

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе

Скороходова Евгения Владимировича «Зондовая магнитно-резонансная силовая спектроскопия ферромагнитных наноструктур», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики

Разработка магнитных материалов для элементной базы спинтроники предполагает развитие методов создания магнитных наноструктур и детальное исследование их свойств. В настоящее время приборная база и методы исследования динамических свойств отдельных магнитных наноструктур значительно уступают возможностям методик исследования их статических параметров. Актуальность темы диссертационной работы Е. В. Скороходова, посвященной именно разработке приборов для исследования динамических свойств ферромагнитных наноструктур, в том числе и отдельно взятых нанообъектов, не вызывает сомнения.

В работе развиты методы магнитно-резонансной силовой микроскопии для исследований спектров ферромагнитного резонанса в субмикронных частицах и тонких пленках с неоднородным распределением намагниченности. Методика доведена до уровня разработки и изготовления магнитно-резонансного силового микроскопа оригинальной конструкции. С его помощью получены интересные результаты по исследованию магнитных нанообъектов, находящихся в однородном магнитном состоянии, в вихревом состоянии и в состоянии с доменной стенкой.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списков цитируемой литературы и публикаций автора по теме работы. Диссертация изложена на 118 страницах, включает 75 рисунков и 112 ссылок на литературные источники.

Во введении обосновывается степень разработанности темы исследования, цели и задачи диссертационной работы, практическая значимость, методы и методология исследования, основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о личном вкладе автора, степени

достоверности, апробации и публикации результатов, о структуре и объеме диссертации.

Первая глава представляет собой обзор литературы по теме диссертации, включая обзор работ, в которых отражены особенности экспериментального исследования ферромагнитного резонанса (ФМР) в магнитных структурах микронного и нанометрового масштабов.

Во второй главе обсуждается отработка методик исследования локального ФМР в тонкопленочных структурах с помощью разработанного в ИФМ РАН магнитно-резонансного силового микроскопа (МРСМ). Представлены результаты измерений ФМР спектров пленок пермаллоя и кобальт-платины в однородном магнитном состоянии. Для многослойной пленки кобальт-платины с доменной структурой продемонстрировано, что значение резонансной частоты определяется константой анизотропии пленки, намагниченностью насыщения и размерами доменов. В состоянии с ненулевым магнитным моментом, когда домены с противоположным направлением намагниченности имеют разные латеральные размеры, в спектре ФМР присутствуют два резонанса.

В третьей главе приведены результаты изучения спектров ФМР в микрополосках пермаллоя несколькими методами: численного моделирования, ЭПР спектроскопии и магнитно-резонансной силовой микроскопии. Микрополоски изготовлены методом электронной литографии и ионного травления. Продemonстрировано, что резонансные колебания намагниченности микрополосок представляют собой суперпозицию длинноволновых магнитостатических и коротковолновых обменных волн. В качестве зондового датчика использовался кантилевер с приклеенной сферической частицей SmCo диаметром около 10 мкм. Изучена зависимость спектра МРСМ от взаимного расположения зонда и образца для различных случаев направления магнитного момента зонда и намагниченности образца относительно длинной оси микрополоски. В случае, когда зонд находился над концом микрополоски, краевые моды располагались в области с положительным градиентом поля зонда и резонансы проявляли себя в виде провалов, в то время как спин-волновые резонансы от области в центре располагались преимущественно в области с отрицательным знаком градиента магнитного поля зонда и проявляли себя в виде пиков.

В четвертой главе представлены результаты магнитно-резонансной силовой микроскопии одиночной 60° доменной стенки в V-образной микрополоске и колебаний магнитного вихря в субмикронном пермалловом диске. Результаты экспериментов сравнивались с результатами моделирования и аналитическими расчетами. Экспериментально для микрополоски из пермаллоя зарегистрирован ФМР на частоте 1,6 ГГц и получено магнитно-резонансное изображение образца, подтверждающее локализацию данного резонанса в области изгиба микрополоски. Для магнитного вихря показано, что магнитное поле зонда приводит к смещению резонансной частоты гиротропной моды вихря. Экспериментально зарегистрировано переключение полярности кора вихря полем зонда.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В целом диссертационная работа Е. В. Скороходова выполнена на высоком методическом и научном уровне. Результаты диссертационной работы подробно изложены в 11 статьях в ведущих научных журналах и прошли апробацию на многих российских и международных конференциях.

Диссертационная работа не лишена некоторых недостатков:

1. В работе представлен магнитно-резонансный силовой микроскоп, предназначенный для исследования ФМР магнитных наноструктур во внешнем магнитном поле до 3500 Э, а реальная работа микроскопа продемонстрирована для более узкого диапазона полей – до 1300 Э. Вопрос о максимальной напряженности магнитного поля важен, поскольку в магнитном поле находятся и исследуемый образец, и магнитный зондовый датчик.

2. Данные магнитно-резонансной силовой микроскопии для пленок с размерами доменов 0,5-0,25 мкм получены автором при расстоянии от кантилевера до пленки 6-8 мкм, т.е. являются усредненными по площади пленки. Их следовало бы сравнить с данными ФМР, полученными методом ЭПР спектроскопии.

3. Исследование резонансных свойств доменной стенки проведено для случая V-образной микрополоски шириной 0,5 мкм при расстоянии между зондом и образцом 3,3 мкм. В таких условиях сложно выделить вклад доменной стенки в резонансные явления.

4. В работе попеременно используются русские и английские обозначения физических величин, системы СИ и СГС, имеются опечатки и неточности. Например, подпись к рис. 2.4 дублирует подпись к рис. 2.3.

Указанные замечания не отражаются на общем положительном впечатлении о диссертации и не снижают заслуг соискателя в разработке магнитно-резонансного силового микроскопа оригинальной конструкции, в получении новых интересных научных результатов в резонансной спектроскопии ферромагнитных наноструктур.

Содержание автореферата отражает содержание диссертационной работы.

Диссертация «Зондовая магнитно-резонансная силовая спектроскопия ферромагнитных наноструктур» соответствует паспорту специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики и требованиям к кандидатским диссертациям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., редакция от 29.05.2017 № 650, а ее автор, Скороходов Евгений Владимирович, несомненно, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник Института радиотехники и электроники имени
В. А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ РАН)

Логунов Михаил Владимирович

27.09.2022 г.

Адрес места работы:

125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп. 7.

Телефон: +7 (495) 629 3574

e-mail: ire@cplire.ru

Подпись Логунова М.В. заверяю.

Учёный секретарь ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

И. И. Чусов

