

«УТВЕРЖДАЮ»  
Директор ИОФ РАН,  
~~Член-корреспондент РАН~~

Гарнов С.В.  
февраль 2019 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт общей физики им. А.М. Прохорова» Российской академии наук на диссертационную работу Пойманова Владислава Дмитриевича «Распространение, рассеяние и генерация спиновых волн в неоднородных магнитных структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

**Актуальность темы диссертации.** Спиновые волны – это малые возмущения намагниченности, обусловленные либо обменным, либо магнитодипольным взаимодействием между магнитными моментами в ферромагнитных материалах. Такие волны по аналогии с фотоникой могут служить для передачи сигналов или в качестве носителя данных и являются предметом изучения относительно новой отрасли физики магнитных явлений - магноники. Ее несомненным преимуществом является то, что спиновые волны могут распространяться практически без потерь на джоулево тепло, но в то же время недостатком являются пока еще относительно большие размеры магнитных устройств. В связи с этим актуализируются вопросы уменьшения их размеров. Пока что обменные волны, имеющие на порядок меньшую длину, в настоящее время распространены не так широко, как магнитостатические, однако их изучение является перспективным направлением, благодаря возможному применению в СВЧ-технике.

Одной из актуальных проблем является генерация спиновых волн в пленках, осуществить которую технологически сложнее, чем возбудить электромагнитную волну. Более того – концепция миниатюризации магнитных устройств требует внедрения механизмов генерации именно коротких волн. Существующие технологии возбуждения с помощью микрополосковых меандров, spin-transfer torque или шлемановского механизма (возбуждения однородным полем при наличии неоднородностей в пленке) генерируют волны длиной, сравнимой с размером этих неоднородностей. Кроме того, актуальными являются вопросы управления распространением спиновых волн.

Таким образом, можно заключить, что представленная работа выполнена в актуальной, быстроразвивающейся области физики магнитных явлений, связанной с возможностью создания принципиально новой базы логических элементов, основанной на применении спиновых волн. Такие элементы являются конкурентоспособной альтернативой электронике.

**Общая характеристика диссертационной работы.** В работе развиты теоретические методы исследования динамики намагниченности в структурах с однородным и неоднородным основным состоянием.

В **первой главе** описаны модели спинволновых устройств, использующие однонаправленную прецессию намагниченности как возможный механизм для создания магнонных вентилях и фазовращателей.

Во **второй главе** проведен анализ влияния неоднородного релятивистского обмена Дзялошинского на вид граничных условий, определяющих взаимный характер распространения спиновых волн в таких структурах. Последовательно и без использования приближений получены амплитудные коэффициенты рассеяния спиновой волны на границе раздела двух магнитных сред для случаев граничащих двусосных ферромагнетиков и геликоидальных структур. Такой выбор обусловлен теоретически предсказанным в работе появлением неоднородных решений дисперсионного уравнения, соответствующих локализованным вблизи границы полям, что является специфическим именно для спиновых волн. Следует отметить, что ранее вопрос рассеяния обменных спиновых волн в литературе практически не поднимался. Используя полученные неоднородные волны удалось получить замкнутую систему граничных условий для случая волн эллиптической поляризации. При исследовании поведения амплитудных коэффициентов рассеяния введено понятие импеданса для спиновой волны. Показано, что особенности спектра СВ приводят к появлению частоты, при которой рассеяние является безотражательным, что соответствует равенству импедансов двух граничащих сред. Проведено сравнение точного решения с полученным по теории возмущений. Для границы раздела геликоидальной структуры с ферромагнетиком показано, что несмотря на взаимный спектр, коэффициенты рассеяния выражаются через волновой вектор в сопутствующей системе координат и тем самым не содержат параметры геликоиды.

В **третьей главе** на основе метода Шлемана возбуждения спиновой волны рассчитаны амплитуды волн, генерируемые границей раздела двух магнитных структур. Из-за малой толщины границы длина эмитируемых волн может быть сравнимой с постоянной решетки. Внедрение такой технологии генерации может привести к уменьшению размеров соответствующих устройств на спиновых волнах и освоению диапазона

обменных волн. Проведено сравнение эффективности генерации изолированной границей и слоем. Показано, что в некоторых случаях генерация слоем может быть более чем в два раза эффективней генерации изолированной границей.

Кроме того – построена теоретическая модель, которая в рамках теории связанных мод объясняет наблюдаемое экспериментально уширение линии поглощения свободного слоя магнитного спинового клапана.

В целом работа производит хорошее впечатление по объему теоретического материала и оригинальности методов по исследованию процессов рассеяния и генерации обменных спиновых волн.

**Научная новизна.** К наиболее интересным и важным результатам работы можно отнести следующие:

1. Предложен способ получения граничных условий для компонент динамической намагниченности в киральных магнитных структурах. Это позволяет выявить особенности спектра обменных спиновых волн и учесть вклад в него неоднородного обмена Дзялошинского и поверхностной анизотропии.

2. Расширены представления о процессах рассеяния спиновых волн и учтены особенности, связанные с их квадратичным спектром, в котором в отличие от, например, электромагнитных волн дисперсионное уравнение имеет четыре корня. Эти корни истолкованы как соответствующие неоднородным, локализованным вблизи границы волнам, которые в неограниченной магнитной среде существовать не могут ввиду возрастания амплитуды. Их учет позволил получить способ нахождения амплитуд рассеянных обменных волн. Для характеристики процессов рассеяния по аналогии с электромагнетизмом введено понятие волнового импеданса для спиновых волн.

3. Предложен новый способ генерации когерентных спиновых волн однородным полем накачки, используя шлемановский механизм возбуждения на неоднородностях пленки. В качестве такой неоднородности, имеющей величину порядка постоянной решетки, выбраны изолированная граница раздела двух магнитных сред и магнитный слой. Показано, что эффективность генерации зависит от константы обмена двух слоев и разности их магнитных восприимчивостей.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность теоретических результатов работы подтверждена недавними публикациями соответствующих экспериментальных исследований, в которых наблюдались предсказанное излучение когерентных спиновых волн и уширение линии поглощения свободного слоя спинового клапана. Результаты работы докладывались на 6 международных конференциях и одном семинаре. Все сказанное убедительно свидетельствует о достоверности полученных в диссертации результатов.

**Практическая значимость** результатов заключается в возможности создания эффективных генераторов коротких спиновых волн с помощью однородного в/ч поля, что может существенно уменьшить размеры спинволновых устройств и снизить их стоимость. Рассмотренные в работе геликоидальные структуры из-за невзаимности распространения в них обменных спиновых волн могут быть использованы в качестве волноводов, в которых условия распространения волн в противоположных направлениях отличаются. Рассчитанное уширение линий поглощения слоев магнитного спинового клапана может позволить оценить влияние обменного взаимодействия вблизи поля переключения на соотношение сигнал/шум, что необходимо для правильной работы клапана.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.** Рассмотренные в диссертации вопросы рассеяния обменных спиновых волн актуализируются по мере продвижения рабочих частот устройств в высокочастотную область. Полученные результаты можно применить для проектирования генераторов коротких спиновых волн и магнитных волноводов с требуемыми, в т.ч. невзаимными свойствами. Результаты работы можно рекомендовать для ознакомления во всех организациях, занимающихся физикой магнитных явлений, и особенно магнитоикой, а также ведущих разработки элементов спинтроники и магнитоики, как например, МГУ им. М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургский университет, Саратовский госуниверситет, МИРЭА, ИРЭ, ИФМ УрО РАН, Казанский госуниверситет, Челябинский госуниверситет, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Институт общей физики им. Прохорова РАН, Саратовский госуниверситет, Институт физики им. Л.В. Киренского РАН, Институт физики им. Х.И. Амирханова РАН.

**По диссертации имеются следующие замечания.**

1. В работе отсутствует упоминание о конкретных магнитных соединениях (кроме пермаллоя) в которых можно наблюдать описываемые эффекты. Следовало бы уделить некоторое внимание хотя бы краткому обзору магнитных материалов и структур, к которым можно применить развитую теорию генерации спиновых волн, привести исходные параметры материалов и дать для них конкретные оценки длин волн и их амплитуд.
2. Коэффициенты рассеяния обменной спиновой волны желательно было бы получить не только для изолированной границы, но также и для магнитного слоя конечной толщины.
3. На рисунке 2.3 зависимости коэффициента отражения следовало бы строить от значения частоты естественного ФМР среды, на которую падает спиновая волна, так как на меньших частотах прошедшая волна не будет распространяться и подробнее обсудить этот рисунок в тексте.

Указанные замечания не носят принципиальный характер и не снижают общей высокой оценки работы.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации, новые научные результаты и выводы.

Подводя итог можно заключить, что диссертация В.Д. Пойманова является законченной научно-квалификационной работой, результаты которой имеют существенное значение для развития актуального направления физики магнитных явлений - магноники. По объему выполненных исследований, их актуальности и научному уровню диссертационная работа отвечает всем требованиям (п. II. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.) к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а Пойманов Владислав Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 - Физика магнитных явлений.

Доклад по материалам диссертационной работы Пойманова В.Д. заслушан и обсужден на заседании семинара отдела субмиллиметровой спектроскопии ИОФ РАН «30» января 2019 года.

Кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией диэлектрической спектроскопии магнитных материалов отдела субмиллиметровой спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт общей физики им. А.М. Прохорова»

Адрес: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38  
тел.: +7 (499) 503-8175, E-mail: [mukhin@ran.gpi.ru](mailto:mukhin@ran.gpi.ru)

На обработку персональных данных согласен.

Александр Алексеевич Мухин

Подпись Мухина А.А. удостоверяю

Ученый секретарь ИОФ РАН

д. ф.-м. н. С.Н. Андреев