

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента

на диссертационную работу **СКОРОХОДОВА** 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 исследования**

Изучение локальных динамических свойств тонкопленочных ферромагнитных наноструктур является одним из наиболее актуальных и быстро развивающихся направлений современной физики. Магнитные наноструктуры обладают огромным потенциалом для их использования в качестве элементной базы СВЧ-спинтроники: генераторов СВЧ-поля, элементов магнитной логики, СВЧ-ассистированной записи/чтения информации, перестраиваемых СВЧ фильтров и невзаимных элементов. Достоинствами ферромагнитных наноструктур являются их радиационная стойкость, высокая стабильность и низкое энергопотребление. Однако для полного понимания характеристик и возможностей данных систем необходимо изучать их локальные СВЧ свойства в микронном и субмикронном масштабах, в частности, с использованием методов магнитно-резонансной силовой микроскопии, которые сочетают в себе преимущества сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) и методов резонансной СВЧ диагностики. Исследования, представленные в диссертационной работе Скороходова Е.В., безусловно являются важными и актуальными.

### **Содержание работы**

В рамках своей диссертационной работы Скороходов Е.В. отработал методики изучения локальных динамических свойств магнитных наноструктур на созданном в ИФМ РАН магнитно-резонансном силовом микроскопе (МРСМ), и провел исследования резонансных свойств тонких ферромагнитных пленок и частиц.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

**Во введении** автором раскрыты актуальность, цели и задачи работы, сформулированы основные результаты работы и положения, выносимые на защиту, объяснены их новизна, научная и практическая значимость, отмечен личный вклад автора в получение результатов работы.

**В первой главе** автором рассмотрены особенности создания планарно-упорядоченных ферромагнитных структур и представлен подробный литературный обзор экспериментальных методов исследования ферромагнитного резонанса (ФМР) в тонкопленочных магнитных наноструктурах 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. Представлены результаты МРСМ измерений ФМР спектров пленки пермаллоя ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) и многослойной пленки  $\text{Co/Pt}$  с перпендикулярной магнитной анизотропией. Показано, что в пленках  $\text{Co/Pt}$  может быть реализовано несколько устойчивых магнитных состояний с различной доменной структурой. Переход от одного состояния к другому ведет к существенной перестройке спектров ФМР. Установлена связь между размерами доменов и соответствующими резонансными частотами. Полученные результаты хорошо согласуются с данными оптической магнитометрии, магнитно-силовой микроскопии и простейшими аналитическими моделями.

**В третьей главе** предложен способ определения области локализации резонансной моды по форме резонансной кривой. В качестве тестовых образцов были использованы микрополоски пермаллоя. Изучалась зависимость спектра МРСМ от взаимного расположения зонда и образца для геометрии, когда магнитный момент зонда и намагниченность образца были направлены вдоль длинной оси микрополоски. Продемонстрировано, что изменение положения МРСМ зонда относительно образца и анализ формы резонансной кривой (пик или провал) позволяет указать область локализации той или иной резонансной моды.

**В четвертой главе** изучались низкочастотные резонансы в ферромагнитных частицах, находящихся в неоднородном состоянии. Впервые методами магнитно-

резонансной силовой микроскопии экспериментально обнаружен ферромагнитный резонанс одиночной доменной стенки в ферромагнитной нанопроволоке V-образной формы. Кроме того, изучено влияние поля МРСМ зонда на гиротропную моду резонансных колебаний магнитного вихря в ферромагнитном диске. Показано, что в зависимости от взаимной ориентации намагниченности зонда и кора вихря поле МРСМ зонда может увеличивать или уменьшать резонансную частоту гиротропной моды.

Наиболее важными результатами диссертации Скороходова Е.В. являются следующие:

1. Разработан и изготовлен магнитно-резонансный силовой микроскоп оригинальной конструкции, предназначенный для исследования ферромагнитного резонанса магнитных наноструктур. 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.

2. Впервые проведены экспериментальные и теоретические исследования МРСМ спектров микрополосок в зависимости от положения зонда над образцом. установлено, что высокополевые резонансы соответствуют краевым модам, а низкополевые - спин-волновым резонансам.

3. Теоретически и экспериментально исследованы колебания намагниченности в планарной ферромагнитной микрополоске V-образной формы. Экспериментально для микрополоски из пермаллоя методами магнитно-резонансной силовой микроскопии зарегистрирован ферромагнитный резонанс и получено магнитно-резонансное изображение образца, подтверждающее локализацию резонанса в области изгиба микрополоски.

### **Практическая значимость**

Результаты исследования магниторезонансных свойств тонких магнитных пленок Co/Pt с перпендикулярной анизотропией, V-образных микрополосок с доменной стенкой и дисков с вихревой намагниченностью с помощью

экспериментально реализованной методики магнитно-резонансной силовой микроскопии представляют несомненный практический интерес и могут быть использованы для разработки источников СВЧ-излучения на основе спин-трансферных наноосцилляторов.

**Обоснованность** научных положений и **достоверность** результатов подтверждаются анализом литературных источников, корректностью поставленных задач, применением современных методов исследования, а также сравнением с результатов теоретических расчетов. Результаты, полученные Е.В. Скороходовым согласуются с известными экспериментальными данными других авторов и не противоречат современным представлениям. Положения диссертации вполне обоснованы полученными экспериментальными и расчетными результатами.

Научные результаты, составляющие основу диссертации, были доложены на 17 международных и российских конференциях самого высокого уровня и опубликованы в наиболее авторитетных отечественных и зарубежных журналах, сборниках трудов и тезисов докладов. Всего по материалам диссертации опубликовано 28 работ, из них 11 журнальных статей.

Автореферат работы соответствует содержанию и структуре диссертации и адекватно отражает полученные в работе результаты.

Вместе с тем, по диссертации можно высказать некоторые критические замечания.

1. В тексте диссертации отсутствуют или чрезмерно лаконичны краткие выводы к отдельным разделам.

2. Сравнение резонансной частоты пленки пермаллоя для трех значений внешнего магнитного поля, полученные методом МРСМ и с помощью векторного анализатора цепей целесообразно было привести в виде таблицы, а не Рис. 2.8.

3. В качестве подписи к Рис. 2.4 на стр. 53 ошибочно представлена подпись к Рис. 2.3.

Указанные замечания не снижают высокой оценки диссертационной работы и не влияют на основные выводы и защищаемые положения.

## Заключение

Диссертация Скороходова Е.В. является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. По совокупности проведённых исследований, полученных результатов, их актуальности, достоверности, научной новизне и практической значимости, а также количеству публикаций диссертационная работа Скороходова Евгения Владимировича отвечает критериям пункта 9, а также другим требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Скороходов Евгений Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент:

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)

Шур Владимир Яковлевич

26 сентября 2022 г.

Даю согласие на обработку персональных данных

Шур Владимир Яковлевич

26 сентября 2022 г.

Контактные данные:

Уральский федеральный университет  
Адрес: 620002, Российская Федерация, г.  
Екатеринбург, ул. Мира, 19  
e-mail: vladimir.shur@urfu.ru  
тел.: +7 (912) 6134834



Подпись В.Я. Шура заверяю.

Ученый секретарь Института естественных наук и математики Уральского федерального университета

Л.А. Памятных