

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и цифровому развитию
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»
Алексей Александрович Короновский



« 21 » сентября 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

по диссертации **Грачева Андрея Андреевича** «Управление спектром спиновых волн в латеральных гетероструктурах» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика, выполненной на кафедре физики открытых систем института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора СГУ от 26 декабря 2017 года № 242 – Д.

Соискатель **Грачев Андрей Андреевич** 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 № 89-2021 выдана 08 сентября 2021 года Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

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

Научный руководитель – **Садовников Александр Владимирович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утвержденный приказом

ректора от 26 декабря 2017 года № 242–Д, представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на расширенном заседании кафедры физики открытых систем 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 компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
2. Шабунин Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
3. Вадивасова Татьяна Евгеньевна, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
4. Шараевский Юрий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры нелинейной физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
5. Москаленко Ольга Игоревна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики открытых систем ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
6. Рыскин Никита Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник СФ ИРЭ РАН, заведующий кафедрой динамических систем на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
7. Филимонов Юрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, директор СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;
8. Тихонов Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор базовой кафедры инноватики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
9. Бегинин Евгений Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой нелинейной физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
10. Гришин Сергей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;

11. Садовников Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
12. Слепченков Михаил Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники и электродинамики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
13. Савин Алексей Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры нелинейной физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
14. Шешукова Светлана Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
15. Матвеев Олег Валерьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Магнитные метаматериалы» ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
16. Морозова Мария Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры нелинейной физики 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. Сахаров Валентин Константинович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории «Магнитоэлектроники СВЧ» СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;
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:

Филимонов Юрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, директор СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, представил положительный отзыв.

Бегинин Евгений Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой нелинейной физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», представил положительный отзыв.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

Заключение

по диссертации **Грачева Андрея Андреевича** «Управление спектром спиновых волн в латеральных гетероструктурах» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

В диссертационной работе Грачева А.А. решена актуальная задача радиофизики, заключающаяся в выявлении закономерностей управления спектром дипольных спиновых волн в латеральных гетероструктурах, образованных из двух магнонных кристаллах с пьезоэлектрическим слоем, размещенным на одном из них. С помощью радиофизических методов исследования, показано управление электрическим полем пространственных и передаточных характеристик дипольных спиновых волн в латеральных гетероструктурах. Проведены экспериментальное и численное исследования режимов формирования пространственных структур при распространении гибридных электромагнитно-спиновых волн в системе латерально связанных мультиферроиков, образованных из параллельно ориентированных ферритовых микроволноводов с сегнетоэлектрическим слоем. На основе результатов численных и экспериментальных исследований предложен способ управления дипольной спин-волновой связью в латеральном массиве ферромагнитных полосок с помощью локальных деформаций.

Научная новизна результатов исследования.

В диссертации впервые получены следующие научные результаты:

- Используя экспериментальные и численные методы выявлены механизмы управления электрическим полем пространственных и передаточных характеристик дипольных спиновых волн в одиночном магнонном кристалле с пьезоэлектрическим слоем и двух параллельно ориентированных магнонных кристаллах с пьезоэлектрическим слоем, размещенным на одном из них. Экспериментально показана возможность осуществления перестройки частотой полосы в спектре спиновых волн вследствие распределённых упругих деформаций, возникающих на интерфейсе магнонный кристалл - пьезослой.

- Установлено, что в параллельно ориентированных магнетонных кристаллах с пьезоэлектрическим слоем, расположенном над одним из них, возможно осуществление перестройки двух частотных полос не пропускания для спиновых волн, волновое число которых близко к брэгговскому волновому числу одиночного магнетонного кристалла.
- На основе результатов численного моделирования дана физическая интерпретация физического явления трансформации спектра собственных мод связанных магнетонных кристаллов, что также проявляется в изменении ширины частотных полос не пропускания вплоть до исчезновения одной из них.
- Проведены экспериментальное и численное исследования режимов формирования пространственных структур при распространении гибридных электромагнитно-спиновых волн в параллельно ориентированных ферритовых микроволноводах с сегнетоэлектрическим слоем. При выполнении измерений методом Мандельштам–Бриллюэновской спектроскопии на частотах вблизи ферромагнитного резонанса с помощью методики селекции модовых паттернов обнаружено резкое увеличение пространственных масштабов перекачки мощности между микроволноводами.
- С помощью метода Мандельштам–Бриллюэновской спектроскопии магнитных материалов продемонстрирована возможность управления дипольной спин-волновой связью в трёх связанных магнитных микроволноводах при изменении ориентации внешнего магнитного поля.
- Численно показана трансформация спектра собственных мод и изменения их дисперсии в трёх параллельно ориентированных магнитных микроволноводах при изменении угла подмагничивания.
- Предложена новая конфигурация синтетической мультиферроидной структуры, реализующая процессы распределённых упругих деформаций. Выявлены механизмы управления дипольной связью спиновых волн путем создания упругих деформаций, локализованных в области максимумов напряженности электрического поля.
- Показано, что путем изменения абсолютной величины и знака напряженности электрического поля можно управлять свойствами распространяющихся спиновых волн и пространственным распределением интенсивности динамической намагниченности в латеральной структуре

Научная и практическая значимость

Рассмотренные в работе магнетонно-кристаллические и латеральные гетероструктуры найдут применение в создании класса устройств обработки информации, таких как системы демультиплексирования с частотно-

пространственной селективностью, направленные ответвители, делители и фильтры СВЧ-сигнала, управляемые одновременно электрическим и магнитным полем.

Результаты диссертации использовались при выполнении научных проектов, поддержанных грантами РФФИ (16-19-10283, 20-79-10191) и РФФИ (16-29-14021, 16-37-00217, 18-29-27026, 18-37-00482, 18-37-20005, 19-29-03034, 19-37-80004, 19-37-90145).

Ценность научных работ соискателя, лежащих в основе его диссертации, определяется тем, что представленные результаты расширяют представления об особенностях управления спин-волновыми возбуждениями с помощью электрических и магнитных полей в поперечно-ограниченных магнитных микроволноводах и магнитных кристаллах.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных экспериментальных результатов определяется их воспроизводимостью, применением современной высокоточной аппаратуры и методов измерений, соответствием с численными 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); Moscow international symposium on magnetism (MISM 2017), (Москва, 2017); International symposium "Spin Waves", (Санкт-Петербург, 2018); Международный симпозиум «Нанозлектроника и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2019, 2021); Всероссийская конференция молодых учёных «Нанозлектроника, 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 поперечно ограниченных структурах были выполнены совместно с научным руководителем.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликованы 12 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. **Grachev A.A.**, Matveev O.V., Mruzckiewicz M., Morozova M.A., Beginin E.N., Sheshukova S.E., Sadovnikov A.V. Strain-mediated tunability of spin-wave spectra in the adjacent magnonic crystal stripes with piezoelectric layer // *Appl. Phys. Lett.* 2021. Vol 118. No. 26. P. 262405.
2. **Grachev A.A.**, Kostylev M.P., Sheshukova S.E., Sadovnikov A.V. Tunable spin-wave coupling in lateral arrays of magnonic structures for magnonic logic applications// *Proceedings of SPIE.* 2021. Vol. 11847, Saratov Fall Meeting 2020: Computations and Data Analysis: from Molecular Processes to Brain Functions. P. 118470J.
3. **Грачев А.А.**, Бегинин Е.Н., Шешукова С.Е., Садовников А.В. Управляемая электрическим полем спин-волновая связь в латеральных ансамблях магнитных микроструктур // *Физика твердого тела*, 2021, Т. 63. В. 9. с. 1279-1283.
4. **Grachev A.A.**, Beginin E.N., Sheshukova S.E., Sadovnikov A.V. Voltage-controlled spin-wave intermodal coupling in lateral ensembles of magnetic stripes with patterned piezoelectric layer // *AIP Advances.* 2021. Vol. 11. P. 035316.
5. **Grachev A.A.**, Sheshukova S.E., Nikitov S.A., Sadovnikov A.V. Strain reconfigurable spin-wave transport in the lateral system of magnonic stripes // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2020. Vol. 515. P. 167302.
6. Sadovnikov A.V., **Grachev A.A.**, Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Serdobintsev A.A., Mitin D.M., Nikitov S.A. Magnon straintronics: Reconfigurable spin-wave routing in strain-controlled bilateral magnetic stripes // *Phys. Rev. Lett.* 2018. Vol. 120. P. 257203.
7. Sadovnikov A.V., **Grachev A.A.**, Beginin E.N., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., and Nikitov S.A. Voltage-controlled spin-wave coupling in adjacent ferromagnetic-ferroelectric heterostructures // *Physical Review Applied.* 2017. Vol. 7. P. 014013.
8. Sadovnikov A.V., **Grachev A.A.**, Serdobintsev A.A., Sheshukova S.E., Yankin S.S., Nikitov S.A., Magnon straintronics as an alternative controllable way of spin-wave computation: strain reconfigurable magnonic-crystal directional coupler// *IEEE Magnetics Letters.* 2019. Vol. 10. P. 5506405.
9. Sadovnikov A.V., **Grachev A.A.**, Odintsov S.A., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S.A., Spin-wave transport along in-plane magnetized laterally coupled magnonic stripes // *IEEE Magnetics Letters.* 2017. Vol.8. Issue 1.
10. Sadovnikov A.V., **Grachev A.A.**, Beginin E.N., Odintsov S.A., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Serdobintsev A.A., Mitin D.M., Nikitov S.A., Coupled Spin Waves in Magnetic Waveguides Induced by Elastic Deformations in YIG–Piezoelectric Structures // *JETP Letters.* 2017. Vol. 106. No. 7. p. 465–469.
11. Sadovnikov A.V., **Grachev A.A.**, Beginin E.N., Odintsov S.A., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A., Spatial Dynamics of Hybrid Electromagnetic Spin Waves in a Lateral Multiferroic Microwaveguide // *JETP Letters.* 2017. Vol. 105. No. 6. p. 364–369.
12. **Грачев А.А.**, Садовников А.В. Управление спектром электромагнитных спиновых волн в гетероструктуре на основе латеральной системы магнитных

микроволноводов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 5. С. 47–55.

Итоговое заключение. Диссертационная работа «Управление спектром спиновых волн в латеральных гетероструктурах» Грачева Андрея Андреевича является научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной задачи радиофизики, заключающейся в выявлении закономерностей управления спектром дипольных спиновых волн в синтетических гетероструктурах. Тема и содержание диссертации полностью соответствует специальности 01.04.03 – «Радиофизика». 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 «Управление спектром спиновых волн в латеральных гетероструктурах» Грачева Андрея Андреевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика» как удовлетворяющая критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» для кандидатских диссертаций.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры физики открытых систем института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского». Присутствовало на заседании 8 докторов наук и 14 кандидатов наук по профилю диссертации (физико-математические науки).

Результаты открытого голосования: «за» - 22 чел., «против» - нет, «воздержались» - нет (протокол заседания кафедры физики открытых систем ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» № 2 от 21 сентября 2021 г.).

Председательствующий

доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры физики открытых систем
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Москаленко Ольга Игоревна

Адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83,
Институт физики,
Кафедра физики открытых систем.
Тел.: +7 (8452)51-72-06
E-mail: o.i.moskalenko@gmail.com

