

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Губанова Владислава Андреевича** «**Управление свойствами спиновых волн в нерегулярных структурах на основе магнетонных микроволноводов и магнетонных кристаллов**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика

Исследование характеристик спиновых волн в волноведущих структурах и магнетонных кристаллах на основе ферритовых пленок представляет собой одно из важных развивающихся направлений на стыке радиофизики, физики магнитных явлений и твердотельной электроники сверхвысоких частот (СВЧ). Актуальность этих исследований связана как с интересом к фундаментальным проблемам волновых процессов с участием спиновых волн, так и с возможностью создания новых устройств и элементной базы для твердотельной электроники СВЧ, поскольку, как известно, устройства, использующие спиновые волны обладают рядом замечательных свойств: невзаимностью, легкостью возбуждения, небольшим затуханием, и, кроме того, характеристиками и параметрами волн в этих устройствах можно управлять различными способами.

Хотя спиновым волнам и связанным с ними физическим явлениям посвящено множество исследований, многие вопросы, связанные с распространением спиновых волн в различных ферритовых структурах и магнетонных кристаллах до сих пор остались нерешенными. Именно поэтому диссертационная работа Губанова В. А., посвященная исследованию спиновых волн в нерегулярных структурах на основе магнетонных микроволноводов и магнетонных кристаллов, является **актуальной** как в фундаментальном, так и в прикладном отношении. В этой работе экспериментально и на основе микромагнитного моделирования продемонстрирована возможность управления свойствами спиновых волн при их распространении через магнитную яму, возникающую из-за уменьшения намагнитченности ферритовой пленки при воздействии на нее лазерного излучения, а также исследованы процессы перераспределения мощности спиновых волн между связанными магнетонными кристаллами разной ширины.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации – 126 страниц текста, включая 56 рисунков и список литературы из 105 наименований. Диссертация аккуратно оформлена, грамотно написана и хорошо проиллюстрирована. Использование большого количества рисунков позволило Губанову В. А. в доступной форме изложить полученные результаты, представляющие несомненный интерес для специалистов в области радиофизики и твердотельной электроники.

Во введении диссертации представлен обзор предшествующих и близких по тематике исследований, обсуждается современное положение дел в области магноники, цель, актуальность, научно-практическая значимость и апробация результатов диссертационной работы, а также обосновывается личный вклад автора и достоверность полученных результатов. Ясно сформулированы выводы к главам, а в заключении представлены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

В целом в работе изложены следующие наиболее значимые результаты.

В первой главе рассмотрены экспериментальные методы и методы микромагнитного моделирования, использованные в дальнейшем для исследования характеристик спиновых волн в ферритовых волноведущих структурах и магнетонных кристаллах, а также описаны особенности возникновения в ферритовой пленке области с меньшей намагнитченностью при воздействии на нее лазерного излучения.

Во второй главе рассмотрено распространение спиновых волн через магнитную яму, возникающую из-за уменьшения намагнитченности ферритовой пленки при воздействии на нее лазерного излучения. Представлено распределение спиновой волны в плоскости ферритовой пленки, полученное как экспериментально (методом

бриллюэновского рассеяния), так и методом микромагнитного моделирования, а также амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) коэффициента передачи для различных мод спиновой волны и различных диаметров лазерного пятна. На представленных характеристиках видно отражение спиновой волны от неоднородной области и трансформация модового состава волны, приводящая к появлению пиков непропускания на АЧХ коэффициента передачи. Показано, что, изменяя величину нагрева, можно изменять передаточные характеристики и управлять глубиной пиков непропускания на них.

В третьей главе исследована трансформация типа спиновой волны в ферритовой пленке, имеющей U-образную форму, при воздействии на нее лазерного излучения в области закругления. На основе анализа карт распределения интенсивности спиновой волны и АЧХ коэффициента передачи обнаружено, что при наличии лазерного нагрева частотный интервал АЧХ может как уменьшаться, так и увеличиваться, соответственно, для случаев возбуждения в пленке поверхностной и обратной объемной магнитостатических волн.

В четвертой главе исследованы процессы перераспределения мощности спиновых волн между магнетонными кристаллами, связанными через боковую стенку и имеющими разную ширину. Анализ распределения интенсивности спиновой волны, АЧХ коэффициента передачи и дисперсионных зависимостей, полученных экспериментально и методами микромагнитного моделирования, позволил обнаружить узкополосное ответвление спин-волнового сигнала из одного кристалла в другой на частотах Брэгговских запрещенных зон магнетонных кристаллов.

Достоверность научных результатов диссертационной работы основана на использовании современных экспериментальных методов с известным уровнем точности, а также согласием экспериментальных результатов с теоретическими моделями, которые получены надежными методами, неоднократно применявшимися в науке и технике.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что исследованные в диссертации явления могут быть использованы для создания новых устройств твердотельной электроники СВЧ (например, сужение частотной полосы выходного сигнала при прохождении спиновой волны по U-образной ферритовой пленке может быть использовано в качестве ключа сигналов спиновых волн в интегральных схемах).

По работе имеются следующие **замечания**.

1. Ряд рисунков второй главы (2.1 – 2.8) описывает распределение интенсивности спиновой волны на площади 2 мм на 3 мм, причем видно, что на рассчитанных и на экспериментальных рисунках амплитуда спиновой волны на расстоянии всего 3 мм от возбуждающего преобразователя близка к нулю для пленки ЖИГ толщиной 10 мкм. Это подтверждает и рисунок 2.9, на котором ослабление АЧХ коэффициента передачи составляет -40 – -50 дБ. Такое же сильное ослабление спиновой волны наблюдается даже для случая, когда лазерный нагрев отсутствует. Возникает вопрос: с чем связано такое сильное затухание спиновой волны в исследуемой геометрии? Ведь в других экспериментах, спиновая волна проходит в несколько раз большее расстояние с меньшим ослаблением (см., например, рис. 3.8 этой же диссертации или рис. 6 в [Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H. EPL (Europhysics Letters) 2018, V. 123, №4, P. 44003]). Такой вопрос возникает в связи с тем, что было бы интересно исследовать распределение спиновой волны после прохождения ею области лазерного пятна (т. е., для расстояний, больших 3 мм), чтобы лучше понять, как перераспределяется энергия спиновой волны после прохождения ланной неоднородности. В этой связи интересно было бы также поставить эксперимент с прохождением спиновой волны через исследованную неоднородность в неограниченной по ширине ферритовой пленке, чтобы точнее выяснить влияние краев ферритового волновода и мод волны на эффекты отражения и перераспределение энергии волны.

2. Некоторые результаты, представленные в диссертации, можно было бы изложить более просто и ясно. Например, кроме рисунков 3.2 и 3.3, на которых представлено распределение магнитного поля в U-образной структуре, хорошо было бы привести более

информативный рисунок с изменением величины магнитного поля в нескольких сечениях этой структуры включая область закругления.

3. При исследовании процессов перераспределения мощности спиновых волн в системе связанных ферритовых микроволноводов с нанесенными брэгговскими решетками следовало бы исследовать это перераспределение также для аналогичной системы связанных микроволноводов (без брэгговских решеток), что позволило бы точнее выяснить влияние брэгговских решеток на исследованные эффекты, отделив его от эффектов, характерных для системы просто связанных микроволноводов.

4. Имеется также ряд замечаний по оформлению диссертационной работы и списка литературы. Например, рис. 1.1 и 2.7. совпадают. В подписях к отдельным рисункам не приведены некоторые данные (например, в подписях к рисункам 2.9., 2.11, 2.12, 3.5 и 3.8 не приведено расстояние между преобразователями, для которого получены приведенные АЧХ). Подписи по осям многих рисунков приведены на английском языке. В списке литературы дано две ссылки на работу Дэймона и Эшбаха (№52 и №63) и на работу Гуревича и Мелкова (№8 и №45). Кроме того, в списке литературы приведена работа [Вашковский и др. Письма в ЖТФ. 1988. т. 14, № 14. с. 1294], на которую в тексте диссертации нет ссылки. Кроме того, практически нет ссылок на работы советских и российских авторов, а во всех ссылках на отечественные работы почему-то приведены их английские версии (№ 64, 73, 88, 97 и др.). А ведь многие отечественные работы были пионерскими в той области исследований, которой посвящена диссертация. Например, следовало бы дать ссылку на изобретение [Л. А. Красножен, В. И. Щеглов. Устройство для обработки электромагнитного сигнала. А.С. № 1309126, М.кл.(3) Н 01 Р 1/218, приоритет от **28.08.84**. Оф. бюлл."Открытия, изобретения", 1987, №17, с.205], в котором **впервые** описывается управление пространственно-неоднородным распределением намагниченности феррита путем воздействия светового излучения. Кроме того, следовало бы дать ссылки на работы [А.Ю. Анненков, С.В. Герус, С.И. Ковалев, ЖТФ 1998 т.68, №2, С. 91] и [А.Ю. Анненков, С.В. Герус, С.И. Ковалев, ЖТФ 2004 т.74, №2, С. 98], в которых исследуется взаимодействие спиновых волн в связанных волноводах на основе ферритовой пленки.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают высокой оценки диссертации.

В процессе выполнения работы диссертант продемонстрировал свободное владение методами экспериментальных исследований, современными методами компьютерного моделирования и численных расчетов, что свидетельствует о высокой квалификации автора.

Диссертационная работа Губанова Владислава Андреевича в представленном виде представляет собой законченное исследование по решению актуальных задач радиофизики и соответствует специальности 1.3.4. – Радиофизика.

В целом диссертация соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

По материалам диссертации опубликовано 14 работ, из них 6 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в международных базах данных Web of Science и(или) Scopus, и 8 работ в трудах международных и всероссийских конференций. Материалы диссертации доложены и обсуждены на международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях. Автореферат и опубликованные работы адекватно отражают содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования в научно-исследовательских и производственных организациях, исследующих и использующих спиновые волны для создания различных устройств. В частности, эти результаты могут использовать следующие организации: 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.

