

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе

Пойманова Владислава Дмитриевича

«Распространение, рассеяние и генерация спиновых волн в неоднородных магнитных структурах»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений

Диссертационная работа Пойманова В.Д. посвящена теоретическому исследованию центральных вопросов быстро и успешно развивающейся области магнетизма – магноники. Хотя магноны, или что тоже самое спиновые волны, предложенные для квазичастичного описания возбуждения магнетиков Блохом, известны с 30-х годов прошлого века, только недавно были осознаны их преимущества для построения магнитных логических устройств, магнитных датчиков, освоения терагерцовой области спектра и др. Магноны распространяются на существенно большие расстояния чем спиновая поляризация электронов в металлах или полупроводниках, причем в диэлектриках с существенно меньшими потерями, да и волновая природа магнонов открывает новые перспективы в использовании их нелинейных свойств. Именно поэтому развитие магноники отмечалось как приоритетное направление в Дорожной карте магнетизма 2014 и 2017 г. В мире (в том числе и в России), существует несколько научных школ, занимающихся разработкой и внедрением в технологии приборов, способных генерировать, передавать и контролировать поведение как магнитостатических, так и обменных спиновых волн. Если для однородных ферромагнетиков спектры магнонов, их распространение, отражение и преломление в основном поняты, то в более сложных случаях теория находится только в первоначальной стадии. В силу этого тема диссертации Пойманова В.Д. актуальна, а появление работ, на которых основана его диссертация было весьма важным и своевременным.

Диссертация скомпонована традиционно и состоит из введения и трёх глав, включая литературный обзор. В конце каждой главы и работы в целом содержатся обстоятельные выводы. Диссертационная работа изложена на 116 страницах печатного текста, содержит 26 рисунков, 4 таблицы и 2 приложения на 7 страницах. Цитировано 109 литературных источников, что свидетельствует о хорошем знакомстве диссертанта с научной периодикой по теме исследования.

Первая глава содержит литературный обзор, который достаточно полно суммирует известные результаты и в нем даны различные примеры простейших магنونных устройств – вентиляей, фазовращателей и др., введено понятие магنونного показателя преломления и локальной частоты ферромагнитного

резонанса. Обзор написан подробно и ясно, хорошим литературным языком, и проведенный критический анализ позволил автору наметить пути реализации поставленных задач.

Вторая и третья главы содержат оригинальный материал. Новизну работы определяет совокупность полученных данных о рассеянии обменных спиновых волн плоской границей при наличии обменного взаимодействия Дзялошинского-Мория. Предложен способ генерации обменных спиновых волн интерфейсом при возбуждении однородным полем накачки, проведен анализ затухания в свободном и пинингованном слоях спинового вентиля при обменной связи между ними.

Для решения задачи о рассеянии обменных спиновых волн плоской границей раздела автором во **второй главе** выведены граничные условия для компонент динамической намагниченности, которые учитывают наличие неоднородного обмена Дзялошинского и поверхностную анизотропию. Затем, решая уравнение Ландау-Лифшица, были найдены как точно, так и в рамках теории возмущений по параметру эллиптичности частотные зависимости неоднородных и объемных волн.

В **третьей главе** диссертации предложен и теоретически описан новый механизм генерации спиновых волн однородным полем накачки. Подобно известному механизму Шлемана, использующему геометрические и магнитные неоднородности в пленке, в их качестве рассматривается граница (интерфейс) между двумя магнитными материалами при наличии обменной связи между ними. Генерируемые волны трактуются как решения однородного уравнения Ландау-Лифшица с неоднородными граничными условиями, в правую часть которых входят восприимчивости, характеризующие отклик системы на однородное поле. Следовательно, эффективность генерации определяется не только величиной обменной межслойной константы, но и разностью восприимчивостей. Амплитуда генерируемых при этом волн ограничена только параметрами затухания материала, а длина – толщиной интерфейса порядка постоянной решетки. Таким образом, рассмотренный метод позволяет генерировать относительно короткие спиновые волны. При этом, если частота поля накачки близка к резонансной для одной из сред, вблизи границы их амплитуда в этой среде практически равна нулю, что соответствует случаю динамического пиннинга.

Далее рассмотрена генерация спиновых волн магнитным слоем конечной толщины. Проведен сравнительный анализ эффективности генерации слоем и изолированным интерфейсом. В зависимости от частоты накачки интерференция волн, отраженных от двух границ, может быть как конструктивной, так и деструктивной. В первом случае это позволяет генерировать волны с амплитудой,

более чем в два раза превышающей амплитуду при генерации изолированным интерфейсом.

Далее в этой же третьей главе выполнен довольно трудоемкий расчет влияния межслойного обменного взаимодействия, пусть даже слабого, в спиновом вентиле на параметры затухания свободного и пинингованного слоя. В рамках теории связанных мод получено, что это влияние существенно в области поля переключения, что не только позволяет объяснить имеющийся эксперимент, но и позволяет определить величину этого обменного взаимодействия.

Не имея возможности в отзыве остановиться на всех новых и полезных результатах, полученных в работе, выделю только некоторые из них, имеющие, по мнению оппонента, наибольшее значение:

1. Впервые в континуальном приближении выведены граничные условия для намагниченности с учетом конечного межслойного обмена, антисимметричного обмена Дзялошинского-Мория и наличия поверхностной магнитной анизотропии.
2. Рассчитаны коэффициенты рассеяния обменных спиновых волн для границы раздела двуосных ферромагнетиков и неоднородных киральных магнитных структур, возникающих при наличии антисимметричного обмена Дзялошинского-Мория. При сшивке падающих и рассеянных волн на границе становится существенным учет неоднородных спиновых волн — экспоненциально затухающих решений уравнений Ландау-Лифшица. Наличие неоднородных спиновых волн оказывает существенное значение на характер рассеяния, отражения и прохождения спиновых волн через границу. В зависимости от соотношения частот однородного ФМР в соприкасающихся ферромагнетиках, частотная зависимость коэффициента отражения может быть монотонной или же иметь минимум.
3. Предложен метод генерации спиновых волн в пленке пространственно однородным полем накачки при наличии обменной связи между слоями для изолированного интерфейса. Показано, что эффективность генерации определяется различием в магнитных восприимчивостях граничащих сред. Полученные результаты позволили объяснить на качественном уровне три независимых эксперимента, в которых спин-волновая эмиссия наблюдалась от границ раздела в магнитных структурах, и открывают путь к генерации обменных спиновых волн с ультрамалой длиной волны.
4. Этот же метод генерации при наличии двух интерфейсов, за счет конструктивной интерференции может дать двукратное усиление сигнала
5. Рассчитано уширение линий поглощения для слоев спинового клапана вблизи поля переключения свободного слоя. Получено, что в магнитном спиновом клапане прецессия свободного слоя имеет уменьшенную амплитуду и увеличенную релаксацию. Коллективный характер прецессионной динамики,

связанный с «перемешиванием» параметров свободного и закрепленного слоев, возникает даже при слабой обменной связи между этими слоями.

Достоверность научных результатов диссертационной работы обеспечивается применением хорошо апробированных методов теоретической физики. В предельных частных случаях результаты совпадают с литературными данными.

Однако, диссертация Пойманова В.Д. не свободна от недостатков:

1. При выводе граничных условий считается, что обменная связь между слоями осуществляется только между двумя слоями, хотя очевидно, что это редко реализующийся случай. Желательно было бы обсудить, как это приближение короткодействия может повлиять на характер распространения спиновых волн.
2. Предложенный метод генерации спиновых волн перспективен. Но автор диссертации не обсуждает его преимущества перед стандартным методом Шлемана, когда дефект имеет тот же размер, что и интерфейс. Также не дано оценок предельной наименьшей длины спиновой волны и соответствующей амплитуды. Весьма заманчиво, как предлагает автор, генерировать спиновые волны не высокочастотным магнитным полем, а электрическим, или лазерными импульсами, но эти предложения не конкретизированы.
3. В третьей главе описан эксперимент по динамике спинового клапана, по-видимому, для иллюстрации, так как этот эксперимент выполнен не соискателем, и он на него не претендует. Но это описание фрагментарно, даже не указаны используемые материалы (в исходной статье изложение подробно), поэтому достаточно было просто сослаться на соответствующую статью.
4. Работа хорошо оформлена, но содержит много нестандартных сокращений (например, СС или ЗС). В литературном обзоре не расшифровано значение термина «метод spin-torque» и не обсуждаются достоинства и недостатки этого метода.

Как следует из самого характера сделанных замечаний, они ни в коей мере не затрагивают выводы работы, а носят скорее характер пожеланий.

Работа выполнена на высоком научном уровне, в ней получен целый ряд новых и полезных результатов, имеющих большое научное и практическое значение. Результаты работы можно рекомендовать для ознакомления во всех организациях, занимающихся физикой магнитных явлений, и особенно магноники, а также ведущих разработки элементов спинтроники и магноники, как например, МГУ им. М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургский университет, Саратовский госуниверситет, МИРЭА, ИРЭ, ИФМ УрО РАН и др. Рассмотренные

в диссертационной работе методы и полученные результаты можно внедрить в программы спецкурсов «Физика магнитных явлений» и «Волновые процессы».

По теме диссертации имеется 3 статьи в престижных зарубежных (Physical Review B и Journal of Applied Physics) и отечественных журналах, рекомендованных ВАК, одна глава в коллективной монографии, результаты работы неоднократно докладывались на конференциях.

Автореферат точно и полностью соответствует содержанию диссертации.

Резюмируя сказанное можно констатировать, что диссертация Пойманова В.Д. на тему «Распространение, рассеяние и генерация спиновых волн в неоднородных магнитных структурах» посвящена актуальной теме, содержит ряд новых, важных в научном и практическом плане результатов, которые вносят значительный вклад в понимание особенностей генерации, распространения и рассеяния спиновых волн в неоднородных структурах. Считаю, что диссертационная работа Пойманова Владислава Дмитриевича соответствует как паспорту научной специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений, так и требованиям п.п. 9–11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, а её автор, безусловно, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Профессор, доктор физико-математических наук
(01.04.11 – физика магнитных явлений),
профессор кафедры магнетизма физического факультета
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Александр Борисович Грановский

119991, Российская Федерация, г. Москва,
Ленинские горы, д. 1
+7-495 9394787 , granov@magn.ru

«4» февраля 2019 г.

Подпись профессора кафедры магнетизма Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова д.ф.-м.н., проф. А. Б. Грановского заверяю
Декан физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

проф. Н.Н. Сысоев