

ОТЗЫВ

официального оппонента Гареевой Зухры Владимировны на диссертационную работу **Мельникова Григория Юрьевича** «Магнитодинамические свойства наноструктурированных пленочных элементов на основе пермаллоя с высокой магнитной проницаемостью», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12. (Физика магнитных явлений)

Диссертационная работа Г.Ю. Мельникова посвящена изучению статических и динамических свойств наноструктурированных магнитных пленок на основе пермаллоя с учетом различных вкладов магнитной анизотропии. Цель исследования состояла в определении влияния эффектов наноструктурирования на свойства пленочных структур. Для ее реализации были изготовлены образцы - наноструктурированные пленочные элементы с низкой дисперсией осей легкого намагничивания и высокой динамической магнитной проницаемостью и проведены экспериментальные исследования процессов динамического перемагничивания и магнитоимпедансных эффектов.

Актуальность поставленных в диссертации задач связана с развитием современных технологий, основанных на использовании многослойных тонкопленочных структур. Изучение особенностей физических свойств наноструктурированных магнитных пленок представляет практический интерес с точки зрения их применения в микроволновых устройствах и системах связи; в качестве детекторов слабых магнитных полей, магнитных датчиков и сенсоров с высокой чувствительностью к магнитному полю и функциональных элементов спинтроники, что связано с возможностью подбора необходимых функциональных параметров за счет наноструктурирования многослойных тонкопленочных структур. Новые физические эффекты, которые проявляются при наноструктурировании представляют несомненный интерес для фундаментальных исследований.

В работе проведены исследования магнитодинамических свойств наноструктурированных пленочных элементов на основе пермаллоя с конкурентными вкладами магнитной анизотропии, изучен магнитоимпедансный эффект, исследованы особенности ферромагнитного и

спин – волновых резонансов. Необходимые для исследований наноструктурированные пленочные элементы различных видов были получены Мельниковым Г.Ю с использованием методов ионно-плазменного магнетронного распыления и оптической литографии. Магнитные частицы оксида железа с разными параметрами дисперсности для синтеза эпоксидных магнитных композитов были получены методом электрического взрыва проволоки. Исследование структуры и магнитных свойств данных систем проводилось на основе использования комплекса апробированных экспериментальных методик. Были последовательно изучены статические и магнитодинамические свойства однослойных и многослойных ансамблей FeNi микроэлементов с различными геометрическими параметрами, магнитные частицы оксида железа с разными параметрами дисперсности и композиты на их основе.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем:

1. Впервые показано, что наноструктурирование магнитного слоя в прямоугольных литографических магнитоимпедансных элементах приводит к разбиению пленки FeNi/Cu на эффективные области с различной величиной перпендикулярной магнитной анизотропии.
2. Определены условия, при которых динамические характеристики экспериментально полученных магнитоимпедансных элементов с профилированным свободным слоем на основе структур FeNi/Cu превосходят аналогичные характеристики непрофилированных элементов.
3. Продемонстрировано, что наноструктурированные пленочные элементы на основе пермаллоя обеспечивают высокую чувствительность магнитоимпедансного эффекта, позволяющую рекомендовать их для детектирования положения наполненных композитов и массовой концентрации частиц в композитах от 2 % и выше.
4. Впервые показана возможность детектирования распределения магнитных полей рассеяния микро- и наночастиц в составе эпоксидных наполненных композитов с разной концентрацией наполнителя с помощью пленочного магнитоимпедансного элемента на основе анализа формы магнитоимпедансных кривых.
5. Предложен способ автоматизированного решения системы двух нелинейных уравнений, определяющих условие равновесия намагниченности и условие ФМР при выходе внешнего магнитного поля из плоскости ферромагнитной пленки, позволяющий определить константу перпендикулярной магнитной анизотропии по угловой

зависимости поля ФМР для однородно намагниченной пленки с плоскостной одноосной магнитной анизотропией.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения и пяти глав. Общий объем диссертации 141 страница, включая 7 таблиц и 63 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 167 наименований.

Во **введении** диссертации обоснована актуальность проведенных исследований, определены цель и задачи работы, показана новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость, приведены основные защищаемые положения, изложены структура работы и ее краткое содержание, приведены основные данные о публикациях по теме диссертации.

В **первой главе** приводится обзор литературы по тонким магнитным пленкам на основе пермаллоя, наноструктурированным магнитоимпедансным элементам, ансамблям микроэлементов и профилированным пленочным элементам; магнитоимпедансному эффекту и его связью с ферромагнитным и спин – волновыми резонансами, обозначены вопросы, открытые для дальнейших исследований.

Во **второй главе** представлено описание экспериментальных методов получения и исследования структур, использованных в диссертационной работе. Приводится описание методов магнетронного напыления и условий их реализации для получения необходимых для исследования образцов, экспериментальных методов исследования структуры и поверхности пленочных элементов на основе энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и рентгенофазового анализа; экспериментальных методов исследования статических и динамических магнитных свойств с использованием магнитооптического Керр-микроскопа, спектрометра ферромагнитного резонанса, анализатора импеданса и других. Обсуждаются условия применения и преимущества данных методик при исследовании токопленочных наноструктурированных образцов. Также в данной главе содержится описание методов получения и экспериментального исследования магнитных частиц с разными параметрами дисперсности и эпоксидных композитов на их основе.

Оригинальные результаты изложены в 3 - 5 главах диссертации.

В **третьей главе** приведены результаты исследования магнитных свойств пленочных элементов $[\text{Cu}/\text{FeNi}]_5/\text{Cu}/\text{FeNi}/\text{Cu}/\text{FeNi}/\text{Cu}/[\text{Cu}/\text{FeNi}]_5$ с наноструктурированным пермаллоем. Исследовано влияние наноструктурирования пермаллоя, а также уменьшение длины пленочных

элементов на статические и магнитодинамические свойства элементов, представленных в двух вариациях: короткие элементы (0,5 мм × 5,0 мм) и длинные элементы (0,5 мм × 10,0 мм). Экспериментальные исследования процессов перемагничивания, проведенные с помощью Керр – микроскопа и вибрационной магнитометрии, свидетельствует о влиянии магнитостатического взаимодействия на формирование эффективной поперечной магнитной анизотропии. Показано, что ориентация оси легкого намагничивания не совпадает с направлением спонтанной намагниченности в доменах, ось поперечной эффективной магнитной анизотропии формируется за счет магнитостатического взаимодействия и наведенной магнитной анизотропии, магнитостатическое взаимодействие также приводит к формированию магнитной структуры с антиферромагнитным упорядочением магнитных моментов в соседних слоях. На основе изучения ферромагнитного резонанса и спин-волновых резонансов, проведенных в разной геометрии, установлено, что наноструктурирование приводит к разбиению элемента на эффективные слои с разной величиной перпендикулярной магнитной анизотропии. Изучен магнитоимпедансный эффект с учетом анизотропии формы и наведенной магнитной анизотропии в плоскости.

В **четвертой главе** рассмотрены пленочные структуры с наноструктурированной поверхностью. Приведены результаты исследований структурных и магнитных свойств сплошных пленок FeNi разной толщины, а также ансамблей однослойных микроэлементов разной формы и ансамблей многослойных микроэлементов. На основе использования метода ферромагнитного резонанса определена толщина пленок FeNi (порядка 100 нм), при которой реализуются оптимальные магнитоимпедансные эффекты. Изучены особенности процессов перемагничивания ансамблей однослойных квадратных микроэлементов. Определены различия в процессах перемагничивания данных ансамблей при различной геометрии магнитного поля (направлении вдоль оси легкого и трудного намагничивания). Показана возможность формирования периодической структуры магнитных доменов на поверхностях профилированных магнитоимпедансных элементов.

Пятая глава посвящена вопросам получения магнитных частиц оксида железа с разными параметрами дисперсности и магнитных композитов на основе эпоксидной смолы с различной концентрацией этих частиц, исследованию их структурных и магнитных свойств и изучению особенностей магнитоимпедансных эффектов в полученных композитах. Проведенные исследования позволили установить зависимость магнитных свойств (намагниченности) композитов от концентрации частиц разного типа. Показано, что магнитный момент композитов в рамках одной концентраций частиц не зависит от типа частиц. Изучены магнитоимпедансные эффекты в

полученных композитах, показано, что неоднородные поля рассеяния могут быть определены на основе изучения особенностей магнитоимпедансных зависимостей. Предложена методика определения оценки концентрации частиц в композите, а также его положения по магнитоимпедансному отклику.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

Достоверность и надежность полученных оригинальных результатов обеспечивается применением апробированных методик, строгой обоснованностью принятых допущений, использованием сертифицированного оборудования для экспериментальных исследований, согласованностью результатов исследования между собой и сопоставлением промежуточных результатов исследования с известными литературными данными.

Результаты диссертационной работы представляют интерес, как для фундаментальных научных исследований, так и для перспективных практических приложений в функциональной микроэлектронике, имеют значимость для науки и производства. Результаты проведенных автором исследований могут быть использованы при разработке устройств спинтроники и магноники, магнитных сенсоров, датчиков, и др.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты и выводы диссертационной работы Мельникова Г.Ю. могут быть рекомендованы к использованию многими организациями Российской Федерации: ИОФ РАН, ФИ РАН, ИПФ РАН, Институт физики микроструктур РАН, ведущими университетами, такими как МГУ, Санкт-Петербургский университет, МИЭТ, МИРЭА, Высшая школа экономики и др.

Общая характеристика и оценка работы.

Мельниковым Г.Ю. выполнен большой объем работы по изучению магнитных свойств и процессов динамического перемагничивания в наноструктурированных пленочных элементах на основе пермаллоя, получен ряд новых экспериментальных результатов, на основе которых установлены особенности магнитных свойств многослойных пленочных систем, обусловленных наноструктурированием, определены оптимальные условия для реализации магнитоимпедансных эффектов. В работе достаточно полно отражена оригинальность исследований и личный вклад автора. Содержание


диссертации соответствует указанной специальности, а автореферат отражает содержание диссертации. Материалы диссертации изложены в 27 научных работах, в том числе в 8 статьях в реферируемых зарубежных и российских журналах из перечня ВАК. Результаты диссертации Мельникова Г.Ю. обсуждались на 8 всероссийских и международных конференциях и школах семинарах, зарегистрирован 1 патент для системы для настройки магнитного датчика, определяющего магнитный носитель с лекарственным средством в зоне терапии и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

К работе имеются следующие **замечания**:

1. В диссертации подробно описаны методы экспериментального исследования, включая ионно-плазменное магнетронное распыление, напыление через маски, литография и др.. Желательно провести сравнение, также с другими методиками, чтобы показать преимущество использования этих методов для целей данного исследования.
2. В главе 3 на основе экспериментальных исследований делается вывод о том, что основным механизмом, отвечающим за антиферромагнитное упорядочение на границах раздела в многослойных структурах $[\text{FeNi}/\text{Cu}]_5$ считается магнитостатическое взаимодействие. Однако, не приводится сравнительная оценка вкладов, связанных с обменными, магнитоупругими и магнитостатическими взаимодействиями в пользу этого утверждения.
3. В главе 4 рассматриваются процессы перемагничивания ансамблей микроэлементов вдоль разных направлений (вдоль легких и трудных осей намагничивания), при этом механизмы, приводящие к формированию разных магнитных структур (смещение ДГ в первом случае, формирование вихревых структур во втором случае) не затрагиваются.
4. Получен интересный результат – при перемагничивании в направлении трудной оси формируются структуры вихревого типа, при этом их влияние на магнитодинамические и магнитоимпедансные свойства в работе не обсуждается.
5. Некоторые выводы постулируются, например, вывод о том, что магнитный момент композитов не зависит от типа частиц, несмотря на заметные отличия средних размеров и параметров дисперсности, с чем это связано не обсуждается.
6. В работе имеются стилистические неточности, которые несколько затрудняют понимание результатов работы, например, в выводах к главе 2 (стр.74, п.7), стр. 43 и др.

Данные замечания не влияют на научную значимость полученных результатов. В целом диссертационная работа «Магнитодинамические свойства наноструктурированных пленочных элементов на основе пермаллоя с высокой магнитной проницаемостью» удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а сам соискатель **Мельников Григорий Юрьевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

Гареева Зухра Владимировна 27.05.2024  З.В. Гареева
(дата) (подпись)

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической физики Института физики молекул и кристаллов – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИФМК УФИЦ РАН)

Контактная информация:

Тел. +7(347)2921417

Электронная почта: zukhragzv@yandex.ru

Адрес: Россия, 450054, Республика Башкортостан,
Г.О. город Уфа, Проспект Октября, д. № 71, ИФМК УФИЦ РАН
Согласна на обработку персональной информации.

Подпись Гареевой Зухры Владимировны заверяю.

Уч. секретарь ИФМК УФИЦ РАН

канд. физ-мат. наук



 А.А. Бунаков

