ведущей организации**

Полное наименование: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Краткое наименование: ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Почтовый адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Тел.: (343)375-45-07

E-mail: [rector@urfu.ru](mailto:rector@urfu.ru)

<http://www.urfu.ru/>

## **Основные научные направления**

1. Нелинейная динамика магнетиков.
2. Магнитная сенсорика и хиральная спинтроника.
3. Физика и технологии 3D-печати постоянных магнитов и магнитных систем.
4. Компьютерный дизайн магнитных материалов.
5. Магнитные материалы для силовой энергетики.
6. Мягкие магнитные материалы для биомедицинских приложений.
7. Ван-дер-ваальсовы двумерные магнетики для спинтронных устройств.
8. Уникальные магнитные системы.

## **Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация**

1. Lidia Pamyatnykh, Mikhail Lysov, Sergey Pamyatnykh, Georgy Shmatov. Reversal of domain walls drift direction in a low-frequency magnetic field in iron garnet crystals. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 542. 168561. (2022)  
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168561>
2. Памятных Л.А., Лысов М.С., Памятных С.Е., Агафонов Л.Ю., Мехоношин Д.С., Шматов Г.А. Механизм дрейфа доменных границ в импульсных магнитных полях в кристаллах ферритов-гранатов. // Физика твердого тела. Т.64, вып. 10. С. 1416-1423. (2022)  
DOI: 10.21883/FTT.2022.10.53083.33НН
3. Л.А. Памятных, Д.С. Мехоношин, С.Е. Памятных, Л.Ю. Агафонов, М.С. Лысов, Г.А. Шматов. Асимметричность колебаний доменных границ в гармоническом и импульсном

- магнитных полях в кристаллах ферритов-гранатов с дрейфом полосовой доменной структуры. // Физика твердого тела. Т. 61, вып. 3. С. 483-492. (2019).  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21883/FTT.2019.03.47240.280>
4. Pamyatnykh L.A., Filippov B.N., Agafonov L.Y., Lysov M.S. Motion and Interaction of Magnetic Dislocations in Alternating Magnetic Field. // Scientific Reports. Vol. 7, No. 1. – P. 18084. (2017)  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-18033-2>
  5. Y. Shimamoto, Y. Matsushima, T. Hasegawa, Y. Kousaka, I. Proskurin, J. Kishine, A. S. Ovchinnikov, F. J. T. Goncalves, and Y. Togawa. Observation of Collective Resonance Modes in a Chiral Spin Soliton Lattice with Tunable Magnon Dispersion. // Phys. Rev. Lett. 128, 247203 – 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.247203>
  6. I.G. Bostrem, V.E. Sinitsyn, A.S. Ovchinnikov, M.I. Fakhretdinov, E.G. Ekomasov. Numerical simulation of magnetic discrete breathers in a Heisenberg spin chain with antisymmetric exchange. // Lett. Mater., 2021, 11(1) 109-114.  
<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-1-109-114>
  7. Kulesh N., Permyakov N., Zverev V., Koshelev A., Bolyachkin A., and Vas'kovskiy V. Combined Micromagnetic Simulation and Machine Learning Approach to Analysis of Polycrystalline Bilayer With Exchange Bias// IEEE Transactions on Magnetics.-2022.- V.58,N2.-P.7100105 (1-5).  
DOI: 10.1109/TMAG.2021.3077288
  8. Svalov A.V., Lepalovskij V.N., Gorkovenko A.N., Makarochkin I.A., Stepanova E.A., Larrañaga A., Kurlyandskaya G.V. and Vas'kovskiy V.O. Spin Reorientation Transition and Exchange Bias in Hard/Soft Tb–Co/FeNi Films/ /IEEE Transactions on Magnetics.-2022.- V.58,N2.-P.2100605 (1-5).  
DOI: 10.1109/TMAG.2021.3087534
  9. Dryagina Anastasiia, Kulesh Nikita, Vas'kovskiy Vladimir, Patrakov Evgeniy. Synthesis and Magnetic Properties of Co Nanowires/PVDF Composites// IEEE Magnetics Letters.- 2022.- V.13. -P.6100104 (1-4).DOI: 10.1109/LMAG.2021.3125599
  10. Свалов А.В., Иванов В.Е., Лепаловский В.Н., Фещенко А.А., Горьковенко А.Н., Макарошкин И.А., Васьковский В.О., Курляндская Г.В. Особенности перемангничивания двухслойной пленочной структуры ЖИГ/FeNi// Физика твердого тела. -2022.- Т.64, вып.

9.- С.1133-1138.

DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52796.04НН

11. Svalov A.V. Kudyukov E.V., Lepalovskij V.N., Gorkovenko A.N., Stepanova E.A., Larrañaga A., Kurlyandskaya G.V., Vaškovskiy V.O., Exchange bias in FeNi/FeMn/Gd–Co trilayers: The role of the magntic prehistory.// Current Applied Physics. -2021. V.23.-P.68-75  
10.1134/S0031918X21020095
12. Свалов А. В., Макаровичин М. И., Кудюков Е.В., Степанова Е.А., Васьковский В.О., Larrañaga A., Курляндская Г.В. Изменение магнитной структуры при варьировании толщины магнитных слоев в пленках [Tb-Co/Si]n// Физика металлов и металловедение. 2021.- Т.122, № 2.- С. 125–130.  
10.31857/S0015323021020091
13. Dengina E.Yu., Bolyachkin A.S., Kulesh N.A., Vas'kovskiy V.O. Micromagnetic Modelling of Stripe Domains in Thin Films with a Columnar Microstructure//AIP Advances.-2021. – V.11,N1.-P.1-11.  
<https://doi.org/10.1063/9.0000206>
14. Васьковский В.О., Волочаев М.Н., Горьковенко А.Н., Кравцов Е.А., Лепаловский В.Н., Фещенко А.А. Структурные особенности и магнитные свойства плёнок Co-W// Физика твердого тела -2021.-Т.63, вып.7.- с.915-922.  
DOI: 10.21883/FTT.2021.07.51042.046

Ученый секретарь УрФУ

канд. техн. наук, доц.

08 НОЯ 2022



В.А. Морозова