

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе ФГБОУ

ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

д.т.н., профессор

В. К. Драгунов

» 15 июля 2021 г.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на диссертацию Грачева Андрея Андреевича «Управление спектром спиновых волн в латеральных гетероструктурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 — «Радиофизика»

**Объект и предмет исследования.** Объект исследования – планарные связанные магнитные микроволновые и магنونные кристаллы. Предмет исследования – спиновые возбуждения, возникающие в данных структурах под действием упругих деформаций и при изменении ориентации внешнего магнитного поля, особенности которых исследуются в рамках вводимых физико-математических моделей.

**Актуальность работы.** 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. Актуальность темы диссертационной работы определяется назревшей необходимостью создания элементной базы обработки информационных сигналов на принципах волновой логики, например, использование спиновых волн. В настоящее время актуальной задачей является создание управляемых элементов в микроволновом диапазоне с возможностью их продвижения в миллиметровый диапазон на основе использования синтетических мультиферроидных структур.

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 117 страниц, включая 47 рисунков, список литературы из 147 наименований.

Основные результаты диссертации изложены в **трёх** главах.

**Первая глава** посвящена выявлению закономерностей управления спектром дипольных спиновых волн в одиночных и латеральных гетероструктурах, образованных

из двух магнитных кристаллов с пьезоэлектрическим слоем, размещенным на одном из них. В рамках данной главы, с помощью численных моделей выявлены закономерности управления спектром дипольных спиновых волн в гетероструктуре, образованной из магнитного кристалла с пьезоэлектрическим слоем. При этом автором продемонстрированы новые физические эффекты, связанные с исчезновением полосы непропускания при приложении внешнего электрического поля. С помощью радиофизических методов исследования, впервые показана трансформация амплитудно-частотных характеристик дипольных спиновых волн в одиночном магнитном кристалле с пьезоэлектрическим слоем при изменении величины внешнего электрического поля. Во второй части второй главы рассмотрена система двух параллельно ориентированных магнитных кристаллов с пьезоэлектрическим слоем. Показано частотное смещение полос непропускания для спиновых волн при приложении внешнего электрического поля к пьезоэлектрическому слою, при этом также наблюдается изменение ширины частотных полос непропускания. Автором был произведён анализ спектра собственных мод латеральной гетероструктуры. Анализ показал, что при приложении внешнего электрического поля к пьезоэлектрическому слою приводит к трансформации спектра собственных мод и прекращению их вырождения.

Во *второй главе* экспериментально продемонстрировано влияние гибридизации спиновых и электромагнитных волн в системе латеральных мультиферроиков, образованных из параллельно ориентированных ферритовых микроволноводов с сегнетоэлектрическим слоем. Детально произведён анализ механизмов гибридизации поперечных мод и трансформация спектров электромагнитных спиновых волн в мультиферроидной структуре при изменении электрического поля, приложенного к слою сегнетоэлектрика. В работе впервые экспериментально продемонстрированы изменения периода пространственной перекачки энергии гибридных электромагнитных спиновых волн в поперечно-ограниченных ферритовых микроволноводах с сегнетоэлектрической нагрузкой.

В *третьей главе* посвящена численными и экспериментальным исследованиям спин-волновой динамики массивах ЖИГ-микроволноводов с помощью изменения ориентации угла внешнего магнитного поля и влияния распределённых упругих деформаций. С помощью метода Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии магнитных материалов продемонстрировано управление спектром дипольных спиновых, распространяющихся в латеральных массивах ЖИГ-микроволноводов. Показано управление характеристиками этой связи, изменяя угол статического внешнего магнитного поля, относительно главных осей геометрии. С помощью численных и экспериментальных исследований показан метод управления дипольной спин-волновой связью в латеральном массиве ферромагнитных полосок с помощью распределённых упругих деформаций. В качестве экспериментальной демонстрации исследованных физических процессов предложена конфигурация магнитной структуры с пьезоэлектрическим слоем. Показана эффективная перестройка спин-волновых характеристик с помощью электрического поля, обусловленным деформацией пьезослоя и эффектом магнитострикции в ЖИГ-микроволноводах. С помощью микромагнитного моделирования получены спектры прохождения спиновых волн в латеральной структуре. Анализ этих спектров показал, что латеральные микроволноводы могут использоваться

как функциональные элементы в планарных магннных сетях - они могут использоваться как направленный ответвитель, спин-волновой мультиплексор или микроволновый делитель мощности.

**Практическая значимость диссертационной работы.** Рассмотренные в работе магннно-кристаллические и латеральные гетероструктуры найдут применение в создании класса устройств обработки информации, таких как системы демультимплексирования с частотно-пространственной селективностью, направленные ответвители, делители и фильтры СВЧ-сигнала, управляемых одновременно электрическим и магнитным полем.

**Рекомендации по использованию материалов работы.** Полученные в диссертации результаты рекомендуются к использованию в научно-исследовательских и производственных организациях, образовательных учреждениях, сферой деятельности которых являются исследования спиновых волн в различных структурах, а также производство устройств, работающих с их использованием: Национальный исследовательский университет «МЭИ», ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (г. Москва), ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (г. Фрязино), СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (г. Саратов), Институт физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (г. Санкт-Петербург), ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва), ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (г. Саратов).

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** применением современной высокоточной аппаратуры и методов измерений амплитудно-частотных и дисперсионных характеристик синтетических мультиферроидных структур, а также их соответствием с численными расчётами. Достоверность результатов расчётов обеспечивается использованием адекватных математических моделей для расчётов распределённых упругих деформаций, широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя численных методов, включающих метод конечных элементов и метод конечных разностей. Достоверность также подтверждается отсутствием противоречий с известными опубликованными работами.

**Полнота изложения материалов диссертации в публикациях и апробация.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 статьях, в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук и индексируемых в международных реферативных базах данных, и системах цитирования Web of Science и/или Scopus. Результаты исследований апробированы на международных и всероссийских научных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации, включая актуальность, цель работы, защищаемые положения, основные результаты и личный вклад соискателя.

**По диссертационной работе имеются следующие замечания:**

1. В диссертационной работе нет развитой количественной теории, основанной на уравнении Ландау-Лифшица-Гильберта, учитывающей дипольную связь между

волноводами и подтверждающей экспериментальные результаты и численное моделирование.

2. Отсутствует подробное объяснение оптимального подбора расстояния между волноводами, обеспечивающего наибольшую эффективность перекачки энергии.
3. Не приведен строгий анализ влияния ширины волноводов на степень перекачки, в частности, особенности перекачки энергии для нановолноводов.

Тем не менее, совокупность полученных в диссертации новых результатов позволяет дать общую положительную оценку работе.

### **Заключение.**

Тема диссертации соответствует специальности 1.3.4. — Радиофизика. Автореферат достаточно полно и правильно отражает её содержание.

Диссертационная работа «Управление спектром спиновых волн в латеральных гетероструктурах» Грачева Андрея Андреевича является научно-квалификационной работой, которая выполнена на высоком научном уровне и содержит новые научные результаты, имеющие существенное значение для радиофизики.

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, а её автор, Грачев Андрей Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. — Радиофизика.

Диссертационная работа была заслушана и обсуждена на заседании научного семинара кафедры формирования и обработки радиосигналов Национального исследовательского университета «МЭИ» 10 ноября 2021 года (протокол № 4).

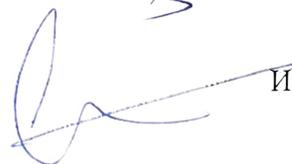
Заведующий кафедрой Формирования и обработки радиосигналов, к.т.н., доцент

Подпись А.Р. Сафина заверяю

Ученый секретарь Ученого совета НИУ «МЭИ»



А.Р. Сафин



И.В. Кузовлев

Реквизиты организации:

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), Радиотехнический факультет, кафедра Формирования и обработки радиосигналов

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, дом 14.

Тел. +7(495) 362-70-01

Факс: +7 495 362-89-38

Эл. почта: [universe@mpei.ru](mailto:universe@mpei.ru)

Сайт: <http://mpei.ru>