

ОТЗЫВ

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

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Г.Ю. Мельникова посвящена исследованию магнитодинамических эффектов в магнитных пленках, многослойных наноструктурах и ансамблях микрообъектов, изготовленных методами оптической литографии. Исследования были направлены на развитие новых подходов в вопросах наноструктурирования с целью разработки эффективных элементов с высоким магнитным импедансом (МИ), перспективных для создания магнитных сенсоров слабых магнитных полей и других устройств магнитоэлектроники. Особенностью МИ элементов высокая чувствительность к магнитному полю на уровне десятков и сотен процентов на эрстед, что существенно превышает чувствительность магнитных сенсоров на основе эффектов анизотропного, гигантского и туннельного магнитосопротивления. Высокая чувствительность позволяет использовать МИ элементы, в частности, в медицинских приложениях в задачах биодетектирования при адресной доставке лекарств в зону терапии.

В работе предложены новые варианты наноструктурированных пленочных МИ элементов на основе слоев пермаллоя и меди, изготовлены и исследованы ансамбли однослойных и многослойных пленочных микроэлементов, полученных напылением через маски, исследованы статические и динамические магнитные свойства объектов. Разработанные подходы и созданные МИ элементы применены для детектирования магнитных полей рассеяния в эпоксидных композитах, содержащих магнитные частицы. Тематика проведенных исследований является **актуальной** как с научной точки зрения, так и в прикладном аспекте.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, рекомендаций дальнейшей разработки темы и списка использованных источников. Общий объем диссертации 141 страниц, включая 63 рисунка и 7 таблиц.

Во введении автором описаны особенности систем, функционирующих на основе эффекта магнитного импеданса, подходы, используемые для повышения их функциональных характеристик, указаны возможные направления использования МИ элементов в практических приложениях. На основе анализа текущего состояния исследований в данной области были аргументированно сформулированы цели и задачи исследований.

В первой главе приведен обзор литературы по теме исследований. Данный обзор является достаточно подробным и охватывает все вопросы, касающиеся описанных далее использованных методических подходов и полученных собственных оригинальных результатов. Анализ литературных данных позволил автору обосновать выбор типов магнитных и немагнитных материалов (FeNi, Cu), общую толщину слоев МИ элементов, толщину отдельных слоев каждого типа, толщину и материал прослоек, выполняющих задачу наноструктурирования. На основании проведенного анализа автором предложена оптимальная структура МИ элемента. Приведены теоретические выражения, используемые для описания магнитоимпедансного эффекта. Обсуждены отличия данного

эффекта от других, близких по природе протекающих процессов магнитодинамических эффектов – ферромагнитного резонанса и спин-волнового резонанса.

Во второй главе описаны использованные методы получения магнитных композитов, пленок пермаллоя, многослойных структур и ансамблей наноструктурированных пленочных объектов. Определены размерные параметры экспериментальных образцов с указанием толщины магнитных пленок и отдельных слоев в многослойных структурах. Приведена необходимая информация об использованных экспериментальных методиках, касающейся исследования структуры поверхности, статических магнитных свойств, ферромагнитного и спинволнового резонанса. Описаны особенности применения метода магнитоимпедансного детектирования полей рассеяния магнитного композита в форме цилиндра.

В третьей главе обсуждено основное отличие полученных многослойных структур от ранее исследованных, заключающееся в наноструктурировании центрального слоя меди тонкими слоями пермаллоя. Получены и проанализированы экспериментальные данные, касающиеся исследований поверхности, статических магнитных свойств, ферромагнитного резонанса и магнитоимпедансного детектирования исследованных образцов. Сделан вывод о важной роли магнитоэлектронного взаимодействия ферромагнитных слоев, существенно влияющего на процессы перемагничивания многослойных структур. Показано, в частности, что в основном состоянии в многослойных структурах из чередующихся ферромагнитных и парамагнитных слоев из-за замыкания магнитного потока реализуется антиферромагнитное упорядочение, которое влияет на перемагничивание нескомпенсированного магнитного слоя и приводит к появлению поля смещения. Проведен подробный анализ результатов исследования ферромагнитного резонанса. Установлено, что исследованный МИ элемент разбивается на 4 эффективных слоя, распределенных по толщине многослойной структуры. Приведены данные о величине магнитоимпедансного отношения в элементах в виде полосок и их чувствительности к магнитному полю. Наибольшее полученное МИ отношение составляет 105%, а чувствительность – до 30%/Э.

В четвертой главе приведены результаты исследований пленок пермаллоя различной толщины и ансамблей МИ элементов с наноструктурированной поверхностью, полученную напылением через маски. Исследованы статические кривые перемагничивания. В магнитных полях, соответствующих различным участкам кривых перемагничивания, с помощью Керр-микроскопа получены данные о доменной структуре в однослойных микроэлементах из пленок пермаллоя, измеренных при различных направлениях внешнего магнитного поля относительно созданной при напылении оси анизотропии. Показано, что из-за эффекта затенения при напылении материала через маски могут образовываться как разделённые микроэлементы, так и варианты микроструктуры, в которых объекты соприкасаются друг с другом. Такие объекты обладают различными магнитными и магнитодинамическими свойствами. Показано, что периодическая структура элементов создает в них также упорядоченную доменную структуру. Визуализация доменной структуры в микроэлементах показала, что намагничивание вдоль оси легкого намагничивания происходит за счет процессов смещения доменных границ, а при намагничивании вдоль оси трудного намагничивания – как за счет процессов смещения доменных границ, так и путем вращения намагниченности. Показано, что МИ отношение в случае изготовленных элементов с не профилированной поверхностью может достигать величины – 160%, в то время как в элементах с профилированной поверхностью в виде квадратов и прямоугольников – 60%. Полученная в работе максимальная чувствительность составляет 42%/Э.

Пятая глава посвящена вопросам создания магнитных композитов на основе эпоксидной смолы и магнитных частиц из биосовместимых окислов железа, выступающих в качестве модельных объектов для отработки метода магнитоимпедансного детектирования биообъектов в медицинских приложениях. Для этой цели был определен химический состав исходных порошков, исследовано распределение частиц по размерам, изготовлены композиты в виде цилиндров с различной концентрацией частиц и измерены магнитные характеристики композитов. С использованием разработанных двух типов МИ элементов с не профилированной и профилированной поверхностью проведены эксперименты по магнитоимпедансному детектированию полей рассеяния магнитных композитов. Показано, что разработанный метод применим для детектирования положения и определения магнитных характеристик эпоксидных композитов с массовым содержанием магнитных частиц от 2% и выше. Установлено, что динамические характеристики поверхностно профилированных МИ элементов могут превосходить аналогичные характеристики непрофилированных элементов.

В заключении перечислены основные результаты проведенных исследований и даны рекомендации и указаны перспективы дальнейшей разработки темы.

Следует отметить, что диссертация хорошо структурирована, все её части логически связаны между собой, а полученные в результате полностью соответствуют поставленной в работе цели и сформулированным задачам. Содержание автореферата достаточно полно отражает содержание и результаты работы. По теме работы Г.Ю. Мельниковым в соавторстве опубликовано 8 статей в российских и зарубежных журналах. Работа хорошо апробирована, её результаты докладывались на многочисленных российских и международных конференциях и симпозиумах.

Вопросы и замечания

1. При исследовании методом рентгеноструктурного анализа ансамблей квадратных элементов из пленок пермаллоя было установлено (рис. 4.2), что в системе с наибольшим размером объектов 300×300 мкм² наблюдается наименьший по высоте брегговский пик (111), что было объяснено возможным ухудшением кристаллографической текстуры. При увеличении площади отдельных микрообъектов структура в ансамбле должна быть ближе к структуре сплошной пленки, обладающей наиболее совершенной текстурой. На эксперименте наблюдается обратная ситуация. С чем это может быть связано?
2. Не проведено сравнение полученных в работе функциональных характеристик магнитоимпедансных элементов с результатами других исследователей.
3. Характерные для магнитоимпедансного детектирования композитов расстояния, на которых наблюдается изменение величины сигнала, составляют доли миллиметра – миллиметр, что значительно превышает размеры магнитных частиц и их агломераций в композите. Имеет ли смысл в задачах магнитоимпедансного детектирования говорить о форме частиц, их размерах и распределении, если композит выступает в качестве единого массивного объекта с заданными магнитными свойствами?
4. В тексте имеются ошибки, в ряде мест отсутствуют знаки препинания, имеются ошибки в обозначениях кривых на рис. 1.6 и рис. 5.8, используются нестандартные термины (in-of-plane конфигурация, длина обменного взаимодействия, вращающаяся анизотропия и др.). Отдельным недостатком текста диссертации является отсутствие векторных обозначений величин в тех многочисленных случаях, когда это

необходимо было сделать. Затрудняет понимание текста также использование англоязычных сокращений, используемых для обозначения типов исследуемых объектов.

Указанные замечания и недочеты не являются принципиальными ошибками и не снижают ценность диссертационной работы.

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.12: пункт 4 – исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств; пункт 6 – моделирование свойств и физических явлений в материалах с различными видами магнитного упорядочения, а также в композитных структурах на их основе.

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой проблема синтеза магниточувствительных пленочных материалов с магнитоимпедансным эффектом решена посредством целенаправленного выбора типов материалов и толщины слоев, применения различных способов наноструктурирования, выявления физических механизмов, управляющих статическими магнитными свойствами и магнитодинамическими эффектами в одиночных магнитных пленках и ансамблях микроэлементов различной формы, а также разработкой эффективных магнитоимпедансных элементов, применимых для детектирования слабых магнитных полей. Я считаю, что 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:

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовой наноспинтроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН)


(подпись)

Миляев Михаил Анатольевич

31.05.2024
(дата)

Контактная информация:

телефон: +7(343) 378-38-81,

электронная почта: milyaev@imp.uran.ru

Адрес: Россия, 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН)

*Подпись заведующего лабораторией квантовой наноспинтроники
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики
металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук
М.А. Миляева заверяю:*

Ученый секретарь ИФМ УрО РАН
кандидат физ.-мат. наук




И.Ю. Арапова