

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»» (ФИЦ КазНЦ РАН)

Российская Федерация, Республика Татарстан,
Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31



Член-корреспондент РАН

Калачев Алексей Алексеевич

« 14 » сентября 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Скореходова Евгения Владимировича

«Зондовая магнитно-резонансная силовая спектроскопия ферромагнитных наноструктур», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 — «Приборы и методы экспериментальной физики»

Актуальность темы

В последние десятилетия изучение различных свойств тонкопленочных ферромагнитных наноструктур привлекает внимание большого количества исследователей. Это связано с возможностью использования магнитных наноструктур в микро- и нанoeлектронике в качестве элементов памяти для сверхплотной записи информации, источников и детекторов СВЧ - поля, высокочувствительных датчиков магнитного поля и пр. Кроме этого магнитные наночастицы представляют интерес для приложений в биомедицине, например, в качестве лечебного препарата в онкологии или диагностики заболеваний.

Вследствие развития магноники и СВЧ - спинтроники большой интерес вызывают СВЧ-свойства магнитных наносистем. Самым распространенным методом изучения ферромагнитного резонанса (ФМР) является магнитно-резонансная спектрометрия, основанная на измерении поглощения СВЧ - излучения образцом, расположенным внутри высокодобротного резонатора или на копланарном волноводе. Однако для данного метода требуется приготовление больших массивов одинаковых элементов, что является трудоемкой технологической задачей. В рамках диссертационной работы Скореходова

Е.В. был развит метод магнитно-резонансной силовой микроскопии (МРСМ), обладающий большой чувствительностью, и позволяющий регистрировать локальные резонансы пленок и отдельных наночастиц. Данный метод позволяет не только изучать, но также и управлять спектром ФМР. С помощью метода МРСМ автором был исследован ФМР в многослойных пленках Co/Pt с перпендикулярной магнитной анизотропией; микрополоске пермаллоя; нанопроволоке V-образной формы, содержащей доменную стенку, и магнитном диске, находящемся в вихревом магнитном состоянии.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и работ автора по теме диссертации. Общий объем работы составляет 118 страниц, содержит 75 рисунков. Список литературы включает 112 наименований.

В первой главе автором проведен обзор по методам изготовления паттернированных магнитных наноструктур, используемых в диссертационной работе, а также по экспериментальным методам изучения спектров ферромагнитного резонанса в тонкопленочных ферромагнитных наносистемах.

Во второй главе обсуждается отработка экспериментальных методов исследования локального ФМР в тонкопленочных структурах с помощью разработанного в ИФМ РАН магнитно-резонансного силового микроскопа. Приводятся результаты исследований зависимости резонансных частот ФМР от доменной структуры и обменного взаимодействия в многослойных пленках Co/Pt с перпендикулярной магнитной анизотропией. Методами магнитно-силовой микроскопии продемонстрировано, что в пленках Co/Pt в нулевом внешнем магнитном поле может существовать несколько устойчивых магнитных состояний с различной доменной структурой. Каждому магнитному состоянию соответствует свой спектр ФМР. Изучено влияние размеров доменов на значения резонансных частот. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, полученными методами оптической магнитометрии, магнитно-силовой микроскопии, а также с аналитическими моделями.

Третья глава посвящена изучению спектров ФМР в микрополосках пермаллоя методами численного моделирования, магнитно-резонансной спектроскопии и МРСМ. Установлено, что МРСМ спектр существенно зависит от взаимного расположения зонда и исследуемого образца. Прежде всего, меняется форма резонансной линии, что позволяет делать выводы об области локализации резонансной моды. Продemonстрировано, что в микрополоске есть несколько спин-волновых резонансов, локализованных

преимущественно в центре, и несколько краевых мод, локализованных на конце микрополоски.

В четвертой главе изучались спектры ФМР в ферромагнитных частицах, находящихся в неоднородном состоянии. Методом численного моделирования предсказан резонанс доменной стенки в ферромагнитной нанопроволоке V-образной формы, который затем впервые методами магнитно-резонансной силовой микроскопии был обнаружен экспериментально. Другим объектом исследования являлся ферромагнитный диск, находящийся в вихревом магнитном состоянии. Была исследована перестройка частоты гиротропной моды под действием магнитного поля, создаваемого МРСМ зондом. Резонансная частота гиротропной моды меняется в сторону увеличения или уменьшения в зависимости от взаимной ориентации намагниченности зонда и кора вихря. МРСМ измерения также позволили зарегистрировать изменение направления намагниченности кора вихря. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами моделирования и аналитическими расчетами.

В заключительном разделе сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Наиболее важными результатами диссертации являются:

- 1). Впервые методом магнитно-резонансной силовой спектроскопии были получены спектры ферромагнитного резонанса в многослойных пленках Co/Pt с перпендикулярной магнитной анизотропией. Продемонстрирована зависимость резонансных частот от размеров доменов многослойных пленок Co/Pt.
- 2). Исследованы колебания намагниченности в планарной ферромагнитной микрополоске V-образной формы с углом при вершине 60° . Методами микромагнитного моделирования показано, что при намагничивании в плоскости образца перпендикулярно оси симметрии микрополоски в ней реализуется 60° доменная стенка, с которой связана локализованная мода спин – волнового резонанса на частоте в области 1.6 ГГц. Впервые методом магнитно-резонансной силовой спектроскопии зарегистрирован ферромагнитный резонанс на частоте 1.6 ГГц и получено магнитно-резонансное изображение образца, подтверждающее локализацию данного резонанса в области изгиба микрополоски.
- 3). Впервые проведены исследования влияния магнитного поля зонда магнитно-резонансного силового микроскопа на гиротропную моду резонансных колебаний магнитного вихря в ферромагнитном диске. Показано, что в зависимости от взаимной ориентации магнитного момента зонда и кора вихря, магнитное поле зонда приводит к

смещению резонансной частоты гиротропной моды либо в область высоких частот, либо в область низких частот.

Результаты, полученные Е.В. Скороходовым согласуются с известными экспериментальными результатами других авторов и не противоречат современным физическим представлениям. Положения диссертации вполне обоснованы полученными экспериментальными и расчетными результатами.

Достоверность полученных результатов и выводов, представленных в диссертации, обеспечивается применением современного исследовательского и технологического оборудования, использованием современных экспериментальных методик, а также согласованностью полученных результатов с теоретическими оценками и литературными данными. Материалы диссертации прошли апробацию на международных и российских конференциях и опубликованы в высоко-рейтинговых рецензируемых научных журналах.

Научная и практическая значимость работы заключается в получении новых знаний о резонансных свойствах тонких ферромагнитных пленок и планарных ферромагнитных наноструктур. Развитые в работе экспериментальные методы позволяют исследовать с высокой чувствительностью ФМР спектры отдельных элементов в массивах ферромагнитных наноструктур и селективно перестраивать их резонансные частоты. Полученные результаты представляют практическую ценность для разработки устройств источников СВЧ-излучения на основе спин-трансферных наноосцилляторов, СВЧ – фильтров на основе пленок с перпендикулярной магнитной анизотропией.

Замечания по автореферату и диссертации Скороходова Е.В.

Общие замечания по диссертации

1. Глава 1 диссертации не является в обычном смысле литературным обзором, в котором рассматриваются различные известные методы изготовления и исследования магнитных микро- и наноструктур. Например, в ней не упоминается метод сканирующей зондовой нанолитографии. Поэтому в первой главе фактически излагаются методы получения и исследования образцов, представленных в диссертации.

2. В тексте отсутствуют данные об оптической магнитометрии (приводятся только петли гистерезиса, без указания, как они были получены), хотя этот метод упоминается в основных результатах и защищаемых положениях диссертации. Краткое описание используемого метода на основе магнито-оптического эффекта Керра приведено в работе автора [A2].

3. В конце диссертации в разделе основные результаты работы указывается: «Разработан и изготовлен магнитно-резонансный силовой микроскоп оригинальной конструкции, предназначенный для исследования ферромагнитного резонанса магнитных наноструктур...» Однако в диссертации и автореферате нет данных о том, каков личный вклад автора в разработку и изготовление экспериментальной установки.

Замечания по тексту автореферата

Стр 9. В тексте указано, что толщина пленки пермаллоя составляет 40 нм. В таком случае не ясно, почему она находится в однородном магнитном состоянии при анизотропии типа легкая плоскость в отсутствие внешнего магнитного поля? То же самое касается и пленки Co/Pt. В отсутствие внешнего магнитного поля такая пленка имеет лабиринтную доменную структуру, что и показано на рис. 3. Скорее всего, нужно было написать, что "обе пленки находятся в однородном магнитном состоянии во время МРСМ измерений".

Раздел 3.2. Во второй главе считалось, что намагниченность зонда перпендикулярна поверхности образца. Получается, что здесь зонд предварительно намагничивался в нужном направлении и об этом не стали упоминать?

Замечания по тексту диссертации

Стр. 96 - указывается: «Видно, что для конфигурации Г-Г имеется сдвиг резонансной частоты в область более низких частот». Однако нет объяснения, почему происходит сдвиг резонансной частоты, при переходе от одной доменной структуры к другой.

Стр.101. - Ранее (раздел 2) было показано, что при приближении зонда к поверхности происходит расщепление резонанса на два и смещение одного из них в область высоких частот, когда намагниченности зонда и образца совпадают и в область низких частот, когда не совпадают. В данном случае - при приближении к поверхности аналогичным образом происходит смещение резонанса в зависимости от направления намагниченности кора вихря и зонда. Отсюда вопрос - наблюдается ли в данном случае раздвоение резонанса и если да, то результаты приведены только для одного резонанса, который меняет свою частоту?

Опечатки и неточности в тексте автореферата

Стр. 9. Нет расшифровки обозначения 14, показанного на рис. 1а. Опечатка – в тексте КГЦ, а нужно кГц.

Стр.11. Не ясно направление внешнего магнитного поля, в плоскости пленки или перпендикулярно ей.

Стр. 15. В подписи к рисунку 8 нет расшифровки для чисел 1- 4, представленных на рис. 8а и б.

Стр. 17. На рис. 10 обозначения рисунков русскими буквами, а в подписи к рисункам – латинскими.

Опечатки и неточности в тексте диссертации

Стр. 32. Написано, что эффективное поле определяется через плотность энергии ферромагнетика, а в расшифровке эффективного поля приведены энергии.

Стр. 47. Написано, что «Второе слагаемое в (1.19) является магнитной силой», но в уравнении 1.19 второго слагаемого нет.

Стр. 53. Подпись под рисунком не соответствует рисунку 2.4.

Стр. 63. На рис. 2.12 представлены МРСМ спектры для случая, когда магнитный момент зонда и намагниченность пленки противоположно направлены. В первом случае измерения проводятся при нулевом внешнем поле. Однако на рисунке везде указано присутствие внешнего поля.

Стр. 63. – написано: «Возникающий высокочастотный резонанс связан с прецессией намагниченности в области под зондом (эта область отмечена синим цветом на рис. 2.9 (б))». Однако очевидно, что речь идет не о рис. 2.9б (такого вообще нет), а о рисунке 2.12б.

Стр. 83. - На рис. 3.14 не указан размер размерного бара. По этой причине не понятны размеры полосок и расстояние между ними.

Стр. 101. Нет расшифровки сокращений - "голова -хвост" и "голова к голове" (Г-Г, Г-Х).

Приведенные замечания однако не снижают общей высокой оценки представленной диссертации. В целом следует отметить, что диссертационная работа Скороходова Е.В. демонстрирует высокую квалификацию автора как физика-экспериментатора и является существенным вкладом в области создания новых методов изучения магнитных микро- и нано структур.

Полученные результаты представляют большой интерес (значимость) и могут быть рекомендованы к использованию в Институте физики твердого тела РАН (г. Черноголовка), Казанском федеральном университете, Казанском физико-техническом институте ФИЦ КазНЦ РАН, Московском государственном университете, Институте общей физики им. Прохорова РАН (г. Москва) и в ряде других научных центрах, занимающихся исследованиями по данной тематике.

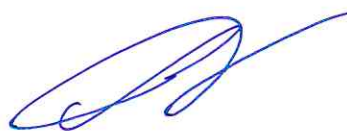
Основные результаты диссертации опубликованы в 11 статьях в научных журналах, входящих в перечень ВАК, а также докладывались на ряде российских и международных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает её основное содержание.

По своему содержанию, объему, достоверности, новизне и практической значимости полученных результатов диссертация на тему «Зондовая магнитно-резонансная силовая спектроскопия ферромагнитных наноструктур удовлетворяет всем требованиям ВАК и «Положению о порядке присуждения степеней», утвержденному

постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, а ее автор Скороходов Евгений Владимирович заслуживает присуждения научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики. Диссертационная работа была заслушана и обсуждена на научном семинаре отдела химической физики Казанского физико-технического института им.Е.К.Завойского - обособленного структурного подразделения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), протокол № 5 от 24 августа 2022 г. Отзыв на диссертацию заслушан и одобрен на заседании Ученого совета КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, протокол № 26 от 14 сентября 2022 г.

Текст отзыва составил:

Главный научный сотрудник
КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН,
проф., д.ф.-м.наук



Бухараев Анастас Ахметович

420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт 10/7. тел.: +7 (843) 272 05 03,
e-mail: a_bukharaev@mail.ru
<http://kfti.knc.ru/staff/personal/user/29/>

14. 09. 2022.



Губайдуллина А.З.