

ОТЗЫВ

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

В настоящее время исследование коллективной динамики спиновых волн в магнитных микро- и наноразмерных структурах привлекает внимание из-за большого потенциала в разработке элементной базы приборов обработки, передачи и хранения информации в микроволновом и терагерцевом диапазоне частот. Рассмотренные в работе волноведущие микроструктуры на основе плёнок железо-иттриевого граната являются оптимальными средами, демонстрирующими рекордно низкие величины затухания спиновых волн. Диссертационная работа Одинцова С.А. посвящена решению актуальных задач в области радиофизики и физической электроники, заключающейся в выявлении особенностей передачи мощности спиновых волн в планарных структурах на основе ферромагнитных микроволноводов, микроразмерных кольцевых резонаторов и магнотно-кристаллических структур в линейном и нелинейном режиме. Поставленные задачи диссертационного исследования являются чёткими, целенаправленными, логически и последовательно сформулированными. В диссертационной работе рассмотрен ряд магнитных микроструктур на основе массивов ферритовых волноводов и магنونных кристаллов. С помощью экспериментальных и численных методов исследована эффективность различных способов управления режимами распространения спиновых волн в магнотно-кристаллических структурах. С помощью радиофизических измерений, метода Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии и численных методов 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. Показано управление характеристиками этой связи, изменяя угол статического внешнего магнитного поля, относительно главных осей геометрии. Совокупность рассмотренных в работе планарных структур может найти применение для создания класса устройств обработки информации, таких как системы демультимплексирования с частотно-пространственной селективностью, направленные ответвители, делители и фильтры СВЧ-

сигнала, управляемых магнитным полем. Таким образом, тема диссертационной работы Одинцова С.А. и поставленные задачи, безусловно, являются актуальными и практически значимыми.

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 101 страницу, включая 31 рисунок, список литературы из 101 наименования. Диссертационная работа имеет последовательное изложение полученных результатов, чётко организованную структуру, ясное и доступное графическое оформление.

Во **введении** обоснована актуальность и новизна темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи. На основании полученных результатов приведена достоверность, описана их практическая значимость и сформулированы четыре положения, выносимые на защиту. Приведён список опубликованных по итогам диссертации работ и показаны сведения об апробации полученных результатов.

Первая глава посвящена рассмотрению методологической базы исследования процессов передачи мощности в системах связанных планарных микроволноводов, проводимого в рамках данной диссертационной работы. Конкретно рассматриваются метод теории связанных волн, электродинамический метод расчета характеристик спиновых волн, описание метода микромагнитного моделирования и описание экспериментальных методов исследований, которые используются для подтверждения результатов, полученных численно и аналитически.

Во **второй главе** показано описание структуры и представлены результаты электродинамических расчётов, рассмотрено влияние геометрических параметров структуры из двух магнитных микроволноводов, расположенных на одной подложке параллельно. Показано, что интеграл перекрытия профилей мод уменьшается с увеличением частоты. Выявлено влияние геометрических параметров структуры из двух магнитных микроволноводов, расположенных на одной подложке параллельно на длину связи дипольных спиновых волн. Показано, что распространение дипольных спиновых волн имеет многомодовый характер. Показано изменение длины связи дипольных спиновых волн в двух магнитных микроволноводах при изменении ширины волноводов и зазора между ними.

Третья глава посвящена демонстрации эффективного распространения спиновой волны в системе параллельно расположенных микроволноводов на одной подложке с кольцевым резонатором между ними. Показана возможность ответвления сигнала спиновых волн во все каналы системы и приведена частотная зависимость коэффициента передачи в каждом канале. Выявлены особенности образования волн в кольцевом

резонаторе, которые влияют на режимы распространения спиновых волн в планарной структуре. Продемонстрирована возможность управления распространения дипольных спиновых волн с помощью направления внешнего магнитного поля.

Четвертая глава посвящена исследованию эффекта пространственной селекции магнитостатических волн в ферромагнитной структуре с двумерным массивом канавок, приведены экспериментально полученные амплитудно - частотные и дисперсионные характеристики для одиночного магнетонного кристалла (МК) и планарной структуры с магнетонно-кристаллическим массивом. Продемонстрирован механизм локализации спин-волнового сигнала в микроволноводных каналах между массивами канавок при попадании частоты сигнала в запрещённую Брегговскую зону. Показано, что при изменении величины и направления внешнего магнитного поля оказывается возможным эффективное управление свойствами распространяющихся магнитостатических волн и пространственным распределением интенсивности динамической намагниченности в планарной структуре с МК.

В заключении были отмечены основные выводы диссертационной работы.

Наиболее важными результатами диссертационной работы на мой взгляд являются следующие.

1. Исследована эффективность различных способов управления режимами распространения спиновых волн в магнетонных структурах путем изменения геометрических размеров структур, направления ориентации внешнего магнитного поля и величины мощности спиновой волны.

2. 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.

3. Показано формирование режимов сонаправленного и противоположного распространения спин-волнового сигнала в магнетонных микроволноводах с кольцевым резонатором, расположенным между ними, за счёт реализации режимов бегущей и стоячей волн в резонаторе.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных высокорейтинговых журналах, что подтверждает новизну и актуальность полученных результатов. Достоверность результатов и выводов не вызывает сомнений.

В качестве замечаний можно отметить следующие:

1. Исследование нелинейных режимов распространения волн в планарных магнитных микроволноводах было бы полезно дополнить исследованием и

других типов волн, как это сделано в разделе с исследованием линейных режимов.

2. Недостаточно полноценно исследовано перераспределение дипольной спиновой волны в системе, содержащей два магнитных микроволновода, связанных через магнитный кольцевой резонатор. Экспериментальное исследование показало бы более полную картину природы режимов перераспределения мощности.
3. В диссертации имеется ряд опечаток и стилистических неточностей.

Указанные замечания ни в коем случае не принижают общего положительного впечатления от диссертационной работы.

В итоге считаю, что диссертационная работа Одинцова Сергея Александровича представляет собой решение актуальных задач радиофизики и физической электроники по поиску методов управления спектром спиновых волн в планарных магнитных структурах на основе ферромагнитных микроволноводов, микроразмерных кольцевых резонаторов и магнитных кристаллов. Диссертация полностью соответствует специальностям 1.3.4. – Радиофизика и 1.3.5. – Физическая электроника. Автореферат правильно отражает её содержание.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 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.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы 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» (Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова), ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (г. Москва), ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (г. Фрязино), СФИРЭ 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).

С учётом вышесказанного считаю, что диссертационная работа Одинцова Сергея Александровича вносит вклад в развитие современных представлений о динамике спин-

волновых взаимодействий в планарных магнитных структурах. Работа в полной мере удовлетворяет всем требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Одинцов Сергей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.4. – Радиофизика и 1.3.5. – Физическая электроника.

Официальный оппонент

Профессор кафедры физической электроники и технологии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» д-р физ.-мат. наук (01.04.03), доцент

Устинов Алексей Борисович

«14» ноября 2022 г.

Подпись А.Б. Устинова удостоверяю

Ученый секретарь совета СПбГЭТУ «ЛЭТИ»



Т.Л. Русяева

Почтовый адрес: Россия, 197022, Санкт-Петербург, л. Профессора Попова, дом 5 литера 6

Телефон: 8(812)2349983

E-mail: info@etu.ru