

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи

Членова Анна Александровна

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И ГИГАНТСКИЙ МАГНИТНЫЙ ИМПЕДАНС
МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ОСНОВЕ ПЕРМАЛЛОЯ**

01.04.11 – Физика магнитных явлений

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико -математических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре магнетизма и магнитных наноматериалов Института естественных наук и математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Курляндская Галина Владимировна,

Официальные оппоненты: **Комогорцев Сергей Викторович,**
доктор физико-математических наук, доцент,
Институт Физики им. Л.В. Киренского Сибирского
отделения Российской академии наук - обособленное
подразделение ФГБНУ «Федеральный
исследовательский центр «Красноярский научный
центр Сибирского отделения Российской академии
наук», заведующий лабораторией физики магнитных
пленок;

Елфимова Екатерина Александровна,
доктор физико-математических наук, доцент, ФГАОУ
ВО «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
заведующий кафедрой теоретической и
математической физики;

Шалыгина Елена Евгеньевна,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова», главный
научный сотрудник Физического факультета.

Защита состоится «17» декабря 2020 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 01.02.11 по адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, комн. 248 (зал заседаний диссертационного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1664>.

Автореферат разослан « » ноября 2020 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, доцент



Овчинников А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Углубленное понимание процессов статического и динамического перемагничивания наноструктурированных пленочных элементов востребовано как в ряде разделов фундаментальных дисциплин, так и практических приложений. Запрос на создание магнитных сенсорных систем с высокой чувствительностью по отношению к внешнему магнитному полю растет из года в год. Это связано с повышением стандартов жизни, включая распространение биомедицинских приложений и необходимость глубокого мониторинга во время пандемий, глобальных катастроф, текущего контроля факторов окружающей среды и климата. Несмотря на то, что тонкие пленки пермаллоя, особенно сплава $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ с близкой к нулю константой магнитострикции, известны на протяжении нескольких десятилетий [Ошибка! Источник ссылки не найден.-2], а работающие приложения основываются на существовании хорошо развитых технологий их получения, существует ряд нерешенных научных и практических задач в случае наноструктурированных сред с высокой динамической магнитной проницаемостью.

Понимание связи особенностей структуры и текстуры, процессов статического и динамического перемагничивания наноструктурированных типа $[\text{FeNi}/\text{Ti}]_n/\text{Cu}/[\text{Ti}/\text{FeNi}]_m$ с гигантским магнитоимпедансным (ГМИ) эффектом, осажденных на жесткие и гибкие основы, открывает широкие возможности получения функциональных сенсорных элементов с заданными свойствами при эффективном использовании анизотропии формы и магнитоэлектрического взаимодействия, регулируемых геометрией магнитных слоев и прослоек, а также количеством слоев многослойных пленочных элементов.

Особые ожидания в отношении пленочных ГМИ-элементов связаны с разработкой магнитных биодатчиков. Детектирование магнитных маркеров основано на оценке совокупной величины полей рассеяния магнитных наночастиц, введенных в биологический объект. Одной из основополагающих характеристик такого сенсора является чувствительность по отношению к магнитному полю: чем выше чувствительность, тем более низкие концентрации магнитных маркеров можно определять.

Существует определенный опыт создания пленочных ГМИ сенсоров магнитного поля. Большая часть известных исследований и разработок связана с детектированием однородных внешних полей и полей рассеяния крупных объектов (задачи неразрушающего контроля) при отсутствии промежуточной

среды. Биомедицинские приложения требуют обеспечения процесса детектирования очень слабых и, как правило, неоднородных магнитных полей в промежуточной среде, что предъявляет повышенные требования к чувствительности сенсорных устройств. Кроме того, возрастает необходимость использования дополнительных покрытий, увеличивающих расстояние между объектом детектирования и сенсорным элементом, а значит и необходимость выбора элемента с максимальной чувствительностью.

Степень разработанности темы исследований

Факт зависимости полного электрического сопротивления железоникелевых проволок при протекании по ним тока высокой частоты был установлен около 70 лет назад в работах Харрисона [3-4]. **Ошибка! Источник ссылки не найден.** В геометрии цилиндрического однородного образца при приложении внешнего поля вдоль его оси зависимость импеданса от величины этого поля была теоретически описана Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшицем [5] для однородной среды с постоянной проводимостью и постоянной магнитной проницаемостью, но с оговоркой, что для парамагнитных и диамагнитных тел магнитная проницаемость близка к единице. В 1991 году был создан первый датчик малых магнитных полей с чувствительным элементом в виде аморфной ленты FeCoSiB [6] и получен патент [7]. Особый интерес к ГМИ эффекту возник в 1994 году, после опубликования работ групп А. Берковитц (А. Berkowitz), К. Мори (К. Mohri), С. Реженде (S. Rezende) и В. Рао (V. Rao) [8-11].

На данный момент исследования по ГМИ ведутся в Уральском федеральном университете, Иркутском государственном университете, Крымском федеральном университете, Научно-исследовательском институте природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ, Институте физики металлов УрО РАН в России, Университете Страны Басков, Университете Овиедо в Испании, Политехническом университете Монреаля в Канаде, Промышленном научно-исследовательском университете Нагоя в Японии и многих других. Однако лишь несколько групп обладают необходимым оборудованием для получения многослойных пленочных наноструктур с высокой динамической магнитной проницаемостью, большая же часть исследователей работает с быстрозакленными лентами или аморфными проволоками.

В Уральском федеральном университете сформирована научная школа и активно ведутся исследования свойств магнитомягких материалов с высокой динамической магнитной проницаемостью. На кафедре магнетизма и магнитных наноматериалов и в отделе магнетизма твердых тел ИЕНиМ (В. О. Васьковский, В. Н. Лепаловский, А. В. Свалов, П. А. Савин, С. О. Волчков, С. В. Щербинин, Е.

А. Степанова) накоплен большой опыт работы с материалами в пленочном состоянии, включая методы их получения, исследования особенностей магнитной анизотропии, статических и динамических свойств, эффективно используются методы компьютерного моделирования, создаются физические модели для понимания наноструктурированных материалов и лабораторные прототипы специализированных детекторов малых магнитных полей.

Цель работы и задачи

Цель данной работы – установление связи между особенностями структуры, статическими магнитными свойствами, особенностями магнитной анизотропии и магнитоимпедансным эффектом в многослойных пленочных элементах на основе пермаллоя.

Для достижения основной цели работы были поставлены следующие конкретные задачи:

1) Получение многослойных пленочных элементов $[\text{Cu}/\text{FeNi}_{8n}/\text{Cu}(500 \text{ нм})/[\text{FeNi}/\text{Cu}]_m$ и $[\text{Ti}/\text{FeNi}]_n/\text{Cu}(500 \text{ нм})/[\text{FeNi}/\text{Ti}]_m$ (вблизи состава $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$, обладающего близкой к нулю константой магнитострикции) при осаждении на жесткие и гибкие основы с различной толщиной и количеством магнитных слоев многослойной структуры, включая как конфигурации с одинаковым, так и с различным количеством магнитных слоев до и после центрального медного слоя.

Аттестация состава, структуры и толщины слоев;

2) Установление толщинных зависимостей магнитных и магнитоимпедансных характеристик для $[\text{Cu}/\text{FeNi}]_n/\text{Cu}(500 \text{ нм})/[\text{FeNi}/\text{Cu}]_m$ и $[\text{Ti}/\text{FeNi}]_n/\text{Cu}(500 \text{ нм})/[\text{FeNi}/\text{Ti}]_m$ элементов;

3) Определение условий протекания процесса низкотемпературной конденсации углерода на поверхности пленочных наноструктур на основе железа и никеля в метилбензоле и выявление особенностей кинетики образования углеродного покрытия. Оценка статических и динамических свойств пленочных элементов после осаждения данного углеродного покрытия;

4) Установление температурной зависимости магнитных свойств и ГМИ эффекта в пленочных многослойных элементах на основе FeNi и выяснение ее механизма;

5) Исследование качественных и количественных особенностей ГМИ эффекта многослойных пленочных элементов на основе пермаллоя с различным количеством магнитных слоев до и после центрального слоя меди в режимах прототипов детекторов давления и биодетекторов.

Научная новизна работы

Проведено систематическое исследование многослойных пленочных элементов на основе пермаллоя как с одинаковым, так и с различным количеством магнитных слоев до и после центрального слоя меди при наборе толщин магнитных слоев (25 – 170 нм). Установлен вклад толщины магнитных слоев и количества магнитных слоев до и после центрального слоя меди в величину магнитоимпедансного эффекта.

Установлен факт протекания процесса низкотемпературной конденсации углерода на поверхности пленочных наноструктур на основе Fe и FeNi при выдержке в метилбензоле. Исследованы особенности кинетики образования дефектного графеноподобного покрытия на поверхности пленок 3d-металлов, проведены оценки статических и динамических свойств пленок пермаллоя и железа с этим особым типом углеродного покрытия.

Показано увеличение величины магнитоимпедансного эффекта в пленочных элементах $[\text{Cu}/\text{FeNi}]_5/\text{Cu}(500 \text{ нм})/[\text{FeNi}/\text{Cu}]_5$ в интервале температур от 25 до 50°C и предложен объясняющий его механизм.

Показано, что исследованные $[\text{Cu}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}]_n/\text{Cu}(500 \text{ нм})/[\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Cu}]_m$ и $[\text{Ti}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}]_n/\text{Cu}(500 \text{ нм})/[\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Ti}]_m$ элементы могут быть предложены для использования в детекторах давления и биодетекторах, позволяющих определять концентрации наночастиц путем детектирования их суммарных полей рассеяния.

Теоретическая и практическая значимость работы

Впервые сравнительно проанализированы магнитные свойства и магнитоимпедансный эффект в многослойных пленочных элементах с различной толщиной и количеством магнитных слоев многослойной структуры до и после центрального медного слоя, $[\text{Cu}/\text{FeNi}]_n/\text{Cu}/[\text{FeNi}/\text{Cu}]_m$ и $[\text{Ti}/\text{FeNi}]_n/\text{Cu}/[\text{FeNi}/\text{Ti}]_m$. Проведенное исследование данных структур при осаждении на жесткие и гибкие основы дополняет существующие экспериментальные и теоретические данные для сред с высокой динамической магнитной проницаемостью.

Доказана возможность протекания процесса низкотемпературной конденсации углерода на поверхности пленочных наноструктур на основе пленок Fe и FeNi при выдержке в метилбензоле. Установлены особенности кинетики образования углеродного покрытия, позволяющие предложить данный тип воздействия в качестве эффективного метода влияния на функциональные свойства наноструктур на основе пленок 3d-металлов.

Установленная температурная зависимость статических и динамических свойств многослойных элементов на основе пермаллоя в интервале температур

от 25 до 50°C важна для практических приложений специализированных датчиков слабых магнитных полей.

Для $[\text{Cu}/\text{FeNi}]_n/\text{Cu}/[\text{FeNi}/\text{Cu}]_n$ многослойных пленочных элементов экспериментально показана возможность детектирования полей рассеяния магнитных наночастиц в составе феррогелей. В геометрии тонких покрытий получено удовлетворительное согласие экспериментальных результатов настоящей работы с результатами предложенной и разработанной соавторами-теоретиками электродинамической аналитической модели ГМИ многослойной пленки со слоем феррогеля.

Положения, выносимые на защиту

1. Характеристики магнитного импеданса в наноструктурированных магнитных элементах в форме полосок типа $[\text{Cu}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}]_n/\text{Cu}/[\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Cu}]_m$ и $[\text{Ti}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}]_n/\text{Cu}/[\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Ti}]_m$ можно целенаправленно варьировать за счёт изменения толщины и количества магнитных субслоёв, в том числе в рамках несимметричной структуры ($n \neq m$).

2. Для плёночных наноструктурированных элементов с разным составом магнитных субслоёв имеет место корреляция между концентрационными изменениями максимальной величины магнитного импеданса $\Delta Z/Z_{\max}$ и величины поля ферромагнитного резонанса.

3. Причиной изменения магнитного импеданса наноструктурированных элементов при нагреве до 50 °C является термоинициированная релаксация неоднородный упругих напряжений и связанное с этим повышение динамической магнитной проницаемости.

4. Впервые показана возможность реализации и исследованы особенности кинетики процесса низкотемпературной конденсации углерода на поверхности пленок Fe и FeNi при выдержке в метилбензоле в нормальных условиях. Доказано, что наличие покрытия влияет на характеристики магнитного импеданса, в частности, расширяет область высокой МИ-чувствительности (рабочий интервал) элементов.

5. Плёночные элементы типа $[\text{Cu}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}]_n/\text{Cu}/[\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Cu}]_m$ применимы в роли биосенсоров для регистрации магнитных наночастиц в живых тканях при максимальной чувствительности 1,3 % $\Delta Z/Z_{\max}$ на массовый процент концентрации наночастиц.

Степень достоверности и апробация результатов

Обсуждаемые в работе результаты были получены при помощи современных методик и оборудования, которые признаны мировым научным

сообществом и широко используются ведущими научными группами. В некоторых случаях использовалось оригинальное оборудование, достоверность результатов исследований с помощью которого была подтверждена выборочными контрольными измерениями одних и тех же образцов в других лабораториях. Полученные реперные результаты находятся в согласии с данными, сообщенными ранее другими исследователями.

Материалы диссертационной работы были представлены на следующих конференциях: Moscow International Symposium on Magnetism (2014, 2017, Москва), Всероссийская научная конференция студентов–физиков и молодых учёных (2017, Екатеринбург), Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации» (2016, 2017, 2019, Екатеринбург), Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (2013 – 2016, Екатеринбург), Российская молодежная научная конференция «Проблемы теоретической и экспериментальной химии» (2014 – 2019, Екатеринбург), Euro-Asian Symposium “Trends in MAGnetism” (2013 – Владивосток, 2016 – Красноярск, 2019 – Екатеринбург), Байкальская международная конференция “Магнитные материалы. Новые технологии” (2014, 2016, 2018, Иркутск), International Baltic conference on magnetism (2015, Светлогорск), 7-ая Международная конференция по материалам и приложениям для датчиков и преобразователей (2018, Словакия), Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» (2014, 2015, Екатеринбург), Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения» (2018, 2019, Екатеринбург), Международная конференция IEEE Summer School (2017, Испания), XXIII Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (2018, Москва).

Личный вклад автора

Диссертация выполнена на базе отдела магнетизма твердых тел и кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов Института естественных наук и математики УрФУ. Выбор направления исследований, постановка цели и задач, обсуждение результатов и подготовка публикаций и отчетов по грантам выполнялась совместно с научным руководителем д. ф.-м. н. Курляндской Галиной Владимировной.

Пленочные образцы были получены к. ф.-м. н. В.Н. Лепаловским и д. ф.-м. н. А. В. Сваловым. Образцы феррогелей были получены д. ф.-м. н. А. П. Сафроновым. Лично автором были получены результаты исследований структурных и магнитных свойств. Автор лично занималась подготовкой к

конкретным измерениям все образцы и обсуждала полученные результаты с сотрудниками кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов УрФУ (с к. ф.-м. н. В. Н. Лепаловским, к. ф.-м. н. П. А. Савиным, к. ф.-м. н. С. О. Волчковым и д. ф.-м. н. А. В. Сваловым), Института электрофизики УрО РАН (О. М. Саматовым, д. ф.-м. н. А. П. Сафроновым, к. ф.-м. н. А. М. Мурзакаевым и к. ф.-м. н. С. В. Щербининым), и НИИ природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ (д. ф.-м. н. Н. А. Бузниковым).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ по теме № 3.1362.2014 (2014 – 2016 гг.), № 3.6121.2017 (2017 – 2019 гг.), № FEUZ-2020-0051 (2020 г.), при поддержке грантов РФФИ № 15-32-50365 (мол_нр, 2015 г.), № 16-32-50064 (мол_нр, 2016 г.), № 18-32-00094 (мол_а, 2018 – 2020 гг.) и гранта РНФ № 18-19-00090 (2018 – 2020 гг.).

Структура и объем диссертации

Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение, список цитируемой литературы, список сокращений и условных обозначений. Общий объем работы составляет 191 страницу, включая 45 рисунков, 9 таблиц, 24 формулы и список использованных источников из 138 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и новизна работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, указан личный вклад автора, объём и структура диссертации.

Первая глава посвящена обзору литературы, начиная с истории развития и физических основ магнитоимпедансного эффекта, включая анализ тонких магнитных пленок как объекта с высоким МИ эффектом и особенностей их получения. Далее рассматриваются вопросы получения пленочных элементов с модифицированной поверхностью и применения таких наноструктур в качестве чувствительных элементов детекторов слабых магнитных полей.

Во второй главе приведены методики получения и исследования структурных и магнитных свойств пленочных материалов, использованных в работе. В работе исследовались однослойные и многослойные плёнки типа $[\text{Cu}/\text{FeNi}]_n/\text{Cu}/[\text{FeNi}/\text{Cu}]_m$ и $[\text{Ti}/\text{FeNi}]_n/\text{Cu}/[\text{FeNi}/\text{Ti}]_m$, полученные методами ионно-плазменного распыления при осаждении на жесткие (монокристаллические кремниевые или стеклянные) и гибкие (циклоолефиновый сополимер) основы. Варьируемым параметром были толщина слоев и их количество, а также состав пермаллоя FeNi. Геометрия пленочных элементов задавалась путем использования металлических масок в процессе напыления.

Внешнее технологическое магнитное поле, прикладываемое в процессе напыления, позволяло формировать индуцированную одноосную магнитную анизотропию в плоскости слоев FeNi. Магнитные наночастицы оксида железа для их последующего использования в составе водных суспензий, гелей и феррогелей были получены методом лазерного испарения мишени.

Структурные особенности и состав материалов исследовались такими апробированными методами, как профилометрия, атомная силовая микроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ, рентгенофазовый анализ (включая малоугловой диапазон), рентгеновский фотоэлектронный анализ, оптическая, сканирующая и просвечивающая электронная микроскопии, дифференциальный термический анализ с термогравиметрией, динамическое рассеяние света, метод низкотемпературной адсорбции азота.

Магнитные свойства исследовались при помощи вибрационного магнитометра, магнитометрии с преобразователем типа СКВИД и микроскопии с использованием магнитооптического эффекта Керра. Измерение магнитосопротивления проводилось четырехзондовым методом. Магнитодинамические характеристики исследовались при помощи установки для измерения ферромагнитного резонанса на основе спектрометра электронного парамагнитного резонанса X-диапазона Elexsys II E500 (Bruker), автоматического комплекса магнитоимпедансной спектроскопии на основе анализаторов импеданса 4294 A или e4991 (Agilent). Исследование тонкопленочных образцов проводилось в конфигурации продольного магнитоимпедансного эффекта, т.е. в геометрии, когда внешнее магнитное поле, создаваемое катушками Гельмгольца, и направление протекания переменного тока через образец были сонаправлены. Одним из ключевых параметров была величина ГМИ отношения полного импеданса (и также для его действительной части) $\Delta Z/Z = 100\% \times (Z(H) - Z(H_{max})) / Z(H_{max})$, где $H_{max} = 100$ Э.

Экспериментальные результаты исследований прототипов магнитных биодатчиков на основе ГМИ-наноструктур $[Cu/FeNi]_x/Cu/[FeNi/Cu]_y$, покрытых слоем феррогеля, сравнительно анализировались с данными расчета, полученными (соавторами-теоретиками в ходе совместной работы) в рамках электродинамической аналитической модели отклика ГМИ многослойной пленки со слоем феррогеля. Распределение полей в пленочном элементе в последнем случае было найдено из решения уравнений Максвелла с соответствующими условиями непрерывности полей на границе различных слоев. Выражение для магнитной проницаемости принималось в форме решения уравнения Ландау-Лифшица, равновесный угол намагниченности был найден

при помощи минимизации свободной энергии, включающей энергию анизотропии и энергию Зеемана во внешнем поле. Импеданс структуры Z был выражен через значения поверхностного импеданса [12]:

$$Z = \frac{\pi d}{cw} \times \left[\frac{e_2^{(m+n+2)}(z_2)}{h_2^{(m+n+2)}(z_2)} - \frac{e_2^{(1)}(z_1)}{h_2^{(1)}(z_1)} \right], \quad (1)$$

где e_2 - амплитуды электрического поля в магнитомягких слоях, z_1 - импеданс самого нижнего слоя многослойной структуры (ближайшего к подложке), z_2 - импеданс самого верхнего слоя многослойной структуры, m и n - номера слоев в многослойной структуре, w - циклическая частота.

Третья глава посвящена многослойным тонкопленочным элементам с особенностями геометрии, в неё включены исследования элементов различных геометрических конфигураций на основе FeNi сплава (пермаллоя, с варьированием состава в небольшом диапазоне) в высокочастотном и сверхвысокочастотном диапазоне, а также при повышенной температуры внешней среды.

В первом разделе главы представлен сравнительный анализ петель магнитного гистерезиса, измеренных на СКВИД-магнитометре, вибрационном магнитометре и магнитооптическом Керр-микроскопе для многослойного пленочного элемента Cu(3 нм)/[FeNi (50 нм)/Cu(3 нм)]₁₀ (аналог одного наноструктурированного магнитного слоя многослойной структуры типа «сэндвич») в форме полоски. Сочетание методик, которые позволяет оценивать процессы намагничивания всего объема материала, с методикой, позволяющей оценивать особенности процессов намагничивания поверхностного слоя, позволило уточнить особенности процессов перемагничивания пленочного ГМИ-элемента в малых магнитных полях и наблюдать процессы перемагничивания, происходящие как вращением вектора намагниченности, так и смещением доменных границ. Проведенное сравнительное исследование процессов особенностей магнитной анизотропии многослойной пленочного элемента показало, что даже при доминировании одноосной магнитной анизотропии подобные структуры могут иметь дополнительные вклады, возможно, связанные с особенностями анизотропии верхнего слоя.

Если в первых работах по МИ пленочных структур использовались сплошные магнитные слои, то позднее была предложена концепция наноструктурирования, т.е. предлагалось заменить сплошной магнитный слой многослойной структурой, не теряющей своей магнитной мягкости даже при больших суммарных толщинах [13-14]. При рассмотрении многослойной структуры будем принимать во внимание такие параметры, как толщину каждого

магнитного слоя многослойной структуры, толщину немагнитных прослоек, разделяющих магнитные индивидуальные слои, количество таких индивидуальных слоев многослойной структуры (субслоев), расположенных как над центральным токопроводящим слоем (медным тоководом), так и под ним, толщину центрального токовода и макроскопическую геометрию прямоугольного пленочного элемента (длину и ширину). Объектом исследований были $[\text{FeNi}(A)/\text{Cu}(3)]_n/\text{FeNi}(A)/\text{Cu}(500)/[\text{FeNi}(A)/\text{Cu}(3)]_n/\text{FeNi}(A)$ структуры, где в скобках указана толщина слоя в нанометрах, с параметрами $A = 170$ нм ($n=2$), $A = 100$ нм ($n=4$), $A = 50$ нм ($n=9$), $A = 25$ нм ($n=19$).

На основе анализа петель гистерезиса было установлено наличие в плоскости плёнок одноосной магнитной анизотропии с низкой дисперсией осей легкого намагничивания. Сравнительно высокое значение коэрцитивной силы наблюдалось только для структуры с $A = 170$ нм, ввиду приближения к толщине перехода в «закритическое» состояние, когда сказывался вклад столбчатой структуры. Абсолютный максимум ГМИ отношения импеданса $\Delta Z/Z$ составил 210 % для элемента с $A = 100$ нм, тогда как для структур с меньшими значениями A отмечались особенности магнитной доменной структуры, такие как сосуществование 180-градусных стенок Нееля с перевязками и асимметричных стенок Блоха без полей рассеяния [15].

В следующем разделе исследовались ГМИ пленочные структуры в хорошо известной конфигурации «сэндвича» при наличии центрального толстого слоя проводника (в данном случае меди) и двух слоев ферромагнетика. Варьировалась толщина (количество) субслоев в каждом слое ферромагнетика с проводящими тонкими прослойками или меди, или титана. Для всех образцов наблюдались низкие значения коэрцитивной силы до 1 Э и довольно близкие величины поля анизотропии около 6 Э, а также поперечная одноосная магнитная анизотропия (Рисунок 1 (а, б)).

В рамках дополнительного исследования было установлено, что нанесенные на тонкие слои Та и Тi, слои пермаллоя обладают как хорошей кристалличностью, так и высокой степенью текстуры, по сравнению с напыленными сразу на подложку, на Cu или Cr. Положительное влияние данного эффекта проявлялось и для многослойных структур, где элементы с прослойками Тi имели более высокие значения ГМИ отношения, чем элементы с прослойками Cu. На рисунке 1 (б) представлена зависимость максимального ГМИ отношения для элементов типа $[\text{Ti}/\text{FeNi}]_5/\text{Ti}/\text{Cu}/\text{Ti}/[\text{FeNi}/\text{Ti}]_m$ ($m = 5 - 0$, Т1 – Т7). Монотонно убывающая зависимость наблюдалась для элементов с обоими типами тонких прослоек. Важно отметить, что на некоторых частотах ГМИ

отношения образцов с «не равным» количеством магнитных слоев (над и под центральным слоем) превышали величину магнитоимпедансного отношения для симметричной структуры, но при более высоких частотах, что ожидаемо в рамках классической электродинамической системы. Близость ГМИ характеристик для симметричной структуры и структуры без одного магнитного слоя (Рисунок 1 (в)) позволила рекомендовать последнюю для исследований ГМИ-элементов с модифицированным верхним слоем (с покрытиями, распределенными магнитными маркерами и др.).

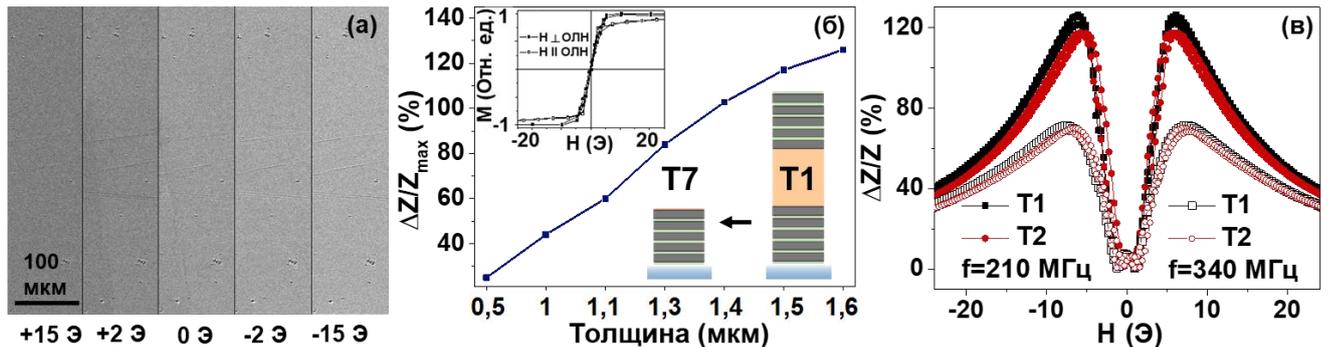


Рисунок 1 – МОКЕ контраст для элемента T1, внешнее поле ориентировано «в плоскости» пленки и горизонтально, короткая сторона элемента ориентирована вертикально. Зависимость величины максимального ГМИ отношения импеданса от количества слоев многослойной структуры $[Ti/FeNi]_5/Ti/Cu/Ti/([FeNi]/Ti)_m$ ($m = 5 - 0$, T1 – T7) (б). На вставке петли гистерезиса полученный на МОКЕ и схематичное изображение структур. Полевая зависимость ГМИ отношения импеданса для образцов T1 и T2 (в).

Исследования статических и динамических магнитных свойств (в данном случае - ферромагнитного резонанса и магнитного импеданса) однослойных и многослойных пленочных структур приготовленных в одном технологическом цикле были проведены для пленок пермаллоя при варьировании состава и набора толщин пленок (в качестве буферного слоя выступал тантал), а также для многослойных пленок FeNi с прослойками меди на подложках из стекла и из циклоолефинового сополимера. Магнитный импеданс и ферромагнитный резонанс – высокочастотные магнитные явления, имеющие между собой много общего, т.к. оба они связаны с таким параметром, как динамическая магнитная проницаемость. Одно время в литературе даже велась сравнительная дискуссия об их эквивалентности и возможности предсказывать ГМИ характеристики магнитомягких материалов на основании измерений ФМР [16]. В разделе было представлено исследование пленок Fe_xNi_{100-x} , где $x = 19, 17, 15, 13, 12, 11 \%$, интересных с точки зрения отклонения величины константы магнитострикции от

нуля, а значит увеличения магнитострикционных свойств. Сравнение концентрационных зависимостей для статических $4\pi M_s$ и динамических значений намагниченности $4\pi M_{eff}$ позволило выбрать узкий интервал около состава Fe15Ni85, как интересный для разработки специализированных датчиков давления. Тожественность магнитных параметров свидетельствовала об отсутствии перпендикулярной анизотропии в образцах с содержанием железа вблизи 19 % (с нулевой константой магнитострикции). В образце Fe₁₂Ni₈₈

эффективная намагниченность становилась меньше величины $4\pi M_s$, что предполагает дополнительный вклад компоненты перпендикулярной анизотропии. Убывающей являлась зависимость максимума ГМИ отношения с отклонением с уменьшением содержания Fe, где наибольшее значение соответствовало материалу с самой низкой коэрцитивной силой и самой высокой намагниченностью $x = 19$ %, однако даже для структуры на основе сплава Fe11Ni89 чувствительность $\Delta Z/Z$ составила 2 %/Э: величина, которая вполне приемлема для многих технических приложений.

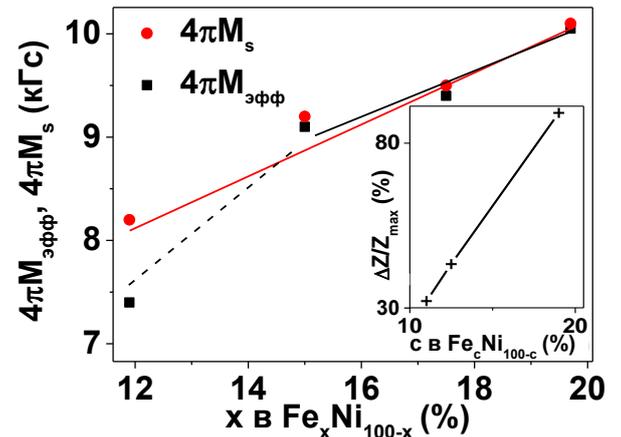


Рисунок 2 – Сравнение концентрационных зависимостей статических $4\pi M_s$ и динамических $4\pi M_{eff}$ значений намагниченности.

В заключительном разделе третьей главы магнитные свойства и температурная зависимость магнитоимпедансного эффекта в интервале температур от 25 до 50°C были получены для многослойных тонкопленочных элементов на основе пермаллоя. Наблюдалось незначительное снижение намагниченности насыщения с ростом температуры и рост электросопротивления на постоянном токе (Таблица 1).

Таблица 1 – Намагниченность насыщения M_s , сопротивление на постоянном токе R_{DC} , $\Delta Z/Z$ и $\Delta R/R$ в интервале температур. $\Delta Z/Z$ и $\Delta R/R$ взяты в поле рабочей точки $H = 4,7$ Э при частоте 80 МГц

T (°C)	M_s (Гс·см ³)	R_{DC} (Ом)	$\Delta Z/Z$ (%)	$\Delta R/R$ (%)
25	867	1	26	29
35	864	1,010	28	31
45	860	1,014	33	34
50	858	1,015	36	36

Тогда как максимальное МИ отношение импеданса $\Delta Z/Z_{max}$ при увеличении температуры с 25°C до 50°C для элемента $[\text{FeNi}(100 \text{ нм})/\text{Cu}(3 \text{ нм})]_5/\text{Cu}(500 \text{ нм})/[\text{FeNi}(100 \text{ нм})/\text{Cu}(3 \text{ нм})]_5$ увеличивалось на 18 % на частоте 80 МГц. Элементы с неравной толщиной слоев над и под центральным слоем меди показывали значительно меньшую величину самого эффекта и его чувствительности к внешнему полю и к температуре ввиду меньшей величины скин-слоя в сравнении с толщиной магнитного слоя. Было выдвинуто предположение, что наличие немагнитных прослоек может приводить к некоторому обратимому выравниванию внутренних напряжений в многослойной структуре при повышении температуры и опосредованному влиянию на динамическую магнитную проницаемость магнитных слоев структуры.

В четвертой главе впервые показана возможность протекания и установлены особенности кинетики процесса конденсации углерода на поверхности пленок Fe и FeNi при выдержке в ароматических сольвентах (метилбензоле) при комнатной температуре. Особенности формирования дефектного покрытия исследовались как при помощи атомно-силового и сканирующего микроскопа, так и таких методов исследования состава и структуры, как энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, термогравиметрия. Было установлено, что углерод становился преобладающим элементом на поверхности образцов менее, чем через 3 месяца модификации в метилбензоле при комнатной температуре. Уже после 2 недель модификации в метилбензоле содержание углерода на поверхности превышало 30 % (Рисунок 4 (а)).

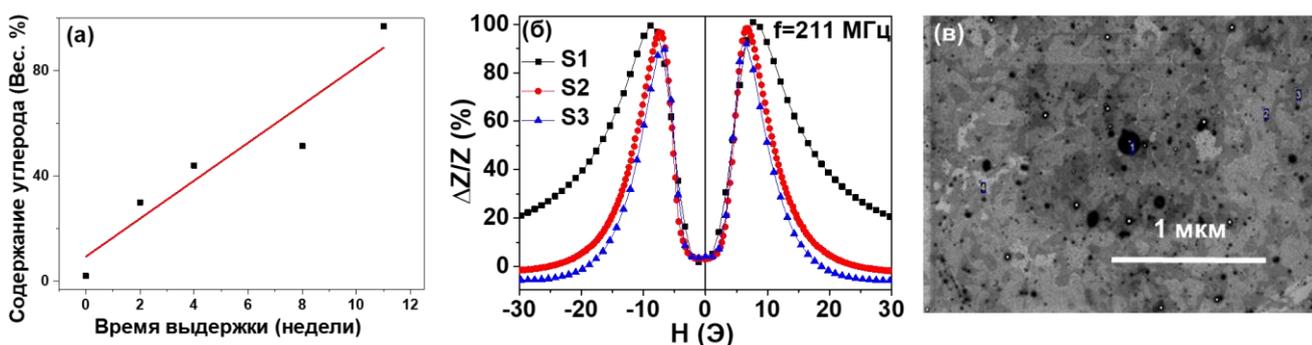


Рисунок 4 – Концентрационная зависимость количества углерода на поверхности для пленок FeNi, прошедших модификацию поверхности в метилбензоле (а). Полевая зависимость ГМИ отношения импеданса для элемента $[\text{Cu}(3)/\text{FeNi}(100)]_5/\text{Cu}(500)/[\text{FeNi}(100)/\text{Cu}(3)]_5$ без выдержки (черная кривая) и после выдержки в метилбензоле в течение 14 дней (красная кривая) и 52 дней (синяя кривая) (б). Изображение с растрового электронного микроскопа

поверхности пленки FeNi толщиной 100 нм после (б) 6-месячной модификации поверхности в метилбензоле при комнатной температуре.

Для выявления роли кислорода в процессе формирования покрытия был реализован особый протокол напыления образцов при последующим их перенесении в метилбензол в атмосфере аргона (без контакта с воздухом). По результатам исследований на тонких пленках и на наночастицах профессором А. П. Сафроновым было предложено, что осажденный таким образом слой углерода, как дефектная сеть из ароматических бензольных колец, формируется при окислении по методу Шолла.

Была установлена возможность изменения ГМИ параметров многослойных элементов после протекания процесса низкотемпературной конденсации углерода на их поверхности и предложен вероятный механизм влияния такой обработки поверхности (снижение дисперсии локальных осей магнитной анизотропии и однородного замыкания магнитного потока пленочных наноструктур), которая приводила к увеличению областей с высокой чувствительностью ГМИ-элемента по отношению к внешнему магнитному полю (Рисунок 4 (б)).

В главе пять предложены, получены и исследованы прямоугольные пленочные элементы на основе пермаллоя с высоким магнитоимпедансным эффектом. Установлены особенности магнитоимпедансного эффекта многослойных элементов с различным количеством магнитных слоев в условиях небольших статических нагрузок (до 40 Па), соответствующих работе детекторов давления. Сравнительный анализ структур на полимерных и стеклянных подложках показал, что чувствительность ГМИ отношения полного импеданса к внешнему давлению составила 6 %/Па в случае структуры на полимерной основе. Для структуры на подложке из стекла была достигнута бóльшая чувствительность $S(\Delta Z/Z) = 12$ %/Па (Рисунок 5 (а)). Увеличение импеданса пленочных элементов трактовалось с точки зрения изменения вклада магнитоупругой энергии.

Разработан прототип магнитоимпедансного биосенсора с прямоугольным чувствительным элементом на основе пермаллоя. Анализ ГМИ откликов, измеренных с использованием слоя геля или феррогеля, имитирующего естественную ткань, позволил оценить величину полей рассеяния магнитных наночастиц оксида железа, входящих в состав феррогеля. Была достигнута максимальная чувствительность обнаружения магнитных наночастиц 1,3 % $\Delta Z/Z$ на массовый процент концентрации магнитных наночастиц оксида железа (Рисунок 5 (б, в)), позволила понять основы чувствительности прототипа

биодетектора. Результаты модельных расчетов для электродинамической модели, предложенной и разработанной соавторами-теоретиками на основе решения линеаризованных уравнений Максвелла и уравнения Ландау-Лифшица для динамики намагниченности, качественно описывали наблюдавшиеся в эксперименте (Рисунок 5 (г)).

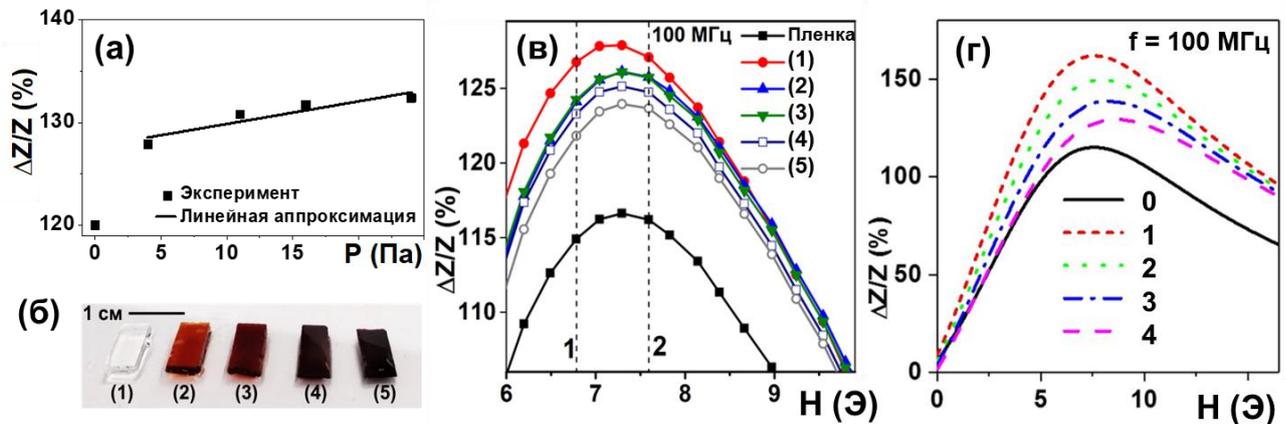


Рисунок 5 – ГМИ отношение импеданса в зависимости от величины внешнего давления (а). Синтезированные покрытия из геля и феррогелей с концентрацией наночастиц оксида железа (1) – 0 масс. %, (2) – 0,6 масс. %, (3) – 0,9 масс. %, (4) – 1,7 масс. %, (5) – 2,2 масс. % (б) и экспериментальная полевая зависимость ГМИ отношения в их присутствии (в). Рассчитанная полевая зависимость ГМИ отношения при различных значениях эффективного поля рассеяния H_p : 0 – пленка без геля или феррогеля; 1 – $H_p=0$; 2 – $H_p=0,25$ Э; 3 – $H_p=0,5$ Э; 4 – $H_p=0,75$ Э (г).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены основные закономерности формирования гистерезисных свойств и магнитного импеданса (МИ) в наноструктурированных магнитных элементах типа $[\text{Cu}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}]_n/\text{Cu}/[\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Cu}]_m$ и $[\text{Ti}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}]_n/\text{Cu}/[\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Ti}]_m$ в форме полосок, осажденных на стеклянные и гибкие полимерные подложки, с варьируемыми толщиной и количеством магнитных субслоев. Показано, что:

а) в элементах с $n=m$ (симметричная структура) наибольшие значения МИ ($\Delta Z/Z_{\max}$ около 200 %) реализуются в интервале толщин субслоев $50 \div 100$ нм;

б) при $m < n$ (несимметричная структура) имеет место монотонное понижение $\Delta Z/Z_{\max}$ с уменьшением m , ввиду изменения особенностей магнитостатического взаимодействия и угла отклонения оси анизотропии;

с) симметричная структура и несимметричная структура, в которой $m=n-1$, могут иметь близкие значения максимальной чувствительности МИ при

соответствующем подборе внешнего магнитного поля и частоты возбуждающего тока.

2. Показано, что уменьшение содержания Fe в магнитных субслоях Fe-Ni от 19 до 11 ат.% ведёт к снижению $\Delta Z/Z_{\max}$ элементов с симметричной структурой на подложках из стекла и циклоолефинового сополимера, что является следствием уменьшением динамической магнитной проницаемости и коррелирует с изменением поля ферромагнитного резонанса.

3. Найдено, что с ростом температуры в интервале 25-50 °С в многослойных элементах наблюдается рост $\Delta Z/Z_{\max}$, который связан с релаксацией внутренних упругих напряжений и соответствующим ростом динамической магнитной проницаемости. В большей мере эффект термического воздействия выражен для элементов на стекле с симметричной структурой.

4. Впервые показана возможность протекания процесса низкотемпературной конденсации углерода и создания углеродного покрытия на поверхности пленочных элементов на основе пермаллоя и железа. Установлены особенности кинетики образования углеродного покрытия на поверхности плёнок указанных металлов. Найдено, что такая модификация расширяет область высокой МИ-чувствительности (рабочий интервал) элементов.

5. Дано качественное и количественное описание особенностей МИ в наструктурированных элементах, подвергнутых статическому механическому нагружению. В частности, показано, что при эффективном давлении на поверхность до 40 Па уменьшение величины $\Delta Z/Z_{\max}$ достигает 6 %/Па для элементов на полимерной подложке и 12 %/Па для элементов на стеклянной подложке. Установленная закономерность связывается с изменением магнитоупругого вклада в магнитную анизотропию элементов и рассматривается в контексте применения МИ-элементов в датчиках давления.

6. Продемонстрирована возможность использования наноструктурированных пленочных элементов типа $[\text{Cu/FeNi}]_n/\text{Cu}/[\text{FeNi/Cu}]_n$ в качестве МИ-биосенсоров. На основе экспериментов с гелем и феррогелем, имитирующими живую ткань, оценена величина полей рассеяния магнитных наночастиц оксида железа, входящих в состав феррогеля, и определена максимальная чувствительность прототипа биодатчика – 1,3 % $\Delta Z/Z_{\max}$ на массовый процент концентрации наночастиц.

Рекомендации

Предложенный в рамках данной работы подход к созданию многослойных элементов на основе пермаллоя при осаждении на гибкие или жесткие основы и сравнительный анализ особенностей структуры, статических магнитных свойств

и магнитоимпедансного эффекта обеспечивают возможность их использования для создания высокочувствительных детекторов слабых магнитных полей и получения функциональных сред с заданными свойствами при эффективном использовании анизотропии формы и магнитостатического взаимодействия.

Исследованный процесс низкотемпературной конденсации углерода на поверхности пленок железа и пермаллоя можно рассматривать как простой с инструментальной точки зрения метод совершенствования магнитоимпедансных характеристик многослойных пленочных элементов на основе 3d металлов.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Следует отметить несколько возможных направлений дальнейших исследований, затрагивающих и фундаментальные, и прикладные аспекты. Представляется перспективным исследование магнитоимпедансных свойств элементов в более узком интервале толщин каждого магнитного слоя, включая структуры с неравными толщинами магнитных слоев. Высокие магнитоимпедансные свойства, полученные для структур с неравным количеством магнитных слоев над и под высокопроводящим, могут быть использованы для дальнейшего расширения рабочего диапазона датчиков слабых магнитных полей.

Полезным может быть создание модели пленочных структур методом конечных элементов, которая бы подтверждала результаты аналитической модели. Дополнительное исследование структурных и магнитных свойств необходимо в случае многослойных структур, полученных на подложках из полимера, для уточнения как магнитострикционного вклада, так и особенностей динамического перемагничивания материала на полимерной основе.

Особый интерес представляет процесс низкотемпературной конденсации углерода на поверхностях 3d-металлов. Уточнения требуют не только особенности кинетики, но и особенности его протекания на поверхностях наноструктур сложной геометрии, которые встречаются в современных устройствах спинтроники и наноэлектроники.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:

1. Chlenova, A. A. Detecting the total stray fields of ferrogel nanoparticles using a prototype magnetoimpedance sensor: modeling and experiment / A. A. Chlenova, N. A. Buznikov, A. P. Safronov, E. V. Golubeva, V. N. Lepalovskii, G. Yu Melnikov, G.

- V. Kurlyandskaya // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2019. – T.83, Вып. 7. – С. 906-908; 0,19 п.л./0,03 п.л. (Scopus).
2. Chlenova, A. A. $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$ thin film systems with slight deviations from zero magnetostriction compositions: focus on pressure sensor applications / A. A. Chlenova, I. P. Novoselova, R. Salikhov, M. Farle, V. N. Lepalovskij, G. J. Totoricaguena, G. V. Kurlyandskaya // Key Engineering Materials. – 2019. – Vol. 826. – P. 11-18; 0,50 п.л./0,07 п.л. (Scopus).
 3. Chlenova, A. A. Demagnetization processes in multilayered permalloy-based film structures / A. A. Chlenova, D. S. Neznakhin, G. Yu. Melnikov, V. N. Lepalovskij, V. O. Vas'kovskiy, G. V. Kurlyandskaya // Inorganic Materials: Applied Research. – 2019. – Vol. 11, I. 4. – С. 838-843; 0,38 п.л./0,06 п.л. (Scopus).
 4. Chlenova, A. A. Magnetic properties of thin films $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$ ($x = 20, 17, 15\%$): focus on high frequency sensor applications / A. A. Chlenova, E. V. Golubeva, Yu P. Novoselova, R. I. Salikhov, V. N. Lepalovskii, G. V. Kurlyandskaya // Inorganic Materials: Applied Research. – 2019. – Vol. 11, I. 1. – P. 223-231; 0,56 п.л./0,09 п.л. (Scopus).
 5. Chlenova, A. A. Peculiarities of the giant magnetoimpedance in permalloy-based film structures in the important temperature range for practical applications / A. A. Chlenova, A. A. Moiseev, M. S. Derevyanko, A. V. Semirov, V. N. Lepalovskij, G. V. Kurlyandskaya // Technical Physics. – 2018. – Vol. 63. – P. 67-72; 0,38 п.л./0,06 п.л. (Scopus, Web of Science).
 6. Buznikov, N. A. Modelling of magnetoimpedance response of thin film sensitive element in the presence of ferrogel: Next step toward development of biosensor for in-tissue embedded magnetic nanoparticles detection / N. A. Buznikov, A. P. Safronov, I. Orue, E. V. Golubeva, V. N. Lepalovskij, A. V. Svalov, A. A. Chlenova, G. V. Kurlyandskaya // Biosensors and Bioelectronics. – 2018. – Vol. 117. – P. 366-372; 0,44 п.л./0,05 п.л. (Scopus, Web of Science).
 7. Kurlyandskaya, G. V. Nanostructured materials for magnetic biosensing / G.V. Kurlyandskaya, D. S. Portnov, I. V. Beketov, A. Larrañaga, A. P. Safronov, I. Orued, A. I. Medvedev, A. A. Chlenova // Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects. – 2017. – Vol. 1861, I. 6. – P. 1494-1506; 0,81 п.л./0,10 п.л. (Scopus, Web of Science).
 8. Chlenova, A. A. Magnetoimpedance effect in multilayered permalloy structure with different magnetostriction: Small-pressure sensor / A. A. Chlenova, V. N. Lepalovsky, V. O. Vas'kovskiy, A. V. Svalov, G. V. Kurlyandskaya // American institute of physics: Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1886. – P. 020005 (6 pp.); 0,38 п.л./0,08 п.л. (Scopus, Web of Science).

9. Chlenova, A. A. Investigation of the special features of low-temperature carbon coating deposition on the permalloy film surface under normal conditions during interaction with aromatic solvents / A. A. Chlenova, A. V. Svalov, S. N. Shevyrtalov, K. A. Chichai, V. V. Rodionova, G. V. Kurlyandskaya // Russian Physics Journal. – 2017. – Vol. 60, № 1. – С. 157-162; 0,38 п.л./0,06 п.л. (Scopus, Web of Science).
10. Chlenova, A. A. Magnetoimpedance effect in the FeNi/Ti-based multilayered structure: A pressure sensor prototype / A. A. Chlenova, G. Yu. Melnikov, A. V. Svalov, G. V. Kurlyandskaya // American Institute of Physics: Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1767. – P. 020004 (5 pp.); 0,31 п.л./0,08 п.л. (Scopus, Web of Science).
11. Chlenova, A. A. Magnetoimpedance of FeNi-based asymmetric sensitive elements / A. A. Chlenova, A. V. Svalov, G. V. Kurlyandskaya, S. O. Volchkov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – Vol. 415. – P. 87-90; 0,25 п.л./0,06 п.л. (Scopus, Web of Science).
12. Kurlyandskaya, G. V. FeNi-based flat magnetoimpedance nanostructures with open magnetic flux: New topological approaches / G. V. Kurlyandskaya, A. A. Chlenova, E. Fernandez, K. J. Lodewijk // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2015. – Vol. 383. – P. 220-225; 0,38 п.л./0,09 п.л. (Scopus, Web of Science).
13. Chlenova, A. A. Surface modification of thin iron films in aromatic solvents at ambient conditions / A. A. Chlenova, S. Fernandez Armas, G. V. Kurlyandskaya, A. P. Safronov, A. Larrañaga, I. Zalbidea Arechaga, V. N. Lepalovskij // Solid State Phenomena. – 2015. – Vol. 233-234. – P. 657-661; 0,31 п.л./0,04 п.л. (Scopus).
14. Kurlyandskaya, G. V. Nanostructured magnetoimpedance multilayers with different thickness of FeNi components / G. V. Kurlyandskaya, A. A. Chlenova, S. O. Volchkov, V. N. Lepalovskij, R. El Kammouni // Solid State Phenomena. – 2014. – Vol. 215. – P. 342-347; 0,31 п.л./0,06 п.л. (Scopus, Web of Science).
15. Safronov, A. P. Carbon deposition from aromatic solvents onto active intact 3d metal surface at ambient conditions / A. P. Safronov, G. V. Kurlyandskaya, A. A. Chlenova, M. V. Kuznetsov, D. N. Bazhin, I. V. Beketov, M. B. Sanchez-Illaruya, A. Martinez-Amesti // Langmuir. – 2014. – Vol. 30. – P. 3243-3253; 0,69 п.л./0,09 п.л. (Scopus, Web of Science).

Другие публикации:

1. Голубева, Е. В. Феррогели – модельная система для создания тонкопленочного чувствительного элемента магнитоимпедансного биосенсора / Е. В. Голубева, А. А. Членова, А. П. Сафронов, В. Н. Лепаловский, Г. В. Курляндская // Актуальные вопросы современной медицинской науки и

здравоохранения: Материалы III Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов [электронный ресурс], Екатеринбург, 3-5 апреля 2018 г. – Екатеринбург: Изд-во УГМУ, 2018. – Том 1. – С. 195-199; 0,31 п.л./0,06 п.л.

2. Волчков, С. О. Модельное описание динамического поведения феррожидкости в канале: детектирование с помощью магнитноимпедансного датчика слабых полей / С. О. Волчков, А. А. Членова, Г. В. Курляндская // Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения: Материалы III Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов [электронный ресурс], Екатеринбург, 3-5 апреля 2018 г. – Екатеринбург: Изд-во УГМУ, 2018. – Том 1. – С. 190-194; 0,31 п.л./0,10 п.л.

3. Членова, А. А. Асимметричные многослойные пленочные элементы для магнитного детектирования / А. А. Членова, Г. В. Курляндская, С. О. Волчков, А. В. Свалов // Сварка и диагностика 2015: сборник докладов международного форума. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 373-378; 0,38 п.л./0,09 п.л.

4. Членова, А. А. Гигантский магнитный импеданс многослойных пленочных структур с особенностями симметрии / А. А. Членова, Г. В. Курляндская, С. О. Волчков, В. Н. Лепаловский, А. В. Свалов // Сварка и диагностика 2014: сборник докладов международного форума. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 208-213; 0,38 п.л./0,08 п.л.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bozorth, R. M. The Permalloy Problem / R. M. Bozorth // Review of Modern Physics. – 1953. – Vol. 25. – P. 42-48.

2. Bonin, R. Dependence of magnetization dynamics on magnetostriction in NiFe alloys / R. Bonin, M. L. Schneider, T. J. Silva, J. P. Nibarger // Journal of Applied Physics. – 2005. – Vol. 98. – P. 123904 (8 pp.).

3. Harrison, E. P. Electrical properties of wires of high permeability / E. P. Harrison, G. L. Turney, H. Rowe // Nature. – 1935. – № 135. – P. 961.

4. Harrison, E.P. The electrical properties of high permeability wires carrying alternating current / E. P. Harrison, G. L. Turney, H. Rowe, H. Gollop // Proceedings of the Royal Society. – 1936. – Vol. 157, № 891. – P.451-479.

5. Hamilton, J. C. Carbon segregation to single crystal surfaces of Pt, Pd and Co / J. C. Hamilton, J. M. Blakely // Surface Science. – 1980. – Vol. 91, I. 1. – P. 199-217.

6. Makhotkin V.E., Shurukhin B.P., Lopatin V.A., Marchukov P. Yu., Levin Yu. K. Magnetic field sensors based on amorphous ribbons// Sensors and Actuators A.- 1991.- V.27.- P.759-762.

7. Датчик магнитного поля // Патент России № 2079147. 1997. / Безруков А. В., Левин Ю. К., Лопатин В. А., Махоткин В. Е., Шурухин Б. П.
8. Beach, R.S. Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire / R. S. Beach, A. E. Berkowitz // Applied Physics Letters. – 1994. – Vol. 64. – P.3652-3654.
9. Panina, L.V. Giant magneto-impedance and magneto-inductive effects in amorphous alloys // L. V. Panina, K. Mohri, K. Bushida, M. Noda // Journal of Applied Physics. – 1994. – Vol. 76. – P. 6198-6203.
10. Machado, F. L. A. Giant ac magnetoresistance in the soft ferromagnet Co_{70.4}Fe_{4.6}Si₁₅B₁₀ / Machado F.L.A., da Silva B.L., Rezende S.M., Martins C.S. // Journal of Applied Physics. – 1994. – Vol. 75, I. 10. – P.6563-6565.
11. Rao, K. V. Very large magneto-impedance in amorphous soft ferromagnetic wires / K. V. Rao, F. B. Humphrey, J. L. Costa-Krämer // Journal of Applied Physics. – 1994. – Vol.76. – P. 6204-6208.
12. Buznikov, N. A. Modelling of magnetoimpedance response of thin film sensitive element in the presence of ferrogel: Next step toward development of biosensor for in-tissue embedded magnetic nanoparticles detection / N. A. Buznikov, A. P. Safronov, I. Orue, E. V. Golubeva, V. N. Lepalovskij, A. V. Svalov, A. A. Chlenova, G. V. Kurlyandskaya // Biosensors and Bioelectronics. – 2018. – Vol. 117. – P. 366-372.
13. Kurlyandskaya, G. V. Domain structure and magnetization process of a giant magnetoimpedance geometry FeNi/Cu/FeNi(Cu)FeNi/Cu/FeNi sensitive element / G. V. Kurlyandskaya, L. Elbaile, F. Alves, B. Ahamada, R. Barrue, A. V. Svalov, V. O. Vas'kovskiy // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2004. – Vol. 16. – P. 6561-6568.
14. Антонов, А. С. Гигантский магнитоимпеданс в аморфных и нанокристаллических мультислоях / А. С. Антонов, С. Н. Гадецкий, А. Б. Грановский, А. Л. Дьячков, В. П. Парамонов, Н. С. Перов, А. Ф. Прокошин, Н. А. Усов, А. Н. Лагарьков // Физика металлов и металловедение. – 1997. – Т. 83, № 6. – С. 61-71.
15. Fernandez, E. GMI in nanostructured FeNi/Ti multilayers with different thicknesses of the magnetic layers / E. Fernandez, A.V. Svalov, G. V. Kurlyandskaya, A. Garcia-Arribas, IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. – Vol. 49, I. 1. – P. 18-21.
16. Yelon, A. Calculations of giant magnetoimpedance and of ferromagnetic resonance response are rigorously equivalent / A. Yelon, D. Menard, M. Britel, P. Ciureanu // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 69, I. 20. – P. 3084-3085.