

на правах рукописи

Скороходов Евгений Владимирович

**Зондовая магнитно-резонансная силовая
спектроскопия ферромагнитных наноструктур**

Специальность 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород 2022

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН — филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Научный руководитель:

Миронов Виктор Леонидович
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Института физики микроструктур РАН
– филиала ФГБНУ ФИЦ ИПФ РАН

Официальные оппоненты:

Шур Владимир Яковлевич
доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
Института естественных наук и
математики Уральского федерального
университета имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина
(ИЕНиМ УрФУ)

Логунов Михаил Владимирович
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ФГБУН
Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»» (ФИЦ КазНЦ РАН)

Защита состоится 13 октября 2022 г. в 14 - 00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.02 при ФИЦ ИПФ РАН по адресу: 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ РАН и на сайте http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/2022_SkorohodovEV/Diss_SkorohodovEV.pdf

Автореферат разослан сентября 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.238.02

д. ф.-м.н., профессор РАН

_____ Д.Ю. Водолазов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Исследование динамических свойств тонкопленочных ферромагнитных наноструктур является актуальной задачей из-за перспектив их использования в качестве элементной базы спинтроники [1]. Управление спектром спиновых волн в ферромагнитных наноструктурах открывает широкие возможности по разработке новых приборов сверхвысокочастотной (СВЧ)-электроники: СВЧ-ассистированная запись/чтение информации, перестраиваемые СВЧ фильтры, невзаимные элементы. Преимуществами магнитных наносистем являются их радиационная стойкость, высокая стабильность, низкое энергопотребление. Достижения в разработке материалов и устройств для спиновой электроники зависят от инструментов, способных предоставлять подробную микроскопическую информацию об СВЧ-свойствах этих материалов.

Успехи последних десятилетий в изучении динамических свойств магнитных наносистем с неоднородным распределением намагниченности связан с развитием способов создания магнитных наночастиц с требуемой конфигурацией магнитного момента, например, методом электронной нанолитографии [2], а также методов исследования локальных СВЧ-свойств при помощи бриллюэновского рассеяния света [3], магнитно-резонансной силовой микроскопии (МРСМ) [4].

Магнитно-резонансная силовая микроскопия – одно из перспективных направлений диагностики магнитных и СВЧ-свойств материалов и наноустройств, сочетающее в себе преимущества сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) и методов резонансной СВЧ диагностики. В последнее десятилетие в этой области достигнуты значительные успехи, связанные, прежде всего, с детектированием резонансов предельно малых объектов – магнитных моментов единичных электронов и атомных ядер. Метод МРСМ позволяет проводить исследование спектра ферромагнитного резонанса (ФМР) в индивидуальных магнитных наноструктурах, находящихся, в том числе, и в неоднородных магнитных состояниях. Данный метод обладает большой чувствительностью и высоким разрешением, позволяющим детально изучить особенности динамических свойств в магнитных нанобъектах с латеральными размерами менее 100 нм и толщиной до 1 нм, что является востребованным из-за тенденции к миниатюризации элементной базы СВЧ-микроэлектроники.

Степень разработанности темы исследования

В ряде работ уделяется большое внимание проблеме изучения спектров ферромагнитного резонанса в сверхтонких магнитных пленках и в отдельных магнитных наночастицах методом МРСМ [5, 6]. Особый интерес представляют магнитные наноструктуры, находящиеся в неоднородном состоянии (вихревое,

антивихревое, скирмионное) [7, 8]. В работах [9, 10] обсуждается использование гиротропной моды в магнитном вихре для реализации спин-трансферных наноосцилляторов (СТНО). Продемонстрировано, что максимальная мощность СТНО составляет 5 нВатт с шириной линии 5 МГц. Достоинствами СТНО являются малые латеральные размеры (50-200 нм), широкий диапазон перестройки частот, узкая ширина спектральной линии, небольшое рабочее напряжение и радиационная стойкость. Тем не менее, для того, чтобы использовать потенциал данных устройств, необходимо улучшить их спектральную когерентность и мощность излучения. Для этого требуется точное понимание структуры спектров спиновых волн. Теоретическое описание гиротропной моды магнитного вихря представлено в работе [11], экспериментальное исследование гиротропной моды – в работах [12 - 13]. В рамках диссертационной работы исследовалось влияние зонда МРСМ на перестройку гиротропной моды в магнитном вихре.

В последние десятилетия магнитные многослойные структуры привлекают особое внимание из-за их магнитоэлектрических свойств. Эффекты спин-зависимого электронного транспорта, которые особенно заметны для нанометровых размеров, позволяют найти применения данных пленок в современных технологиях. Например, в структурах с чередующимися слоями магнитных и немагнитных металлов наблюдается явление гигантского магнитосопротивления (ГМС), открытого А. Фертом [14] и П. Грюнбергом [15]. Суть явления заключается в изменении сопротивления на десятки процентов в зависимости от взаимной ориентации намагниченности в магнитных слоях. На основе эффекта ГМС разработаны магнитные сенсоры и современные жесткие диски. В структурах, где металлическая немагнитная прослойка заменена на диэлектрик (AlO, MgO) наблюдается эффект туннельного магнитосопротивления (ТМС), составляющий 100-600 % [16, 17]. В многослойных пленках со слоями магнитных и благородных металлов (Au, Pt, Pd) реализуется анизотропия типа легкая ось, направленная перпендикулярно плоскости образца. В диссертационной работе были изучены особенности ФМР в многослойных ферромагнитных пленках с перпендикулярной анизотропией [Co/Pt]₅, которые являются перспективными для использования в устройствах спинтроники. Переключение между однородным и неоднородным состояниями в таких ферромагнитных пленках ведет к сильному изменению их транспортных свойств, перестройке спектров СВЧ поглощения спиновых волн.

Наблюдается повышенный интерес к таким объектам, как доменные стенки [18-21]. Это связано с их возможным применением в устройствах магнитной логики, записи и хранения информации [1, 18-21]. В работе [19] изучалась генерация спиновых волн доменной стенкой, в [20] движение доменных стенок под действием спиновых волн. Однако для детального понимания СВЧ-свойств доменных стенок необходимо экспериментальное исследование резонансных свойств одиночных доменных стенок, которые ранее не проводилось. В

диссертационной работе впервые был исследован резонанс отдельной доменной стенки методом МРСМ в изогнутой микрополоске.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы являлось развитие методов магнитно-резонансной силовой микроскопии для исследований спектров ФМР в ферромагнитных субмикронных частицах и тонких пленках с неоднородным распределением намагниченности.

Основными задачами данной работы являлись:

- Изучение ферромагнитного резонанса в тонких магнитных пленках с перпендикулярной анизотропией, находящихся как в однородном магнитном состоянии, так и в неоднородном магнитном состоянии.
- Изучение ферромагнитного резонанса в отдельных магнитных нанобъектах, находящихся в однородном магнитном состоянии, в вихревом состоянии и в состоянии с доменной стенкой.

Научная новизна

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.

Теоретическая и практическая значимость

Экспериментально реализована методика магнитно-резонансной силовой микроскопии, с помощью которой были исследованы магниторезонансные свойства тонких магнитных пленок Co/Pt с перпендикулярной анизотропией,

V- образных микрополосок с доменной стенкой и дисков с вихревой намагниченностью. Полученные результаты могут представлять практическую ценность для разработки устройств источников СВЧ-излучения на основе спин-трансферных наноосцилляторов.

Методы и методология исследования

Исследуемые ферромагнитные структуры изготавливались методами электронной литографии, что позволяло с высокой степенью точности контролировать их размеры и форму. Спектры ФМР образцов исследовались методом магнитно-резонансной силовой микроскопии и ЭПР-спектроскопии. Доменная структура пленок изучалась методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ). При анализе и интерпретации МРСМ спектров применялся метод микромагнитного моделирования, основанный на численном решении уравнения Ландау-Лифшица.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Магнитно-резонансная силовая спектроскопия в комбинации с магнитооптической магнитометрией и магнитно-силовой микроскопией позволяет проводить количественные исследования резонансных свойств доменной структуры многослойных ферромагнитных пленок с перпендикулярной магнитной анизотропией, в том числе и в нулевом магнитном поле.

2. Анализ изменений формы резонансов в МРСМ спектре при контролируемом перемещении зонда относительно микрополоски позволяет определять области локализации резонансных мод колебаний намагниченности.

3. В спектре ФМР микрополоски V-образной формы имеется интенсивный низкочастотный резонанс, связанный с колебаниями намагниченности в области доменной стенки.

4. Магнитостатическое взаимодействие зонда МРСМ с магнитным вихрем позволяет селективно перестраивать частоту гиротропной моды колебаний намагниченности ферромагнитного диска.

Личный вклад автора

- Основной вклад в исследования резонансных свойств доменной структуры многослойных ферромагнитных пленок с перпендикулярной магнитной анизотропией методом магнитно-резонансной спектроскопии (совместно с Мироновым В.Л. и Сапожниковым М.В.) [A1].

- Основной вклад в исследования резонансных мод колебаний намагниченности в микрополоске пермаллоя методом магнитно-резонансной спектроскопии (совместно с Мироновым В.Л. и Горевым Р.В.) [A2-A7].

- Равнозначный вклад в исследования резонанса в микрополоске V-образной формы, связанного с колебаниями намагниченности в области доменной стенки (совместно с Володиным А.П., Мироновым В.Л. и Горевым Р.В.) [A8, A9].
- Основной вклад в исследования влияния поля зонда магнитно-резонансного силового микроскопа на гиротропную моду резонансных колебаний магнитного вихря в ферромагнитном диске (совместно с Мироновым В.Л. и Татарским Д.А.) [A10, A11].

Степень достоверности и апробация результатов

Экспериментальная часть работы выполнена на современном оборудовании. Научные положения и результаты диссертации обоснованы сопоставлением с имеющимися в литературе данными, использованием дополняющих друг друга подходов, сравнением с результатами теоретических расчетов. Полученные результаты опубликованы в реферируемых журналах. Результаты диссертационной работы докладывались на 17 российских и международных конференциях. В их число входят:

- XXI-XXV Международные симпозиумы "Нанофизика и нанoeлектроника", (Н.Новгород, 2017-2021 гг.).
- International Symposium "Spin Waves 2013", June 9-15, 2013, Saint Petersburg.
- Moscow International Symposium on Magnetism "MISM - 2014", (Moscow, June 29 – July 3, 2014).
- International conference "Modern development of magnetic resonance", Kazan, Russia, (September 22-26, 2015).
- International Symposium "Spin Waves 2015", June 7-13, 2015, Saint Petersburg.
- XXVI Российской конференции по электронной микроскопии" (РЭМ-2016), (г. Зеленоград, 31 мая – 3 июня 2016 г.).
- International conference "Modern development of magnetic resonance", Kazan, Russia, (October 31-November 4, 2016).
- International conference "Modern development of magnetic resonance", Kazan, Russia, (September 25-29, 2017).
- XXIII Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (30 июня-5 июля 2018, Москва).
- International symposium "Spin Waves 2018", (Saint Petersburg, Russia, June 3-8, 2018).
- International conference "Scanning Probe Microscopy 2018" (Ekaterinburg, August 27-30, 2018).
- XXIV Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (1 июля-6 июля 2021, Москва).
- IV International Baltic Conference on Magnetism (August 29-September 2 2021, Kaliningrad, Russia).

Краткое содержание работы

В Главе 1 изложены основные теоретические представления о магнитных свойствах ферромагнитных наночастиц. Рассмотрены особенности создания планарно-упорядоченных ферромагнитных структур для изучения их магнитных состояний и динамических свойств. Приведен обзор работ, в которых отображены особенности экспериментального исследования ферромагнитного резонанса в магнитных структурах микронного и нанометрового масштабов.

Глава 2. В настоящей главе обсуждается отработка методик исследования локального ФМР в тонкопленочных структурах с помощью разработанного в ИФМ РАН магнитно-резонансного силового микроскопа. Приводятся результаты исследований спектров ФМР тонких магнитных пленок с анизотропией типа легкая плоскость и легкая ось.

Раздел 2.1 посвящен описанию магнитно-резонансного силового микроскопа, разработанного в ИФМ РАН на основе вакуумного сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) “Solver HV” (“NT-MDT Spectrum Instruments”, г. Зеленоград) [A1].

Данный МРСМ микроскоп предназначен для регистрации спектров и пространственных распределений амплитуды вынужденных колебаний намагниченности в тонкопленочных ферромагнитных наноструктурах. Детектируемый сигнал, связанный с магнитным резонансом, пропорционален амплитуде колебаний кантилевера. На практике это осуществляется следующим образом. Производится сканирование по частоте, снимается амплитудно-частотная характеристика механических колебаний кантилевера и определяется его резонансная частота. Затем сигнал на резонансной частоте кантилевера подается на модулятор. На другое плечо модулятора подается сигнал с СВЧ генератора и модулированный по амплитуде СВЧ сигнал поступает на микрополосковую линию для накачки образца. При этом пьезовибратор не раскачивает зонд. В эксперименте регистрируются зависимости амплитуды колебаний кантилевера, возникающих при магнитостатическом взаимодействии зонда с образцом, от перестраиваемой частоты СВЧ генератора или от перестраиваемого подмагничивающего поля. Регистрация амплитуды колебаний зонда осуществляется с помощью оптической системы сканирующего зондового микроскопа, состоящей из лазера и четырехсекционного фотодиода. Схема измерительной части МРСМ и ее сопряжение с вакуумной камерой приведены на рис. 1 (а), внешний вид измерительной части показан на рис. 1 (б). Максимальное магнитное поле, создаваемое электромагнитом в плоскости образца составляет 3500 Ое. Конструкция микроскопа допускает также использование магнита, создающего поле 800 Ое перпендикулярно плоскости образца. Для СВЧ - накачки применяется микрополосковая линия, запитываемая широкополосным перестраиваемым синтезатором частот, работающим в диапазоне частот 9 кГц–20 ГГц (выходная мощность от –10 до +20 дБм).

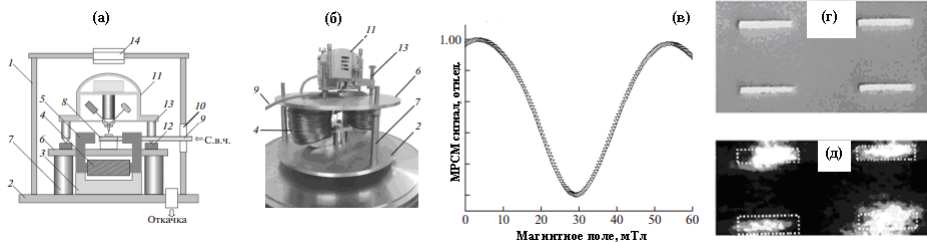


Рис. 1. Схема конструкции (а) и внешний вид измерительной части MPCSM микроскопа (б). 1 – вакуумная камера цилиндрической формы; 2 – фланец вакуумной камеры; 3 – основание микроскопа; 4 – электромагнит; 5 – магнитопровод; 6 – платформа; 7 – опоры; 8 – держатель образца; 9 – коаксиальный кабель; 10 – боковой фланец; 11 – универсальная измерительная головка “Smena”; 12 – шаговые двигатели; 13 – опоры измерительной головки; MPCSM спектр (в), изображение в растровом электронном микроскопе (РЭМ) (г) и MPCSM изображение массива микрополосков пермаллоя (д). Рисунок из [A1].

Разработанное программное обеспечение позволяет регистрировать MPCSM - спектры образцов в виде зависимостей амплитуды и фазы колебаний кантилевера от частоты f СВЧ-накачки и внешнего магнитного поля H , а также MPCSM-изображения в виде пространственных распределений амплитуды и фазы колебаний кантилевера при фиксированных f и H . В качестве примера приведен MPCSM спектр (рис. 1 (в)) и MPCSM изображение (рис. 1 (д)) массива микрополосков пермаллоя.

В разделах 2.2 и 2.3 представлены результаты MPCSM измерений ФМР спектров пленки пермаллоя ($Ni_{80}Fe_{20}$) (анизотропия типа легкая плоскость) и многослойной пленки кобальт-платины (Co/Pt) (анизотропия типа легкая ось), состоящей из чередующихся слоев Co (0.5 нм) и Pt (1 нм) (5 периодов) [A2]. Обе пленки находятся в однородном магнитном состоянии.

Ферромагнитные пленки $Ni_{80}Fe_{20}$ толщиной 40 нм и Co/Pt толщиной 10 нм были изготовлены методом магнетронного напыления. Для MPCSM измерений использовался зондовый датчик в виде стандартного кантилевера для сканирующего зондового микроскопа, на который была приклеена частица из кобальт-самария (CoSm) диаметром 10 мкм. Жесткость кантилевера составляла 0.03 Н/м, резонансная частота 6.5 КГц. MPCSM сигнал регистрировался в виде зависимости амплитуды колебаний зонда от частоты СВЧ накачки в диапазоне 0.1–2 ГГц. Измерения проводились при комнатной температуре в вакуумной камере, где добротность кантилевера составляла 1000.

Если расстояние зонд-образец составлял более 6 мкм, в обеих пленках наблюдался только один резонанс (рис. 2). Данный резонанс связан с однородной прецессией намагниченности пленок. Этот резонанс расщепляется надвое, когда зонд приближается к пленкам. Возникающий дополнительный резонанс связан с прецессией намагниченности в области под зондом [A2]. Для

пленки NiFe поле зонда направлено перпендикулярно намагниченности, что приводит к понижению эффективного поля, действующего на область под зондом. Вследствие этого резонансная частота локализованной моды понижается. Для пленки Co/Pt поле зонда сонаправлено намагниченности, что приводит к повышению эффективного поля, действующего на область под зондом, ведущее к повышению резонансной частоты локализованной моды.

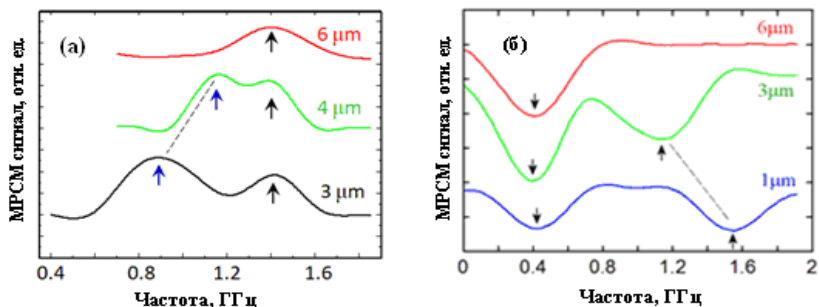


Рис. 2. (а) MPCM спектры пленки пермаллоя для различных расстояний между зондом и образцом. (б) MPCM спектры пленки CoPt для различных расстояний между зондом и образцом. Рисунок из [A2].

В разделе 2.4 представлены MPCM исследования доменной структуры многослойной пленки Co/Pt. Исследуемая пленка Co/Pt может находиться в размагниченных состояниях с различными значениями остаточной намагниченности. Каждое из этих состояний имеет собственную доменную структуру, изучить которую можно с помощью магнитно-силового микроскопа (MCM) (рис. 3).

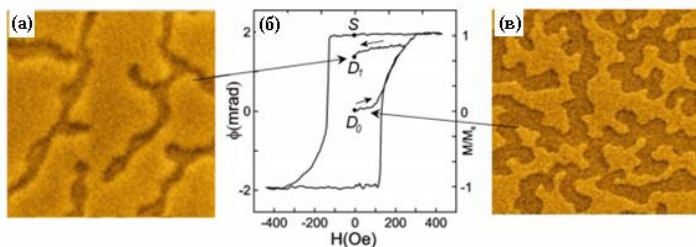


Рис. 3. (а) MCM изображение доменной структуры в частично размагниченном состоянии D_1 . Размер изображения 5×5 мкм. (б) Петля гистерезиса пленки Co/Pt. (в) MCM изображение доменной структуры в размагниченном состоянии D_0 . Размер изображения составляет 5×5 мкм. Рисунок из [A2].

Значение резонансной частоты определяется константой анизотропии пленки, намагниченностью насыщения и размером домена. MPCM спектры для пленки, находящейся в состоянии с нулевым магнитным моментом (состояние

D_0) в нулевом внешнем магнитном поле содержат только один резонанс (рис. 4 (а)). Это связано с тем, что латеральные размеры доменов с разными направлениями намагниченности одинаковые. Приложение внешнего магнитного поля 70 Э ведет к расщеплению исходного резонанса на два резонанса (0.75 ГГц и 1.3 ГГц). Эти резонансы соответствуют прецессии магнитного момента в доменах с различной ориентацией намагниченности.

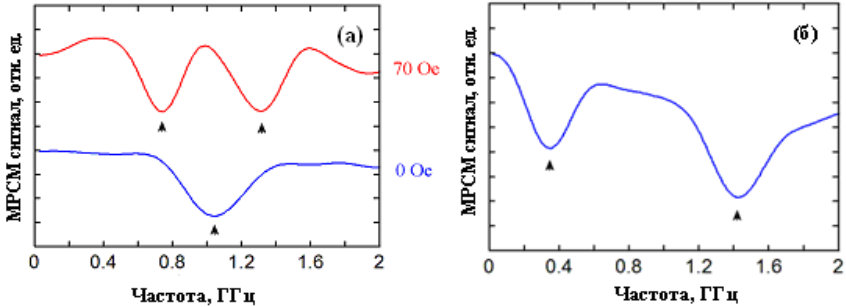


Рис. 4. (а) МРСМ спектры пленки Co/Pt в остаточном состоянии с нулевым магнитным моментом. (б) МРСМ спектр пленки Co/Pt в остаточном состоянии с ненулевым магнитным моментом D_1 в отсутствие внешнего поля. Рисунок из [A2].

В состоянии с ненулевым магнитным моментом D_1 в ФМР спектре присутствуют два резонанса (рис. 4 (б)). Низкочастотный резонанс $f_{res} \approx 0.4$ ГГц соответствует прецессии намагниченности в больших доменах, а высокочастотный резонанс - в маленьких доменах [A2]. Средний размер доменов был оценен из анализа автокорреляционных функций (АКФ) МСМ изображений (рис. 5).

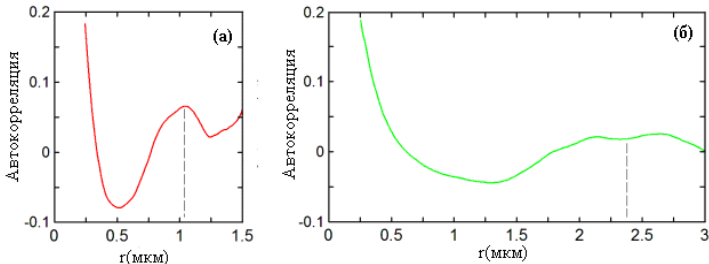


Рис. 5. Автокорреляционные функции МСМ изображений (а) структуры Co/Pt в состоянии D_0 . (б) структуры Co/Pt в состоянии D_1 . Рисунок из [A2].

Согласно рис. 5 корреляционный период для структуры Co/Pt в состоянии D_0 $p_1 = 1$ мкм, для Co/Pt в состоянии D_1 $p_2 = 2.3$ мкм. Средний размер доменов для структуры Co/Pt в состоянии D_0 может быть оценен как $d_I = 0.5p_1 = 500$ нм. В состоянии D_1 домены имеют разные размеры (d_L для больших доменов и d_S для

маленьких доменов). Таким образом $d_L + d_S = p_2$. Из петли гистерезиса (рис. 3 (б)) можно получить $\frac{d_L - d_S}{d_L + d_S} = 0.7$. Это значит, что $d_L = 1955$ нм и $d_S = 345$ нм.

Была исследована структура Co/Pt с дополнительным верхним слоем Co (1.3 нм), который обладает анизотропией типа легкая плоскость. Данный слой существенно меняет спектр ФМР и доменную структуру (рис. 6).

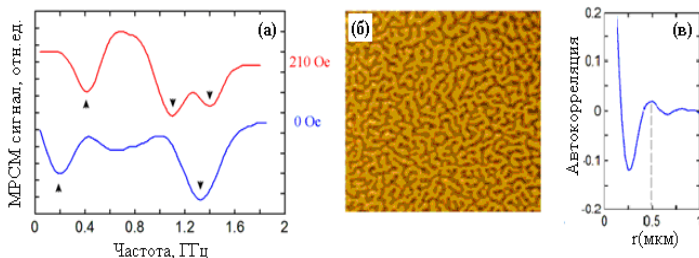


Рис. 6. (а) МРСМ спектр пленки [Co/Pt]/Co для различных значений внешнего магнитного поля. (б) МСМ изображение многослойной структуры [Co/Pt]/Co. (в) Автокорреляционная функция структуры [Co/Pt]/Co. Рисунок из [A2].

В нулевом поле наблюдаются два резонанса. Низкочастотный резонанс соответствует прецессии намагниченности верхнего слоя кобальта. Во внешнем поле $H_{ext} = 210$ Oe данный резонанс смещается в область высоких частот. Это связано с тем, что намагниченность дополнительного слоя кобальта выстраивается по полю и резонансная частота начинает расти. Высокочастотный резонанс на рис. 6 (а) связан с колебаниями намагниченности внутри доменов. Несмотря на то, что размеры доменов в структуре [Co/Pt]/Co меньше, чем размеры доменов в состоянии D_1 структуры Co/Pt, резонансная частота ниже. Это объясняется влиянием дополнительного обменного поля H_{ex} на пленку Co/Pt со стороны дополнительного слоя Co. Для оценки резонансной частоты такой системы можно воспользоваться формулой:

$$2\pi f_r = \gamma(H_{ext} + H_{anis} - H_{exch} + 3NM_s) \quad (1),$$

где N – размагничивающий фактор, который определяется толщиной пленки и латеральными масштабами, H_{exch} – межслоевое обменное поле, M_s – намагниченность насыщения, H_{anis} – поле анизотропии.

Из рис. 6 (в) корреляционный период для структуры [Co/Pt]/Co $p = 0.5$ мкм. Средний размер доменов для структуры [Co/Pt]/Co $d_3 = 0.5p = 250$ нм. Используя полученные экспериментальные данные и формулу (1), было оценено обменное поле межслоевого взаимодействия $H_{exch} = 120$ Oe.

Таким образом, методами МРСМ исследована зависимость резонансных частот от размеров доменов в многослойных пленках Co/Pt. Применение методов МРСМ, МСМ, магнитооптической магнитометрии в сочетании с

простыми аналитическими моделями позволяли количественно изучить латеральные размеры доменов, межслоевое обменное взаимодействие в многослойных магнитных структурах [A2].

Глава 3 посвящена изучению спектров ФМР в микрополосках пермаллоя методами численного моделирования, ЭПР-спектроскопии и МРСМ.

СВЧ свойства ферромагнитных планарных паттернированных структур являются предметом интенсивных исследований, что обусловлено их многочисленными приложениями в устройствах спинтроники и в системах обработки данных. Особое внимание уделяется исследованиям ФМР в прямоугольных микрополосках, которые являются основным структурным элементом планарных СВЧ структур. В частности, планарные элементы прямоугольной формы, упорядоченные в массивы с различной геометрией, рассматриваются как СВЧ фильтры [22]. Из-за сильной анизотропии формы, микрополоски находятся в однородном состоянии, что позволяет использовать их без приложения внешнего магнитного поля.

В **Разделе 3.1** приведены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований спектров ФМР микрополосок пермаллоя. Была изучена пространственная структура резонансных мод при различной ориентации внешнего магнитного поля и микрополоски.

Массив прямоугольных микрополосок с размерами 3000×500 нм был изготовлен методами электронной литографии и ионного травления из пленки пермаллоя толщиной 30 нм. Экспериментальные исследования ФМР проводились на спектрометре Bruker EMX Plus-10/12. В качестве примера на рис. 7 (а) приведен спектр микрополосок при намагничивании в продольном поле.

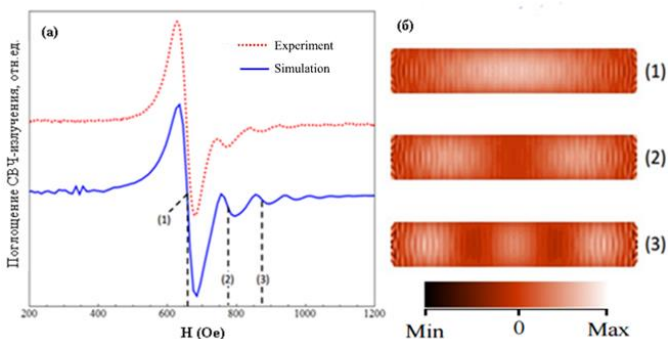


Рис. 7. (а) Экспериментальный (пунктирная красная кривая) и численно рассчитанный (синяя сплошная кривая) спектры ФМР для случая, когда внешнее поле приложено вдоль длинной оси микрополосок. (б) Пространственные распределения амплитуды колебаний намагниченности для разных резонансных полей. (1) $H=660$ Oe; (2) $H=770$ Oe; (3) $H=870$ Oe. Из работы [A3].

Численное моделирование колебаний намагниченности проводилось в пакете OOMMF [19]. Был разработан алгоритм, который позволяет рассчитать ФМР спектр и визуализировать пространственную структуру резонансных мод. Данный алгоритм был протестирован для микрополосок с размерами $3000 \times 500 \times 30$ нм для различных ориентаций образца во внешнем магнитном поле [A3]. Для исследования пространственной структуры резонансных колебаний нами рассчитывались временные зависимости переменных компонент намагниченности для разных точек образца, на основе которых получались распределения амплитуды резонансных колебаний (рис. 7(б)). Хорошее согласие между экспериментальными и модельными спектрами дает основание полагать, что пространственная структура резонансных мод соответствует реальной динамике намагниченности. Продемонстрировано, что резонансные колебания намагниченности представляют суперпозицию длинноволновых магнитостатических и коротковолновых обменных волн [A3, A4].

Раздел 3.2 посвящена исследованию ФМР пермаллоевых микрополосок методом MPCM.

В качестве зондового датчика использовался кантилевер NSG-11, на который приклеивалась частица SmCo. Форма частицы близка к сфере и диаметр составлял около 10 мкм. Жесткость кантилевера составляла 0.01 Н/м, собственная резонансная частота 9.8 КГц. Расстояние от центра магнитной частицы до образца составляло 8 мкм, что позволило минимизировать влияние поля зонда. Внешнее магнитное поле прикладывалось в плоскости образца, переменное поле также было направлено в плоскости образца перпендикулярно постоянному полю. Частота СВЧ накачки составляла 5.8 ГГц. MPCM спектры снимались в виде зависимости амплитуды колебаний зонда от внешнего магнитного поля. Изучалась зависимость спектра MPCM от взаимного расположения зонда и образца для геометрии, когда магнитный момент зонда и намагниченность образца были направлены вдоль длинной оси микрополоски. Рассмотрены три случая, когда зонд располагался над центром микрополоски, над краем микрополоски и на расстоянии три микрона от края микрополоски (рис. 8) [A5, A6].

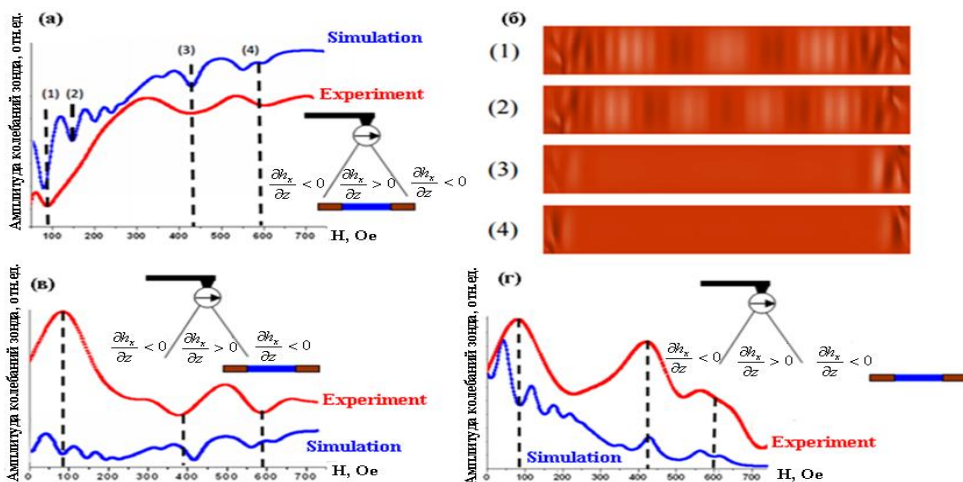


Рис. 8. (а) Экспериментальный и численно рассчитанный MPCM спектры для случая, когда зонд расположен над центром микрополоски. (б) Пространственные распределения амплитуды колебаний в резонансных модах. (в) Экспериментальный и численно рассчитанный MPCM спектры для случая, когда зонд расположен над краем микрополоски. (г) Экспериментальный и численно рассчитанный MPCM спектры для случая, когда зонд расположен на расстоянии три микрометра от края микрополоски.

Из рис. 8 видно, что в системе есть несколько спин-волновых резонансов, локализованных преимущественно в центре микрополоски, и несколько краевых мод, локализованных на конце микрополоски. Когда зонд располагается над центром образца, резонансы проявляют себя только в виде провалов. Это связано с тем, что вся микрополоска находится в области, где градиент поля зонда имеет положительный знак. В случае, когда зонд находится над концом микрополоски, краевые моды расположены в области с положительным градиентом поля зонда и резонансы проявляют себя в виде провалов, в то время как спин-волновые резонансы от области в центре расположены преимущественно в области с отрицательным знаком градиента магнитного поля зонда и проявляют себя в виде пиков. Краевые моды, которые локализованы на дальнем конце микрополоски, дают слабый вклад в MPCM сигнал. Когда зонд расположен на расстоянии трех микрометров от края микрополоски, все резонансы проявляют себя в виде пиков, т.к. вся микрополоска лежит в области с отрицательным знаком градиента поля зонда [A3, A4, A5, A6, A7].

В Разделе 4.1 приводятся результаты магнитно-резонансной силовой микроскопии одиночной доменной стенки в V-образной микрополоске [A8, A9].

Интерес к динамическим свойствам доменных стенок связан с их возможным применением в устройствах магноники и СВЧ – электроники.

Например, колебания доменной стенки можно использовать для генерации и удвоения частоты распространяющихся спиновых волн [19, 20]. Это делает актуальным исследование резонансных свойств отдельной доменной стенки. Характеристики резонанса доменной стенки в микрополоске существенно зависят от способа пиннинга и от геометрических параметров системы. Для стабилизации положения доменной стенки применяются различные варианты ловушек. Нами исследовалась доменная стенка, которая стабилизировалась в изгибе микрополоски V-образной формы (рис. 9 (а)).

Предварительно спектры ФМР и модовый состав колебаний намагниченности V-образной микрополоски с углом 60 градусов исследовались методом микромагнитного моделирования. Моделирование проводилось на основе численного решения уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта для намагниченности образца с использованием стандартного пакета OOMMF. Показано, что при намагничивании образца перпендикулярно оси симметрии нанопроволоки (вдоль оси X) в ней реализуется 60° доменная стенка (рис. 9 (а)). При приложении переменного поля по оси Y в спектре присутствует интенсивный резонанс на частоте 1.3 ГГц (рис. 9 (б)). Визуализация пространственного распределения переменной компоненты намагниченности продемонстрировала, что данный низкочастотный резонанс соответствует моде, связанной с колебаниями доменной стенки (рис. 9 (в)).

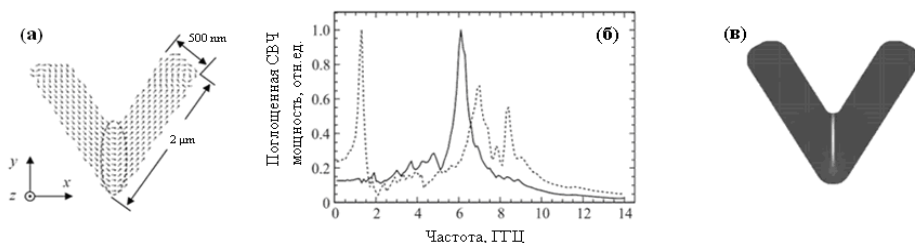


Рис. 9. (а) Распределение намагниченности для конфигурации “голова-хвост” в V-образной микрополоске. (б) Спектры системы для конфигурации “голова-хвост”. Сплошной линией показаны спектры, полученные при приложении переменного поля по оси X, штриховой — при приложении поля по оси Y. (в) Пространственное распределение амплитуды колебаний z-компоненты намагниченности для резонанса на частоте 1.3 ГГц. Из [A8].

Массив микрополосок V-образной формы был изготовлен из пленки пермаллоя толщиной 30 нм методом электронной литографии и ионного травления (рис. 10 (а)). Латеральные размеры микрополосок следующие: ширина 600 нм, длина внешней стороны около 3 мкм. При данных размерах намагниченность в плечах микрополоски находится в квазиоднородном состоянии, в изгибе пиннингуется доменная стенка. Для исключения вклада соседних микрополосок в МРСМ сигнал расстояние в массиве между соседними элементами было 11 мкм. Для МРСМ измерений использовался

зондовый датчик в виде стандартного АСМ кантилевера, на который была приклеена кобальтовая частица диаметром 7 мкм. Жесткость кантилевера составляла 0.1 Н/м, резонансная частота 15.3 КГц. МРСМ сигнал регистрировался в виде зависимости амплитуды колебаний зонда от частоты СВЧ накачки в диапазоне 0.1–3 ГГц. Измерения проводились при комнатной температуре в вакуумной камере, где добротность кантилевера составляла 5000. Результаты МРСМ экспериментов сравнивались с результатами численного моделирования.

Отличие латеральных размеров изготовленной микрополоски (рис. 10 (а)) от микрополоски, представленной на рис. 9 (а), ведет к изменению резонансной частоты доменной стенки. Из рис. 10 (б) видно, что МРСМ спектр в диапазоне до 2.5 ГГц содержит один резонансный пик на частоте 1.6 ГГц, который при уменьшении расстояния между зондом и образцом смещается в область высоких частот. Измерения проводились в условиях, когда магнитное СВЧ поле направлено вдоль оси Y. Когда переменное магнитное поле прикладывается вдоль оси X, резонансный пик пропадает (рис. 10 (б)). Наблюдается хорошее количественное согласие экспериментальных данных с результатами моделирования (рис. 10 (в)).

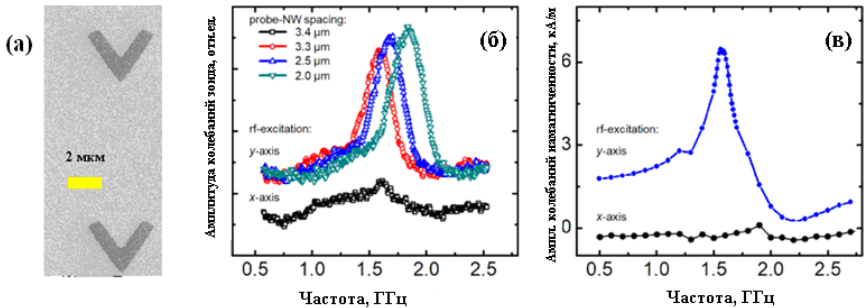


Рис. 10. (а) Изображение микрополосок V-образной формы в сканирующем электронном микроскопе. (б) МРСМ спектры для различных расстояний между зондом и образцом для двух ориентаций переменного магнитного поля: верхние кривые относятся к случаю, когда магнитное СВЧ поле направлено вдоль оси Y, нижняя кривая для случая, когда СВЧ магнитное поле направлено вдоль оси X. (в) Численно рассчитанные спектры ФМР для двух ориентаций магнитного СВЧ поля. Из работы [А9].

На рис. 11 (а) представлено МРСМ изображение микрополоски для случая, когда частота СВЧ накачки равнялась резонансной 1.6 ГГц. При получении МРСМ изображения снималась зависимость амплитуды колебаний зонда от его латерального положения относительно образца. Наиболее интенсивный сигнал наблюдается, когда зонд расположен непосредственно над доменной стенкой. Когда отстройка частоты СВЧ накачки от резонансной составляет 250 МГц, сигнал над центром доменной стенки исчезает (рис. 11 (б)).

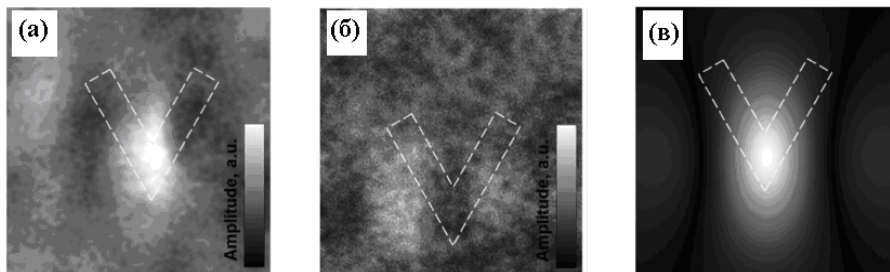


Рис. 11. (а) MPCM изображение микрополоски на резонансной частоте 1.6 ГГц; (б) MPCM изображение при отстройке от резонансной частоты на 250 МГц. Расстояние между зондом и образцом составляло 3.3 мкм. (в) Численно рассчитанное пространственное распределение MPCM сигнала. Расстояние между зондом и образцом составляло 3.3 мкм. Размер изображений 6×6 мкм². Из работы [A9].

Численно рассчитанное MPCM изображение представлено на рис. 11 (в). Можно видеть хорошее совпадение с экспериментальным MPCM изображением (рис. 11 (а)). Таким образом, методом MPCM были изучены резонансные свойства микрополоски V-образной формы, содержащей доменную стенку. Показано, что низкочастотный резонанс на частоте 1.6 ГГц соответствует колебаниям намагниченности в области доменной стенки.

В Разделе 4.2 приведены результаты исследования влияния поля зонда магнитно-резонансного силового микроскопа на гиротропную моду резонансных колебаний магнитного вихря в ферромагнитном диске [A10, A11]. Данные колебания представляют собой периодическое движение кора вихря вокруг состояния равновесия. В последнее время интерес к данной моде существенно возрос в связи с перспективами ее использования в вихревых спин-трансферных наноосцилляторах [9, 10]. Актуальной исследовательской задачей в этой области является реализация возможности управления резонансной частотой гирации отдельного магнитного вихря в массиве взаимодействующих наноосцилляторов и одним из возможных путей ее решения является использование для перестройки частоты локализованного поля магнитного зонда.

Для MPCM исследований методами электронной литографии и ионного травления были изготовлены диски диаметром 900 нм из пленки пермаллоя толщиной 40 нм. В качестве зондового датчика использовался стандартный кантилевер, к которому прикреплялась частица CoSm диаметром 10 мкм. Типичный MPCM спектр низкочастотных колебаний вихря в диске, представлен на рис. 12 (а). Резонанс на частоте 450 МГц обусловлен гиротропным движением кора вихря.

Нами исследовались MPCM спектры при различных расстояниях между зондом и диском. Результаты экспериментов сравнивались с результатами

моделирования и аналитическими расчетами. В расчетах использовалась простая модель зонда в виде однородно намагниченного шара. Численное микромагнитное моделирование проводилось с использованием симулятора MuMax3.

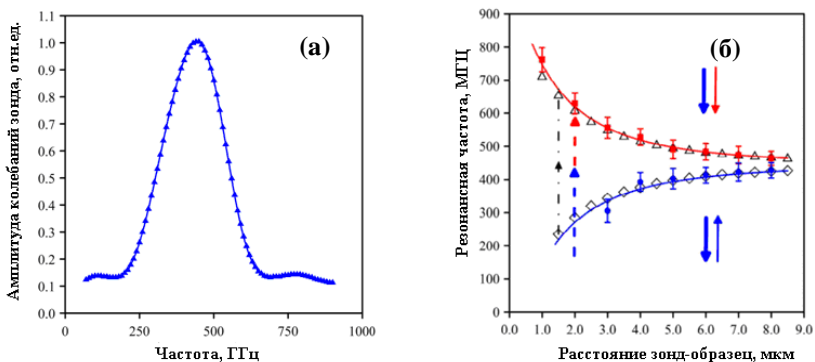


Рис. 12. (а) МРСМ спектр низкочастотных колебаний магнитного вихря. (б) Зависимости резонансной частоты гиротропной моды от расстояния между зондом и образцом при различных ориентациях кора вихря. Из работы [A11].

На рис. 12 (б) показаны зависимости резонансной частоты гиротропной моды от расстояния между зондом и образцом при различных взаимных ориентациях магнитного момента зонда и намагниченности кора магнитного вихря. На рисунке квадраты соответствуют экспериментальным данным для случая, когда магнитный момент зонда и намагниченность кора вихря сонаправлены; кружки - магнитный момент зонда и намагниченность кора вихря направлены в противоположные стороны. Результаты численного моделирования показаны треугольниками и ромбами. Сплошными линиями отмечены аналитически рассчитанные кривые. Наблюдается увеличение частоты гиротропной моды в случае, когда магнитный момент зонда сонаправлен кору вихря, и уменьшение в противоположном случае. В случае, когда магнитный момент зонда был противоположно направлен кору при расстоянии между зондом и образцом менее 2.5 мкм наблюдалось резкое возрастание резонансной частоты (на рис. 12 (б) отмечено прерывистой линией со стрелкой), связанное с изменением направления кора вихря. Численное моделирование также подтвердило перемагничивание кора вихря в этой области параметров (на рис. 12 (б) отмечено штрихпунктирной линией со стрелкой). Таким образом, хорошее количественное согласие экспериментальных данных с аналитическими и численными расчетами демонстрирует адекватность модели зонда в виде однородно намагниченного шара, что может быть использовано для прогнозирования перестройки резонансной частоты гиротропной моды, а также для определения расстояния между зондом и образцом, при котором кор вихря перемагничивается.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты

1. Разработан и изготовлен магнитно-резонансный силовой микроскоп оригинальной конструкции, предназначенный для исследования ферромагнитного резонанса магнитных наноструктур в диапазоне частот 0.1 – 20 ГГц во внешнем магнитном поле до 3500 Э. Развита комбинированная методика, включающая оптическую магнитометрию, магнитно-силовую микроскопию и магнитно-резонансную силовую спектроскопию, позволяющая определять параметр магнитной анизотропии, размеры магнитных доменов, величину обменного межслоевого взаимодействия и частоты ферромагнитного резонанса магнитных пленок. Эффективность данной методики апробирована при изучении доменной структуры и обменного взаимодействия в многослойных пленках Co/Pt с перпендикулярной магнитной анизотропией [A1, A2].

2. Впервые проведены экспериментальные и теоретические исследования МРСМ спектров микрополосок в зависимости от положения зонда над образцом. В случае, когда зонд расположен над центром микрополоски все резонансы проявляются в виде провалов. Когда зонд располагается над краем микрополоски, то часть резонансов проявляется в виде пиков, а часть в виде провалов. При расположении зонда на расстоянии трех микрон от края микрополоски все резонансы проявляются в виде пиков. Анализируя форму резонансов в МРСМ спектре для различных положений зонда, установлено, что высокополевые резонансы соответствуют краевым модам, а низкополевые — спин-волновым резонансам [A3, A4, A5, A6, A7].

3. Теоретически и экспериментально 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. Экспериментально для микрополоски из пермаллоя методами магнитно-резонансной силовой микроскопии зарегистрирован ферромагнитный резонанс на частоте 1.6 ГГц и получено магнитно-резонансное изображение образца, подтверждающее локализацию данного резонанса в области изгиба микрополоски. [A8, A9].

4. Исследовано влияние поля зонда магнитно-резонансного силового микроскопа на гиротропную моду резонансных колебаний магнитного вихря в ферромагнитном диске. Показано, что магнитное поле зонда приводит к смещению резонансной частоты гиротропной моды. Если магнитный момент зонда и намагниченность кора вихря сонаправлены, то резонансная частота

растет при уменьшении расстояния между зондом и образцом. Если магнитный момент зонда и намагниченность кора вихря имеют противоположные направления, то резонансная частота уменьшается при уменьшении расстояния между зондом и образцом. Экспериментально зарегистрировано переключение полярности кора вихря полем зонда. Аналитические расчеты и численное моделирование показали, что модель зонда в виде однородно намагниченного шара находится в хорошем согласии с экспериментальными данными и может быть использована для прогноза величины смещения резонансной частоты гиротропной моды и высот, на которых происходит переключение кора вихря, для зондов с разными магнитными моментами [A10, A11].

Цитированная литература

1. Das Sarma, S. Spintronics / S. Das Sarma. // Am. Sci. — 2001.
2. “Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication” // edited by P.Rai-Choudhury, SPIE, Chapter 2, 1997.
3. Jersch, J. Mapping of localized spin-wave excitations by near-field Brillouin light scattering // J. Jersch, V. E. Demidov, H. Fuchs, K. Rott, P. Krzysteczko, J. Munchenberger, G. Reiss, and S. O. Demokritov // Appl. Phys. Lett. – 2010. – V. 97 – P. 152502.
4. J. A. Sidles Noninductive detection of single-proton magnetic resonance / J. A. Sidles // Appl. Phys. Lett. -1991. – V. 58. - P. 2854.
5. Pigeau, B. Optimal control of vortex-core polarity by resonant microwave pulses/ B. Pigeau, G. de Loubens, O. Klein, A. Riegler, F. Lochner, G. Schmidt, and L. W. Molenkamp // Nature Physics. - 2011. – V.7. - P. 26–31.
6. Pigeau, B. A frequency-controlled magnetic vortex memory / B. Pigeau, G. de Loubens, O. Klein, A. Riegler, F. Lochner, G. Schmidt, L. W. Molenkamp, V. S. Tiberkevich, and A. N. Slavin // Appl. Phys. Lett. - 2010. – V.96 - P. 132506.
7. Klein, O. Ferromagnetic resonance force spectroscopy of individual submicron-size samples / O. Klein, G. de Loubens, V.V. Naletov, F. Boust, T. Guillet, H. Hurdequint, A. Leksikov, A.N. Slavin, V.S. Tiberkevich, N. Vukadinovic // Physical Review B. – 2008. – V. 78. – P. 144410.
8. Sugimoto, S. Dynamics of coupled vortices in a pair of ferromagnetic disks / S. Sugimoto, Y. Fukuma, S. Kasai, T. Kimura, A. Barman, and Y. C. Otani// Phys. Rev. Lett. — 2011. — V. 106. — P. 197203.
9. Dussaux, A. Field dependence of spin-transfer-induced vortex dynamics in the nonlinear regime / A. Dussaux, A. V. Khvalkovskiy, P. Bortolotti, J. Grollier, V. Cros, and A. Fert // Phys. Rev. B. – 2012. – V. 86. - P. 014402.
10. Ivanov, B. A. Excitation of Spin Dynamics by Spin-Polarized Current in Vortex State Magnetic Disks / B. A. Ivanov and C. E. Zaspel // Phys. Rev. Lett. — 2007. — V. 99. — P. 247208.
11. Guslienko, K. Y. Magnetic Vortex Core Dynamics in Cylindrical Ferromagnetic Dots / K. Y. Guslienko, X. F. Han, D. J. Keavney, R. Divan, and S. D. Bader // Phys.

Rev. Lett. — 2006. — V.96. — P. 067205.

12. Novosad, V. Magnetic vortex resonance in patterned ferromagnetic dots / V. Novosad, F. Y. Fradin, P. E. Roy, K. S. Buchanan, K. Yu. Guslienko, and S. D. Bader // Phys. Rev. B. - 2005. - V.72. - P. 024455.

13. Yamada, K. Electrical switching of the vortex core in a magnetic disk / K. Yamada, S. Kasai, Y. Nakatani, K. Kobayashi, H. Kohno, A. Thiaville, and T. Ono // Nature Materials. - 2007. - V. 6. - P. 269–273.

14. Baibich, M. N. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices / M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, and F. Petroff // Phys.Rev. Lett. — 1988. — V.61. — P. 2472.

15. Binasch, G. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn // Phys. Rev. B. — 1989. — V.39. — P. 4828.

16. Miyazaki, T. Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction / T. Miyazaki and N. Tezuka // J. Magn. Magn. Mater. — 1995. — V.139. — P. L231.

17. Butler, W. H. Spin-dependent tunneling conductance of Fe/MgO/Fe sandwiches / W. H. Butler, X.-G. Zhang, T. C. Schulthess, and J. M. MacLaren. // Phys. Rev.B. — 2001. — V.63. — P. 054416.

18. Allwood, D. A. Magnetic Domain-Wall Logic / D. A. Allwood, G. Xiong, C. C. Faulkner, D. Atkinson, D. Petit, and R. P. Cowburn // Science. - 2005. - V. 309. - P.1688.

19. Hermsdoerfer, S. J. A spin-wave frequency doubler by domain wall oscillation / S. J. Kim, and B. Hillebrands // Appl. Phys. Lett. - 2009. -V. 94. -P. 223510.

20. Han, D.-S. Magnetic domain-wall motion by propagating spin waves / D.-S. Han, S.-K. Kim, J.-Y. Lee, S. J. Hermsdoerfer, H. Schultheiss, B. Leven, and B. Hillebrands // Appl. Phys. Lett. - 2009. -V. 94. -P. 112502.

21. Кринчик, Г.С. Физика магнитных явлений / Г.С. Кринчик – Изд-во МГУ, Москва – 1985.

22. Gregg, J.F. Spin-electronic – a review / J.F. Gregg, I. Petej, E. Jouguelet, C. Dennis // J.Phys.D: Appl. Phys. – 2002. – V. 35. – P. R121.

Список публикаций по теме диссертационной работы

A1. Скороходов, Е. В. Магнитно-резонансный силовой микроскоп на базе зондового комплекса «Solver-HV»/ Е. В. Скороходов, М. В. Сапожников, А. Н. Резник, В. В. Поляков, В. А. Быков, А. П. Володин, В. Л. Миронов // Приборы и техника эксперимента - 2018. – т.5. – С.140-145.

A2. Skorokhodov, E.V. Magnetic resonance force spectroscopy of multilayer films Co/Pt with perpendicular magnetic anisotropy / Skorokhodov E.V., Sapozhnikov M.V., Ermolaeva O.L., Gusev N.S., Fraerman A.A., Mironov V.L.// Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2021. - V. 518. – P. 167396.

A3. Skorokhodov, E.V. Ferromagnetic resonance in submicron permalloy stripes / Skorokhodov E.V., Gorev R.V., Yakubov R.R., Demidov E.S, Khivintsev Yu.V.,

Filimonov Yu.A., Mironov V.L. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* - 2017. – P.118.

A4. Горев, Р.В. Моделирование ферромагнитного резонанса в микрополоске прямоугольной формы / Горев Р.В., Скороходов Е.В., Миронов В.Л. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* – 2016. -номер 3. - С.37.

A5. Скороходов, Е.В. Магнитно-резонансная силовая спектроскопия массива микрополосок пермаллоя / Скороходов Е.В., Сапожников М.В., Миронов В.Л. // *Письма в Журнал технической физики.* - 2018. - Т. 44. № 5 (53). - С. 49.

A6. Skorokhodov, E.V. Manifestation of ferromagnetic resonance of permalloy microstripes in magnetic force spectroscopy measurements / Skorokhodov E.V., Gorev R.V., Sapozhnikov M.V., Mironov V.L.// *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2019. - V. 491. – P. 165538.

A7. Горев, Р.В. Моделирование взаимодействия зонда магнитно-резонансного силового микроскопа с ферромагнитным образцом / Горев Р.В., Скороходов Е.В., Миронов В.Л. // *Журнал технической физики.* – 2019. – Т.89. – С.1646.

A8. Горев, Р.В. Ферромагнитный резонанс во взаимодействующих магнитных микрополосках / Горев Р.В., Скороходов Е.В., Миронов В.Л. // *Физика твердого тела.* – 2016. – Т.58. – С. 2135.

A9. Volodin, A. Ferromagnetic resonance force microscopy of individual domain wall / Volodin A., Van Haesendonck C., Skorokhodov E. V., Gorev R. V., and Mironov V. L.// *Applied Physics Letters.* -2018. –V.113. - P. 122407.

A10. Миронов, В.Л. Магнитно-резонансная силовая спектроскопия колебаний магнитного вихря/ В.Л. Миронов, Е.В. Скороходов, Д.А. Татарский, И.Ю. Пашенькин// *Журнал технической физики.* – 2020. - **90**(11). - С. 1821 – 1824.

A11. Tatarskiy, D.A. Impact of magnetic resonance force microscope probe on gyrotropic mode of magnetic vortex oscillations / Tatarskiy D.A., Mironov V.L., Skorokhodov E.V., Fraerman A.A. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2022. – V.522. – P. 169152.

Скороходов Евгений Владимирович

Зондовая магнитно-резонансная силовая спектроскопия ферромагнитных наноструктур

Автореферат

Подписано к печати 01.07.2022 г. Тираж 100 экз. Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» 603950, Нижний Новгород, ГСП-105