

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по научной работе

ФГБУН Физико-технического института

им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

доктор физико-математических наук,

П. Н. Брунков

«28» 11 2025

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Мартышкина Александра Александровича «Распространение спиновых волн в нерегулярных ферромагнитных структурах на основе сочлененных тонкопленочных микроволноводов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика

Диссертационная работа Мартышкина Александра Александровича посвящена проблеме управления распространением магнитостатических волн в волноводах сложной формы, таких как волноводы с сочленением в горизонтальной или вертикальной плоскости и волноводы с частично металлизированной поверхностью. Распространения спиновых волн в таких структурах включает в себя передачу магнитного возмущения через область сочленения, конверсию мод при переходе от одного волновода к другому. При этом центральной задачей исследований в этой области является реализация гибкого управления распространением спиновых волн, например, обратимость распространения волны, возможность переключать направление распространения волны и др. Эта область исследований в целом, и круг задач, поставленных в диссертационной работе, являются актуальными как с точки зрения получения более полной картины физических процессов, так и с точки зрения практической применимости концепций магноники.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Во введении приведена обзорная информация о современном состоянии в области магноники, сформулированы цели диссертационной работы, описана актуальность, научная и практическая значимости работы, личный вклад, и дана информация об апробации. В первой главе дана подробная информация об основных экспериментальных и теоретических методиках, применяемых в области магноники, что позволяет в дальнейшем легко ориентироваться при чтении оригинальных глав работы.

Основные результаты диссертации изложены в трёх оригинальных главах. Полный объем диссертации 120 страниц текста с 33 рисунками. Список литературы содержит 188 наименований.

Объект исследования. Объектом исследования в диссертационной работе являются нерегулярные тонкоплёночные ферромагнитные структуры, реализованные в виде сочленённых магнонных микроволноводов различной геометрии, изготовленных из железо-иттриевого граната. Рассматриваются планарные и трехмерные ортогональные соединения волноводов, а также структуры с функциональными покрытиями на поверхности (полупроводниковыми полосками и металлизацией), позволяющие управлять характеристиками распространяющихся спиновых волн.

Актуальность работы. Диссертационная работа Мартышкина Александра Александровича посвящена решению актуальной задачи радиофизики, связанной с выявлением закономерностей управления спектром и направлением распространения спиновых волн в нерегулярных ферромагнитных структурах на основе сочленённых тонкоплёночных микроволноводов. Актуальность темы диссертационной работы определяется назревшей необходимостью создания элементной базы перспективных информационно-телекоммуникационных систем на основе электрически нейтральных квазичастиц — магнонов, или спиновых волн.

Современное направление магноники развивается особенно интенсивно, и в последние годы предложен широкий ряд функциональных элементов и подходов, использующих интерференцию, дифракцию и перенаправление спиновых волн для реализации логических операций, маршрутизации сигналов и нейроморфных вычислений. Управляемые нерегулярные волноводные структуры, включающие ортогональные и трёхмерные сочленения, а также элементы с функциональными покрытиями на поверхности, открывают новые возможности для создания интегрируемых магнонных компонентов, работающих в диапазоне частот от сотен МГц до десятков ГГц. Таким образом, исследуемая в работе проблематика является актуальной и востребованной в связи с формированием научно-технологической основы для построения компактных, энергоэффективных совместимых с полупроводниковой электроникой магнонных устройств.

Практическая значимость диссертационной работы. Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что исследованные нерегулярные тонкоплёночные магнонные структуры и выявленные механизмы управления параметрами спиновых волн могут быть использованы при разработке функциональных элементов магнонных линий передачи и интегральных схем. Установленные закономерности

модового преобразования, направленного перенаправления и локализации спиновых волн в областях планарных и трёхмерных сочленений, а также в структурах с функциональными покрытиями, представляют основу для создания компактных магнонных устройств с управляемыми характеристиками. Полученные результаты дают важную информацию для создания направленных ответвителей, демультиплексоров, фильтров и других элементов магнонных систем обработки сигналов. Показанные в работе методы управления спектрально-пространственными свойствами спиновых волн за счёт изменения геометрии волноводов и ориентации внешнего магнитного поля расширяют возможности проектирования энергоэффективных волновых устройств и способствуют развитию технологической базы интегральной магноники.

Рекомендации по использованию материалов работы. Полученные в диссертации результаты рекомендуются к использованию в научно-исследовательских и 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), 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 диссертационной работы подтверждаются применением корректных численных и экспериментальных методов исследования динамики спиновых волн в тонкоплёночных ферромагнитных структурах. В работе использованы микроволновые измерения с применением векторного анализатора цепей, а также спектроскопия мандельштам-бриллюэновского рассеяния, что обеспечивает независимую экспериментальную верификацию выявленных особенностей распространения спиновых волн. Проведённое микромагнитное моделирование основано на многократно апробированном программном пакете, основанном на общепринятых приближениях, корректных для описания тонкоплёночных магнонных микроструктур, и использует параметры, согласующиеся с физическими характеристиками реальных образцов. Совпадение выявленных в численном моделировании закономерностей с результатами экспериментальных измерений подтверждает корректность применённых

методик и обоснованность сделанных выводов. Достоверность исследований также подтверждается их согласованностью с существующими представлениями в области магноники и отсутствием противоречий с опубликованными данными. Полученные результаты прошли широкую апробацию: основные положения представлены на международных и всероссийских научных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах высокого уровня, включая *Physical Review Applied* и *Applied Physics Letters*, входящих в базы *Web of Science* и *Scopus* и рекомендованных ВАК для публикации материалов диссертационных исследований. Дополнительным подтверждением надёжности и практической значимости работы являются патенты и зарегистрированные программы для ЭВМ, созданные автором по результатам диссертационного исследования. Совокупность этих факторов позволяет считать полученные результаты полностью достоверными и убедительно обоснованными.

Личный вклад автора. Все основные результаты, выносимые на защиту, получены соискателем лично. Автор самостоятельно выполнил численное моделирование, включая построение геометрических моделей сочленённых волноводов, выбор параметров дискретизации и анализ модовой структуры в областях планарных и трёхмерных сочленений. Проведён комплекс микромагнитных расчётов, необходимых для выявления закономерностей модового преобразования и условий передачи спин-волнового сигнала через ортогональные и вертикальные соединения. Экспериментальные исследования распространения спиновых волн в нерегулярных волноведущих структурах на основе плёнок железо-иттриевого граната с помощью микроволновых измерений на векторном анализаторе цепей и спектроскопии мандельштам-бриллюэновского рассеяния выполнены соискателем совместно с научным руководителем. Автор принимал непосредственное участие в подготовке образцов, проведении измерений и обработке экспериментальных данных. Личный вклад соискателя включает формулировку научной задачи, постановку моделей, проведение численных и экспериментальных исследований, интерпретацию полученных закономерностей, апробацию результатов, а также подготовку патентов, программ для ЭВМ и публикаций по теме диссертации.

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях и апробация. Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 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*, а также в сборниках научных конференций и семинаров

всероссийского и международного уровня (всего 7 статей и тезисов докладов), 2 патента и 2 программы ЭВМ.

По диссертационной работе **имеются следующие замечания:**

1. В названии диссертации, автореферате и по всему тексту работы объекты исследования названы «нерегулярными ферромагнитными структурами», «ферромагнитными плёнками» и т. п. Вместе с тем все экспериментальные структуры изготовлены из железо-иттриевого граната ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) — типичного ферримагнетика. Хотя такое употребление терминов стало традиционным в литературе по магнонике, было бы желательно во введении явно оговорить, что под «ферромагнитными» понимаются магнитоупорядоченные структуры с результирующей намагниченностью, либо использовать более нейтральные формулировки («магнитоупорядоченные», «ферримагнитные»).
2. В Главе 2 приводятся сравнительные результаты анализа полосы перекрытия частот дисперсий обратных объёмных и поверхностных магнитостатических волн, выполненного аналитически и на основе микромагнитного моделирования. При этом в диссертации не приведены подробности, как выполнялся аналитический расчёт.
3. В диссертационной работе экспериментальные исследования выполнены преимущественно на плёнках железо-иттриевого граната 10 мкм толщины, что позволило получить надёжные и воспроизводимые результаты. В то же время микромагнитное моделирование проводилось для существенно более широкого диапазона толщин, включая субмикронный и нанометровый масштаб. Проведение хотя бы нескольких дополнительных экспериментальных серий на плёнках существенно отличающейся толщины позволило бы непосредственно подтвердить предсказанную численно масштабируемость эффектов модового преобразования, изменения коэффициентов передачи в сочленениях и управления дифракционной расходимостью пучка, тем самым ещё более укрепив выводы работы о возможности переноса предложенных решений на современные тонкоплёночные и гибридные магнонные платформы.
4. В главе 3 в эксперименте рассматривается передача спиновых волн между двумя ортогонально расположенными плёнками ЖИГ через воздушный зазор. При этом в работе не приведена количественная оценка зависимости коэффициента передачи от величины этого зазора. Краткое рассмотрение данного параметра позволило бы более полно охарактеризовать технологическую устойчивость предложенной

трёхмерной конфигурации и дать практические рекомендации по допускам при изготовлении таких структур.

5. В Главе 4 рассматривается прохождение магнитостатической волны через ортогонально соединённые в вертикальной плоскости волноводы. При этом в микромагнитном моделировании показана возможность изменения длины волны прошедшей волны если два волновода имеют разную толщину. Однако соискатель рассматривает только сценарий, при котором второй волновод тоньше первого и соотношение толщин меняется в ограниченном диапазоне от 1 до $\frac{1}{4}$. Возникают закономерные вопросы. Что можно ожидать, если толщина второго волновода дадут больше толщины первого? До какого предела можно уменьшать толщину второго волновода, чтобы распространение волны в системе сохранилось и наблюдалось изменение длины волны? Чем этот предел определяется?
6. В диссертации уделено значительное внимание практическим аспектам создания компактных магнитных устройств (логические элементы, ответвители, фильтры). В то же время перспективы интеграции предложенных тонкоплёночных структур с существующими кремниевыми или КМОП-совместимыми платформами упоминаются лишь в общем виде. Краткое обсуждение технологических барьеров и возможных путей их преодоления усилило бы прикладную направленность работы.

Заключение. Диссертационная работа «Распространение спиновых волн в нерегулярных ферромагнитных структурах на основе сочлененных тонкоплёночных микроволноводов» Мартышкина Александра Александровича является научно-квалификационной работой, которая выполнена на высоком научном уровне и содержит новые научные результаты имеющие существенное значение для радиофизики, включая многочисленные приложения. Тема диссертации соответствует специальности 1.3.4. – Радиофизика. Автореферат достаточно полно и правильно отражает её содержание. Мартышкин А.А. является высококвалифицированным специалистом – радиофизиком, имеющим навыки численного моделирования и экспериментальных исследований.

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, Мартышкин Александр Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. - Радиофизика.

Диссертационная работа была заслушана и обсуждена на заседании научного семинара лаборатории физики ферроиков ФГБУН «Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» 27 ноября 2025 года (протокол № 3).

Отзыв составила:

Заведующий лаборатории физики ферроиков

Ведущий научный сотрудник

PhD (признаваемая в РФ как степень к.ф.-м.н.)



27.11.2025

А.М. Калашникова

Подпись А.М. Калашниковой заверяю

Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе

к.ф.-м.н.



27.11.2025

М. И. Патров

Реквизиты организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе российской академии наук

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Электронная почта: post@mail.ioffe.ru

Факс: (812) 297-1017

Телефон: (812) 297-2245

Сайт: <https://www.ioffe.ru>