

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и цифровому развитию

ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Алексей Александрович Короновский

«21» марта 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

по диссертации **Одинцова Сергея Александровича** «Распространение спиновых волн в ферритовых волноводах с распределенной связью и магнонных кристаллах» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.4. – Радиофизика и 1.3.5. – Физическая электроника, выполненной на кафедре нелинейной физики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора СГУ от 26 декабря 2017 года № 242 – Д, переутверждена приказом ректора СГУ от 11 июня 2021 года № 82 – Д.

Соискатель **Одинцов Сергей Александрович** с отличием окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» в 2017 году по направлению «Прикладные математика и физика» с присвоением квалификации «Магистр».

Справка об обучении № 22-2022 выдана 30 марта 2022 года Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

В период подготовки диссертации с 2017 года по настоящее время соискатель обучается в аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», работает младшим научным сотрудником лаборатории «Магнитные метаматериалы» научно-исследовательского института механики и физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Научные руководители – **Бегинин Евгений Николаевич**, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой нелинейной физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утвержденный приказом ректора от 26 декабря 2017 года № 242–Д и **Садовников Александр Владимирович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утвержденный приказом ректора от 11 июня 2021 года № 82–Д, представили положительные отзывы о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на расширенном заседании кафедры нелинейной физики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений СГУ и других образовательных учреждений высшего образования и научных организаций.

На заседании присутствовали:

1. Аникин Валерий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей, теоретической и компьютерной физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
2. Москаленко Ольга Игоревна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики открытых систем ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
3. Караваев Анатолий Сергеевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры динамического моделирования в биомедицинской инженерии ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
4. Шараевский Юрий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории «Магнитные метаматериалы» ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
5. Филимонов Юрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, директор СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;
6. Морозова Мария Александровна, доктор физико-математических наук, доцент кафедры нелинейной физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
7. Глухова Ольга Евгеньевна, доктор физико-математических наук, профессор, заведующая кафедрой радиотехники и электродинамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
8. Рыскин Никита Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник СФ ИРЭ РАН, заведующий кафедрой динамических систем на базе СФ ИРЭ РАН института физики СГУ;

9. Тихонов Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор базовой кафедры инноватики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
10. Бегинин Евгений Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой нелинейной физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
11. Гришин Сергей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
12. Садовников Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
13. Слепченков Михаил Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники и электродинамики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
14. Шунаев Владислав Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники и электродинамики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
15. Шешукова Светлана Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
16. Матвеев Олег Валерьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Магнитные метаматериалы» ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
17. Адилова Асель Булатовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нелинейной физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
18. Титов Алексей Владимирович кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры электроники, колебаний и волн ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
19. Титов Владимир Николаевич кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники, колебаний и волн ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
20. Хивинцев Юрий Владимирович кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Магнитоэлектроники СВЧ» СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;
21. Сердобинцев Алексей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;

22. Стародубов Андрей Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Материалы специального назначения» ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Рецензенты диссертации:

Тихонов Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор базовой кафедры инноватики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», представил положительный отзыв;

Шешукова Светлана Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», представила положительный отзыв.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

Заключение

по диссертации **Одинцова Сергея Александровича** «Спектры и режимы распространения спиновых волн в ферритовых волноводах с распределенной связью и магنونных кристаллах» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.4. – Радиофизика и 1.3.5. – Физическая электроника.

В диссертационной работе Одинцова С.А. решены актуальные задачи в области радиофизики и физической электроники по выявлению особенностей передачи мощности спиновых волн в планарных структурах на основе ферромагнитных микроволноводов, микроразмерных кольцевых резонаторов и магنونно-кристаллических структур в линейном и нелинейном режиме. Исследована эффективность различных способов управления режимами распространения спиновых волн в магنونных структурах путем изменения геометрических размеров структур, направления ориентации внешнего магнитного поля и величины мощности спиновой волны. Результаты работы носят фундаментальный и прикладной характер, расширяют и дополняют имеющиеся представления в области радиофизики и физической электроники, связанной с изучением линейных и нелинейных эффектов, возникающих при распространения спиновых волн в планарных магنونных структурах

Научная новизна результатов исследования.

В диссертации впервые получены следующие научные результаты:

- Выявлены механизмы передачи мощности спиновых волн различных типов в планарной системе двух связанных магнитных микроволноводов,

ограниченных по ширине и расположенных на единой подложке в линейном и нелинейном режимах.

- Предложена аналитическая модель на основе связанных уравнений Гинзбурга - Ландау, учитывающая трансформацию мод и нелинейный фазовый сдвиг, объясняющий ограничение роста длины связи при увеличении мощности сигнала, с учётом коэффициента связи, полученного для конкретных параметров связанной системы.
- Посредством численного анализа продемонстрирована возможность управления дисперсионными характеристиками и длиной связи спиновых волн при изменении ориентации внешнего магнитного поля в системе двух связанных микроволноводов, расположенных на единой подложке.
- Экспериментальными и численными методами выявлены особенности механизмов управления пространственными распределениями и передаточными характеристиками дипольных спиновых волн посредством изменения величины и направления внешнего магнитного поля в магнитных структурах двух типов: микроволноводы с кольцевым резонатором и двумерная магнитная периодическая структура.
- Установлен характер процессов обмена энергии в новом классе магнитных структур - магнитные микроволноводы, связанные через кольцевой резонатор. Выявлены основные механизмы управления режимами передачи мощности между микроволноводами посредством изменения величины и направления внешнего магнитного поля.
- Показано формирование режимов сонаправленного и противонаправленного распространения спин-волнового сигнала в магнитных микроволноводах с кольцевым резонатором, расположенным между ними, за счёт реализации режимов бегущей и стоячей волны в резонаторе.
- Обнаружена пространственная локализация спиновых волн в ферромагнитной пленке с двумерным массивом канавок на частотах, соответствующих запрещённым Брэгговским зонам. Доказана возможность управления длиной распространения локализованных в каналах волн за счёт изменения угла подмагничивания внешнего магнитного поля.
- Определены возможные режимы, устанавливаемые в резонаторе при различных соотношениях между длиной волны и плечом резонатора, В частности, при $2\lambda < d$, где λ - длина волны и d - длина плеча резонатора, связь между входным волноводом и резонатором отсутствует и волна распространяется только во входном микроволноводе. При $2\lambda \approx d$ в резонаторе образуется режим стоячей волны и мощность

перераспределяется во все выходные порты микроволноводов. При $2\lambda > d$ реализуется режим бегущей волны в резонаторе и мощность перераспределяется в выходной микроволновод, причем направление распространения в выходном волноводе противоположно направлению волны входного волновода.

- Показано, что в магнито-кристаллической структуре с волноводными каналами на частотах, где выполняется условие $k = m\pi$, D_x и $D_y \gg D_x$ (m -натуральное число), формируются локализованные вне области канавок пучки спиновых волн. Вне этих частот локализация отсутствует.
- Установлено, что ввиду трансформации поперечных волновых чисел исходная волна, имеющая в ограниченной структуре шириной wt волновое число $k_x = \pi wt$, где n -натуральное число, трансформируется в волны с поперечным волновым числом $k_x = n\pi wd$, где wd - ширина канала. При этом ширинная мода с номером n будет образовывать пучки спиновых волн, локализованные вне области канавок на поверхности пленки, в случае, когда число каналов совпадает с номером ширинной моды.

Научная и практическая значимость

Рассмотренные в работе планарные магнитные структуры с кольцевым резонатором и магнитными кристаллами могут быть применены при создании магнитных устройств обработки информации, таких как, направленные ответвители, делители и системы демультиплексирования с частотно-пространственной селективностью, управляемых величиной и направлением внешнего магнитного поля.

Результаты диссертации использовались при выполнении научных проектов, поддержанных грантами РФФИ (16-19-10283, 20-79-10191) и РФИ (16-29-14021, 16-37-00217, 18-29-27026, 18-37-00482, 18-37-20005, 19-29-03034, 19-37-80004, 19-37-90079).

ПОЛОЖЕНИЯ и результаты, выносимые на защиту

1. Для связанных планарных магнитных микроволноводов в области частоты поперечного ферромагнитного резонанса длина связи, понимаемая как расстояние, на котором происходит полная передача мощности между волноводами, зависит от величины расталкивания симметричной и антисимметричной мод электромагнитных волн, которая определяется шириной волноводов.
2. В системе двух связанных магнитных микроволноводов с кубической нелинейностью затухания, с увеличением мощности спиновой волны длина связи растёт немонотонно. Существует критическое значение мощности, выше которого длина связи становится постоянной, при этом

постоянство длины связи определяется ограничением нелинейного сдвига фаз.

3. В системе, содержащей входной и выходной магнитные микроволноводы, связанные через магнитный кольцевой резонатор, перераспределение мощности между портами волноводов определяется соотношениями длин волн λ в микроволноводах и длиной плеча d резонатора (плечо, параллельное микроволноводу).
4. В безграничной ферромагнитной пленке с двумерным периодическим массивом канавок на её поверхности, характеризующимся пространственными периодами D_x и D_y , спиновые волны демонстрируют частотно-селективное пространственное распределение за счёт наличия запрещённых Брегговских зон. В случае пленок конечных размеров распространение спиновых волн имеет модовый характер, причем существует диапазон частот, где наблюдается селективное подавление мод на частотах запрещённых Брегговских зон.

Ценность научных работ соискателя, лежащих в основе его диссертации, определяется тем, что результаты работы позволяют развить методологию исследования энергообмена спиновых волн в планарных магнитных структурах. Прикладное значение результатов исследования частотной зависимости длины связи спиновых волн в планарных магнитных структурах определяются важностью их использования при создании функциональных устройств для инфокоммуникационных систем.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных экспериментальных результатов определяется их воспроизводимостью, применением современной высокоточной измерительной аппаратуры и методов измерений, соответствием с численными и аналитическими расчётами. Достоверность результатов расчётов обеспечивается использованием адекватных математических моделей, широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя численных методов исследования. Достоверность также подтверждается отсутствием противоречий с известными опубликованными работами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: IEEE INTERNATIONAL MAGNETIC CONFERENCE (INTERMAG, 2020, 2021); MMM 2020 Virtual Conference; VII Euro-Asian symposium "Trends in Magnetism"(Екатеринбург, 2019); Joint European Magnetic Symposia (JEMS 2019); Moscow international symposium on magnetism (MISM 2017), (Москва, 2017); International symposium "Spin Waves (Санкт-Петербург, 2018); Международный симпозиум «Нанозифика и наноэлектроника» (Нижний

Новгород, 2019, 2021); Всероссийская конференция молодых учёных «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2015-2020 гг.); Международная школа-конференция «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2016), (Саратов, 2016).

Личный вклад автора. Защищаемые результаты диссертационной работы получены соискателем лично. Все приводимые в диссертации результаты численных расчётов получены лично соискателем. Экспериментальные исследования генерации и распространения спиновых волн в планарных структурах были выполнены совместно с научными руководителями.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликованы 10 статей в центральных реферируемых научных журналах, входящих в системы цитирования Web of Science, Scopus, РИНЦ, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

1. Odincov S. A., Grachev A. A., Nikitov S. A., Sadovnikov A.V. Intensity and magnetization angle recon_gurable lateral spin-wave coupling and transport // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2020. Vol. 500. P. 166344.
2. Odincov S. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sadovnikov A. V. Reconfigurable Lateral Spin-Wave Transport in a Ring Magnonic Microwaveguide // JETP Letters. 2019. Vol. 110. P. 430 - 435.
3. Odintsov S. A., Sadovnikov A. V., Grachev A. A., Beginin E. N., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A. Spatial-frequency selection of magnetostatic waves in a two-dimensional magnonic crystal lattice JETP Letters. 2016. Vol. 104. P. 563-567.
4. Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., E. N. Beginin, A. A. Grachev, V. A. Gubanov, S. E. Sheshukova, Y. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov // JETP Letters. 2018. Vol. 107. P. 25-29
5. Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., Sheshukova S. E., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A. Nonlinear Lateral Spin-Wave Transport in Planar Magnonic Networks // IEEE Magnetics Letters. 2018. Vol. 9. P. 1 - 5.
6. Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A. Spin-Wave Switching in the Side-Coupled Magnonic Stripes // IEEE Transactions on Magnetics. 2017. Vol. 53, P. 1-4.
7. Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes // Physical Review B. 2017. Vol 96. P. 144428.
8. Sadovnikov A. V., Beginin E. N., Odincov S. A., Sheshukova S. E., Sharaevskii Y. P., Stognij A. I., Nikitov S. A. Frequency selective tunable

spin wave channeling in the magnonic network // Applied Physics Letters. 2016. Vol. 108. P. 172411.

9. Одинцов С.А., Садовников А. В. Нелинейные режимы спин-волновой связи в системе неидентичных магنونных структур // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 6. С. 59–67.
10. Одинцов С.А., Садовников А. В. Нелинейная динамика спиновых волн в латеральных магнитных микроволноводах// Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 5. С. 56–68.


Итоговое заключение. Диссертационная работа «Спектры и режимы распространения спиновых волн в ферритовых волноводах с распределенной связью и магنونных кристаллах» Одинцова Сергея Александровича является научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной задачи радиофизики, заключающейся в выявлении особенностей передачи мощности спиновыми волнами в планарных структурах на основе ферромагнитных микроволноводов, микроразмерных кольцевых резонаторов и магنونно-кристаллических структур в линейном и нелинейном режиме путем изменения геометрических размеров структур, направления ориентации внешнего магнитного поля и мощности спиновой волны и актуальной задачи физической электроники, заключающейся в выявлении особенностей влияния проводимости магنونных кристаллов и запрещённых Брегговских зон на распространение спиновых волн в магنونно-кристаллических структурах с волноводными каналами. Основные положения диссертации отражены в научных публикациях в рецензируемых журналах с высоким значением импакт-фактора. Тема и содержание диссертации полностью соответствует специальностям 1.3.4. – Радиофизика и 1.3.5. – Физическая электроника. Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9–11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация «Спектры и режимы распространения спиновых волн в ферритовых волноводах с распределенной связью и магنونных кристаллах» Одинцова Сергея Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.4. – Радиофизика и 1.3.5. – Физическая электроника, как удовлетворяющая критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» для кандидатских диссертаций.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры нелинейной физики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского». Присутствовало на заседании 9 докторов наук и 13 кандидатов наук по профилю диссертации (физико-математические науки).

Результаты открытого голосования: «за» - 22 чел., «против» - нет, «воздержались» - нет (протокол расширенного заседания кафедры нелинейной физики института физики) ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» № 8 от 31 марта 2022 г.).

Председательствующий
доктор физико-математических наук,
доцент кафедры нелинейной физики
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»


410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83
Тел.: 8 (927) 220-25-47
e-mail: maluginama@yandex.ru

Морозова Мария Александровна

