

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.392.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»,  
МИНОБРНАУКИ РОССИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 24 декабря № 12

О присуждении **Грачеву Андрею Андреевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Управление спектром спиновых волн в латеральных гетероструктурах» по специальности 1.3.4. — Радиофизика принята к защите 18 октября 2021 года (протокол заседания № 7) диссертационным советом 24.2.392.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского», Минобрнауки России, 410012, г.Саратов, ул. Астраханская, 83, приказ Минобрнауки России о создании диссертационного совета от 15.02.2013 №75/нк; приказы об изменении состава совета от 15.12.2015 № 1598/нк-9, от 28.09.2016 № 1180/нк-52, от 15.02.2017 № 116/нк-38, от 26.01.2018 № 92/нк-50, от 17.04.2018 № 431/нк-26, от 23.11.2018 № 301/нк-66, от 24.09.2019 №873/нк-26; приказ об установлении полномочий совета от 03.06.2021 № 561-нк (Приложение 1/597); приказ об изменении состава совета от 15.10.2021 № 1046/нк-33.

Соискатель Грачев Андрей Андреевич, 28 марта 1994 года рождения, в 2017 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского») по направлению 03.04.01 «Прикладные математика и физика» с присвоением квалификации магистра. В период выполнения диссертации проходил обучение в аспирантуре ФГБОУ ВО

«СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность «Радиофизика». Работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории «Метаматериалы» научно-исследовательского института механики и физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского» Минобрнауки России.

Диссертация выполнена на кафедре физики открытых систем Института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» Минобрнауки России.

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

Официальные оппоненты:

**Устинов Алексей Борисович**, доктор физико-математических наук (01.04.03), доцент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург, кафедра физической электроники и технологии, профессор;

**Калашникова Александра Михайловна**, кандидат физико-математических наук (Doctor, Radboud University, Nijmegen, The Netherlands, 01.04.07), ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, лаборатория физики ферроиков, и.о. ведущего научного сотрудника – заведующая лабораторией,

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** — ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Сафиным Ансаром Ризаевичем, кандидатом технических наук (05.12.04), доцентом, заведующим кафедрой «Формирование и обработка радиосигналов», указала, что диссертационная работа Грачева А.А. посвящена решению актуальной задачи радиофизики, заключающейся в выявлении закономерностей управления спектром дипольных спиновых волн в латеральных гетероструктурах, образованных из массивов ферритовых микроволноводов и магنونных кристаллов, нагруженных пьезоэлектрическими или сегнетоэлектрическими слоями, и содержит оригинальные результаты, имеющие важное фундаментальное и прикладное значение для данной научной отрасли; диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», а её автор заслуживает присуждения ученой



степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Соискатель имеет 23 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 12 работ общим объемом 8.31 п. л. (авторский вклад 1.88 п. л.), из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 11 работ. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

1. **Grachev A.A.**, Matveev O.V., Mruczkiewicz 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 // *Applied Physics Letters*. 2021. Vol. 118, no. 26. P. 262405.

2. **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.

3. **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, no. 3. P. 035316.

На автореферат поступило 5 положительных отзывов: из Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН от Локка Э.Г., д.ф.-м.н. (01.04.11) и Темиряева А.Г., к.ф.-м.н. (01.04.10); из ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» от Тихонова В.В., д.ф.-м.н. (01.04.11); из Дальневосточного федерального университета от Самардака А.Г. д.т.н. (01.04.07); из МИРЭА – Российского технологического университета от Фетисова Ю.К., д.ф.-м.н. (01.04.10).

В отзывах сделаны замечания: а) об отсутствии в автореферате ссылок на близкие по тематике предшествующие работы, посвященные поперечно-ограниченным магнитным волноводам, в том числе перекачке энергии из одного волновода в другой; количественных оценок величины изменения внутреннего магнитного поля или графиков; б) редакционные замечания.

Выбор официальных оппонентов обосновывается близким соответствием проводимых ими исследований теме диссертации, их высокой квалификацией в области изучения вопросов распространения спин-волновых возбуждений в тонких ферромагнитных слоях и методам их управления, что позволяет оценить

научную и практическую значимость диссертационной работы, широкой известностью и признанными достижениями среди специалистов. Выбор официальных оппонентов объясняется, кроме того, отсутствием совместных печатных работ с соискателем. Выбор ведущей организации обосновывается её высоким авторитетом среди научно-исследовательских организаций, эффективно работающих над решением актуальных задач радиофизики, а также отсутствием договорных отношений с соискателем.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработана** радиофизическая модель для расчёта распределённых упругих деформаций в синтетических мультиферроидных структурах, позволяющая учитывать их магнитные свойства;

**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;

**установлены** зависимости трансформации спектра собственных мод и изменения их дисперсии в трёх параллельно ориентированных магнитных микроволноводах при изменении угла подмагничивания;

**выполнен** численный анализ амплитудно-частотных характеристик спиновых волн в латеральной структуре при изменении угла подмагничивания.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что

**исследованы** механизмы гибридизации поперечных мод и трансформация спектров электромагнитно-спиновых волн в мультиферроидной структуре при изменении электрического поля, приложенного к слою сегнетоэлектрика.

**установлено**, что приложение напряжения к слою пьезоэлектрика и изменение угла подмагничивания структуры приводит к локальной трансформации внутреннего магнитного поля и, как следствие, к трансформации спектра спиновых волн; при этом наблюдается возможность создания двух волноводных каналов в ЖИГ-микроволноводе;

**показано**, что вариация геометрических параметров латеральных микроволноводов приводит к изменению величины внутреннего поля и

эффективности влияния упругих деформаций на свойства распространяющихся связанных спиновых волн;

**дана** интерпретация физического явления трансформации спектра собственных мод связанных магнетонных кристаллов, в частности, проявляющаяся в изменении ширины частотных полос не пропускания вплоть до исчезновения одной из них.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

**предложены** методы управления спин-волновыми характеристиками магнетонно-кристаллических и латеральных гетероструктур, предназначенные для устройств обработки информации, включая системы демультимплексирования с частотно-пространственной селективностью, направленные ответвители, делители и фильтры СВЧ-сигнала, управляемых одновременно электрическим и магнитным полем;

**исследования выполнялись** в рамках грантов РФФИ (16-19-10283, 20-79-10191) и РФИИ (16-29-14021, 16-37-00217, 18-29-27026, 18-37-00482, 18-37-20005, 19-29-03034, 19-37-80004, 19-37-90145).

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

**использованы** широко апробированные методы и алгоритмы численного моделирования, зарекомендовавшие себя при моделировании распределённых упругих деформаций, а также распространения спиновых волн;

**установлено** качественное и количественное соответствие результатов, полученных с использованием современной высокоточной аппаратуры и методов измерений амплитудно-частотных и дисперсионных характеристик синтетических мультiferроидных структур, с численными расчётами.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты, включенные в диссертацию, получены лично соискателем. Постановка задачи, обсуждение и интерпретация результатов осуществлялись совместно с научным руководителем, а также с соавторами опубликованных работ.

Результаты работы рекомендуются к использованию в научно-исследовательских учреждениях – в Институте радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (г. Москва) и его Саратовском филиале, Национальном исследовательском университете «МЭИ» (г. Москва), Институте прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород), ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им.

В.И. Ульянова (Ленина)» (г. Санкт-Петербург), ФГБУН Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург).

Результаты могут быть внедрены в учебный процесс в высших учебных заведениях (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва)), ведущих подготовку специалистов в области исследования спиновых волн в различных магнитных структурах.

Содержание диссертации удовлетворяет 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 на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания: 1) о необходимости пояснения термина «микроволновод»; 2) о необходимости пояснения сохранения наблюдаемых эффектов в наноструктурах; 3) о необходимости пояснения сверхнизкого потребления энергии в устройствах на основе мультиферроидных гетероструктур; 4) о необходимости пояснения преимуществ элементной базы на основе мультиферроидных гетероструктур над уже существующей полупроводниковой элементной базой; 5) о необходимости пояснения термина «брэгговская запрещённая зона»; 6) о необходимости пояснения физической природы процесса «перекачки» мощности.

Соискатель Грачев А.А. ответил на замечания, содержащиеся в отзывах ведущей организации и официальных оппонентов, и на заданные ему в ходе заседания вопросы и дал необходимые пояснения: 1) уточнил, что микроволновод представляет собой мультиферроидную гетероструктуру, образованную ферритовым волноводом с толщиной 10 мкм и латеральным размером 500 мкм, при этом на спектр собственных мод спиновых волн оказывает существенное влияние учет размагничивающих факторов; 2) пояснил, что если влияние размагничивания на спектр собственных мод спиновых волн сохраняется при переходе к наноразмерным масштабам, и при этом длина распространяющейся спиновой волны позволяет не учитывать обменное взаимодействие, то результаты, полученные для микроразмерных



мультиферроидных гетероструктур будут справедливы и для наноразмерных; 3) пояснил, что в обзорах, посвященных устройствам стрейнтроники показано, что энергия переключения в устройствах магнонной стрейнотроники на два порядка ниже, чем в полупроводниковой электронике; 4) пояснил, что возможность возбуждения длин спиновых волн в наноразмерных структурах порядка десятков нанометров приводит к миниатюризации устройств обработки информации. При этом, для передачи информационного сигнала используется величина амплитуды и фазы спиновой волны, то есть угол отклонения вектора намагниченности от равновесного состояния, и не используется перенос заряженных частиц, что позволяет избежать дополнительного тепловыделения; 5) уточнил, что термин «брэгговкая запрещённая зона» для магнонного кристалла по аналогии с фотонными кристаллами используется в случае, когда рассматривается диапазон частот для спиновой волны при совпадении периода магнонного кристалла с целым числом полувольт; 6) пояснил, что микроволноводы расположены на достаточно близком расстоянии друг от друга, при этом возможным оказывается дипольная связь спиновых волн, распространяющихся вдоль каждого из микроволноводов. При этом в спектре спиновых волн рассматриваемой структуры можно выделить симметричную и антисимметричную моды, интерференция которых приводит к периодическому перераспределению мощности между микроволноводами. Таким образом, при возбуждении спиновых волн в центральном микроволноводе, сигнал перекачивается в боковые и в распределении интенсивности сигнала наблюдается модуляция, вызванная результатом интерференции собственных мод.

Диссертация Грачева А.А. содержит решение актуальных задач радиофизики, заключающихся в выявлении закономерностей трансформации спектра спин-волновых возбуждений в планарных связанных магнитных микроволноводах и магнонных кристаллах под действием упругих деформаций и при изменении ориентации внешнего магнитного поля.

На заседании 24 декабря 2021 года диссертационный совет принял решение присудить Грачеву А.А. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. - Радиофизика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 23 человек (19 человек находились в месте проведения заседания, 4

человек участвовали в заседании совета в удаленном интерактивном режиме), из них 10 докторов по специальности 1.3.4. – «Радиофизика», участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 23, против – нет, воздержавшихся – нет.

Председатель  
диссертационного совета

  
Аникин Валерий Михайлович

Ученый секретарь  
диссертационного совета

  
Сысоев Илья Вячеславович

24 декабря 2021 г.