

На правах рукописи

Курляндская Галина Владимировна

ГИГАНТСКИЙ МАГНИТНЫЙ ИМПЕДАНС И ЕГО
СВЯЗЬ С МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ И
ПРОЦЕССАМИ НАМАГНИЧИВАНИЯ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУР

(01.04.11 – физика магнитных явлений)

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени доктора физико-математических наук

Екатеринбург - 2007

Работа выполнена в Уральском государственном университете им.А.М.Горького на кафедре физики магнитных явлений и в отделе магнетизма твёрдых тел НИИ физики и прикладной математики.

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор Васьковский Владимир Олегович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, Важенин Владимир Александрович, Уральский государственный университет им.А.М.Горького

доктор физико-математических наук, профессор Грановский Александр Борисович Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

доктор физико-математических наук, Ринкевич Анатолий Брониславович Институт физики металлов УрО РАН

Ведущая организация: Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН.

Защита состоится _____ октября 2007 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 при Уральском государственном университете им.А.М.Горького по адресу: 620083, Екатеринбург, пр.Ленина, 51, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уральского государственного университета им. А.М.Горького.

Автореферат разослан _____ сентября 2007 года

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук Н.В.Кудреватых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Изменение комплексного сопротивления ферромагнитного проводника $Z(f)$ при протекании через него переменного тока высокой частоты f в условиях приложения внешнего постоянного поля (H) называется явлением магнитоимпеданса. Исследование ферромагнитных структур с высокой чувствительностью гигантского магнитоимпедансного эффекта (ГМИ) к магнитному полю являются одним из динамично развивающихся направлений в современной физике конденсированного состояния вещества и физике магнитных материалов [1-4].

Явление магнитного импеданса (МИ) было открыто около 70 лет назад в работах Е.П. Харрисона с соавторами, выполненных на железо-никелевых проволоках [5-6]. Термин “магнитный импеданс” не использовался ни в этих первых публикациях, ни в первых расчетах проведенных позднее [7]. В 1991 году В.Е. Махоткин с соавторами создали датчик малых магнитных полей с чувствительным элементом в виде аморфной ленты FeCoSiB, который работал на принципе изменения импеданса под воздействием внешнего магнитного поля [8]. Авторы этой работы, посвященной созданию конкретного прототипа датчика слабых полей, не обсуждали причины возникновения эффекта и не использовали термин “магнитный импеданс”. Не был этот термин введен и в ранних работах группы К.Мори (в них говорилось о магнетоиндуктивном эффекте), ставших предвестниками открытия заново явления *гигантского* магнитоимпеданса в 1994 году [9-10].

Хотя уже первые эксперименты, в которых наблюдалось изменение импеданса пермаллоевых проволок при приложении внешнего поля, были объяснены на основе классического скин-эффекта и зависимости глубины скин-слоя от величины эффективной магнитной проницаемости, Е.П. Харрисон с соавторами так и не добились повторяемости результатов [6]. Позднее появились более совершенные технологии производства материалов с высокой магнитной проницаемостью [11-14], которые обеспечили повторяемость результатов ГМИ исследований и возможность контролируемой разработки ГМИ материалов. Введение термина “*гигантский* магнитоимпедансный эффект”

объясняется не только желанием привлечь внимание разработчиков детекторов слабых полей к явлению МИ, но и подчеркнуть, что оно присуще всем магнитным проводникам (хотя эффект становится заметным при определенных условиях, накладываемых как на материал, так и на способ возбуждения). Принято говорить о ГМИ, когда величина эффекта превышает 100%.

Выбор материалов и выяснение условий, при которых МИ эффект проявляется как гигантский, составляло задачи физики магнитных явлений и прикладной электродинамики на протяжении последних более чем 10 лет. Даная диссертационная работа посвящена сравнительному исследованию связи гигантского магнитного импеданса ферромагнитных структур на основе 3d-металлов с магнитной анизотропией и процессами намагничивания. Основное внимание уделяется структурам с высокой чувствительностью импеданса к магнитному полю при разных режимах возбуждения, что и определяет научную и практическую значимость полученных результатов.

Многие традиционные магнитомягкие материалы (аморфные и нанокристаллические ленты, пленочные структуры, композиционные проволоки проводник/ферромагнетик) характеризуются низким МИ эффектом. В настоящей работе показано, что путём варьирования магнитной анизотропии и управления характером процессов намагничивания можно получить высокую магнитную проницаемость и высокую чувствительность ГМИ к внешнему полю. В искусственно созданных неоднородных ферромагнитных структурах обнаружены особые свойства, обусловленные наличием спин-переориентационных фазовых переходов при перемагничивании как в линейном, так и в нелинейном режимах. Как сама тема работы, так и ориентированность ее на поиск путей использования полученных фундаментальных знаний на практике относятся к числу актуальных физических проблем, решаемых сегодня в таких областях знания, как нанонаука и нанотехнологии.

Цель диссертационной работы - создание целостной физической картины взаимосвязи магнитных и электрических свойств с параметрами гигантского магнитного импеданса для широкого круга ферромагнитных структур на основе 3d-металлов с

высокой чувствительностью импеданса к магнитному полю при разных режимах возбуждения.

Основные задачи исследования

1. Сравнительное исследование процессов намагничивания, магнитосопротивления, линейного ГМИ, резонансного и нерезонансного микроволнового поглощения в аморфных и нанокристаллических планарных структурах в виде лент на основе кобальта или на основе железа с разной величиной магнитострикции, а также в тонких пленках и многослойных структурах типа ферромагнетик/проводник/ ферромагнетик (Ф/П/Ф) как в планарной геометрии, так и в геометрии трубок, осажденных на немагнитную проводящую цилиндрическую основу.

2. Исследование ГМИ линейного и нелинейного типов в случае геометрии магнитных трубок (например, для электроосажденных проволок CuBe/FeNi и CuBe/FeCoNi и аморфных лент на основе кобальта) при использовании токов разной интенсивности. Выработка методологии исследований и уточнение терминологии в области нелинейного ГМИ. Повышение чувствительности нелинейного ГМИ.

3. Анализ процессов динамического намагничивания и гистерезиса импеданса в объектах с ГМИ. Разработка на этой основе физических принципов оптимизации чувствительности эффекта ГМИ и методик достижения высокой чувствительности в прототипах специализированных датчиков.

4. Оценка адекватности существующих и нахождение новых способов феноменологического описания процессов динамического перемагничивания в ГМИ структурах с резким изменением линейного и нелинейного типов импеданса в узких интервалах магнитного поля.

5. Создание физических основ биодетектирования с использованием эффекта ГМИ: физические модели ГМИ-биодатчиков работающих на принципе детектирования магнитных маркеров либо без магнитных маркеров с использованием особенностей поверхностной анизотропии; принципы аттестации магнитных наночастиц, используемых в качестве магнитных маркеров в ГМИ биодатчиках.

Новые научные результаты, выносимые на защиту

1. Определена связь между магнитной анизотропией, характером процессов квазистатического перемагничивания и магнитным импедансом в композиционно однородных быстрозакалённых лентах, полученных в присутствии магнитного поля. Показана возможность достижения высоких значений магнитного импеданса и чувствительности ГМИ в материалах, находящихся в неравновесном структурном состоянии.

2. Для нанокристаллических сплавов FeCuNbSiB установлены закономерности формирования магнитной анизотропии, наведенной термомагнитной обработкой, либо одно- или двухступенчатым отжигом под нагрузкой. На основе анализа особенностей процессов намагничивания, магнитного импеданса и гистерезиса магнитного импеданса впервые показано, что наведённая анизотропия в таких объектах имеет сложный характер и описываться не менее чем тремя константами анизотропии.

3. Для материалов с ГМИ установлены основные закономерности термомагнитной обработки (ТМО) в постоянном и переменном магнитных полях. На основе комплексного исследования особенностей магнитной анизотропии, процессов намагничивания, магнитной доменной структуры и магнитного импеданса планарных ферромагнитных структур и структур с геометрией трубок показано, что отжиг в переменном поле обеспечивает наиболее однородное магнитное состояние объектов и высокий эффект ГМИ. Найдены способы управления эффективной магнитной анизотропией, величиной и гистерезисом магнитного импеданса, определены оптимальные условия для получения большой чувствительности ГМИ в определенных полевых интервалах.

4. На примере плёнок пермаллоя показано, что в низкочастотной области токов возбуждения эффект анизотропии магнитосопротивления приводит к появлению сильного гистерезиса полного электросопротивления. Для высокочастотных токов вклад анизотропии магнитосопротивления в импеданс минимален. Показано, что явление релаксации доменных границ может существенно влиять на величину эффекта МИ, приводя к его резкому снижению при больших временах релаксации.

5. Впервые определены закономерности перестройки доменной структуры в процессе квазистатического перемагничивания плёночных сэндвичей FeNi/Cu/FeNi/Cu/FeNi/Cu/FeNi с гигантским магнитным импедансом. Установлено, что в таких сэндвичах незначительное отклонение внешнего поля от направления протекания тока, перпендикулярного оси лёгкого намагничивания пленочной наноструктуры, не вызывает существенного изменения гистерезиса ГМИ.

6. В цилиндрических структурах FeNiCo/CuBe путём термомагнитной обработки впервые получено состояние магнитной бистабильности. Найдено, что величина поля старта зависит от состава, особенностей термомагнитных воздействий и геометрических параметров структуры. Впервые определены закономерности и модельно описаны особенности микроволнового поглощения для FeNiCo/CuBe и FeNi/FeNiCo/CuBe проволок с разной эффективной анизотропией.

7. Установлены основные закономерности нелинейного магнитного импеданса в цилиндрических неоднородных структурах типа ферромагнетик/проводник. Обнаружены сильная зависимость величины эффекта ГМИ от амплитуды (в интервале амплитуд от 5 до 60 мА) и частоты переменного тока (в интервале частот от 0.3 до 10 МГц). Показано, что наблюдаемые особенности нелинейного МИ связаны с повышенной чувствительностью магнитной системы к циркулярному магнитному полю вблизи спин-переориентационного перехода. Получены очень высокие величины магнитного импеданса (до 1200%) и чувствительности магнитного импеданса (до 4500%/Э).

8. Адекватность выработанной картины магнитного импеданса продемонстрирована на ряде новых физико-технических решений: показана возможность миниатюризации ГМИ-датчика малого поля при использовании чувствительного элемента в форме тороида; обнаружена резкая зависимость формы второй гармоники ГМИ от угла приложения внешнего поля, которая позволяет сконструировать детектор ориентации; предложена новая конструкция датчика поля на основе двух чувствительных элементов, обладающего откликом, не зависящим от ориентации внешнего поля в интервале углов от 0 до 45°; предложена

концепция биодатчиков нового типа, основанная на использовании высокочувствительного эффекта ГМИ.

9. Предложены методики анализа и установлены закономерности поведения в магнитном поле магнитных суспензий, используемых в биомедицинских датчиках на основе ГМИ: разработаны статистические методики исследования особенностей распределения суспензии Dynabeads[®] M-450 на магнитных и слабомагнитных поверхностях разного типа; обнаружены и смоделированы элементы организации в системе суррпарамангнитных сфер Dynabeads M-480 при приложении внешнего магнитного поля; показана возможность использования явления микроволнового поглощения как эффективного способа оценки формы и способности к магнетоабсорбции наночастиц с низкой (Fe_3O_4) и с высокой ($\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$) величинами магнитокристаллической анизотропии.

Научная и практическая ценность результатов

Полученные в диссертационной работе результаты позволяют глубже трактовать известные явления магнетизма – наведённая магнитная анизотропия, доменная структура, процессы квазистатического и динамического перемагничивания – в их новом аспекте, а именно, в связи с явлением гигантского магнитного импеданса. Они служат основой для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований в области магнитных (с учетом гистерезисных явлений) и магнитотранспортных свойств как композиционно однородных, так и неоднородных ферромагнитных структур с различной геометрией при разных режимах электромагнитного возбуждения. На основе результатов проведённого научного исследования сформулирован ряд физико-технических принципов построения и функционирования высокочувствительных датчиков магнитного поля, созданы, прошли успешное тестирование и получили положительную оценку в ведущих специализированных журналах макеты ряда конкретных датчиков.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы в период с 1990 по 2007 гг. были представлены более чем на 20 научных конференциях. За последние 5 лет они докладывались на следующих форумах: II Международной конференции Байкал: «Магнитные Материалы» (Сент. 2003, Иркутск, Россия); Workshop on Amorphous and Nanostructured Magnetic Materials (Sept. 2003, Iasi, Romania); 16th Soft Magnetic Materials Conference (Sept. 2003, Düsseldorf, Germany); 17th Soft Magnetic Materials Conference (Sept. 2006, Bratislava, Slovakia); 3^я Технической конференции «Физические свойства сплавов и металлов» (Октябрь 2005, Екатеринбург, Россия); EMSA-2004 5th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators (July 2004, Cafrdiff, England); Международном Симпозиуме по Магнетизму (Июнь 2005, Москва, Россия); EMSA-2006 6th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators (July 2006, Bilbao, Spain); The Eights World Congress on Biosensors (May 2004, Granada, Spain); The Ninths World Congress on Biosensors (May 2006, Toronto, Canada); MS&T05 Materials Science & Technology 2005 Conference and Exhibition (September 2005, Pittsburgh, USA); XXXVII Совещании Группы Электрохимии Испанского Королевского Химического Общества (May 2006, La Coruña, Spain); Школе-семинаре Новые Магнитные Материалы Микроэлектроники (2004, 2006, Москва, Россия).

Достоверность результатов проведенных исследований

Научные положения, выводы и рекомендации базируются на результатах экспериментов, достоверность которых обеспечивается использованием современных и апробированных экспериментальных методик, статистическим характером экспериментальных исследований, анализом погрешностей измерений, применением компьютерных технологий обработки результатов измерений. Применявшееся моделирование выполнено с помощью аттестованных программ путём поиска устойчивых решений. Результаты, представленные в диссертации, не имеют принципиальных расхождений с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными других исследователей, опубликованными в открытой печати. Публикации

автора по теме диссертации имеют высокий уровень цитирования другими исследователями.

Основные результаты, полученные лично автором

Автор диссертационной работы непосредственно участвовал в создании технологической базы и получении быстрозакаленных лент, тонких плёнок и многослойных плёночных структур, создании исследовательских установок для измерений МИ в аморфных и нанокристаллических лентах, композиционных проволоках и плёночных образцах. Им осуществлена постановка задач по исследованию наведенной магнитной анизотропии, магнитосопротивления, процессов намагничивания, магнитного импеданса и микроволнового поглощения. Все эксперименты, результаты которых приведены в диссертации, подготовлены и проведены при участии автора. Непосредственно автором или при его прямом участии дана интерпретация всех представленных экспериментальных результатов, предложены описанные в диссертации новые физические модели. В коллективных публикациях автору принадлежат защищаемые в диссертации положения и выводы. Тексты всех публикаций, в которых автор диссертации занимает первую позицию, написаны лично диссертантом, в остальных публикациях участие автора состоит в получении и обсуждении результатов.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук, 30 статей в зарубежных журналах и изданиях, в которых могут быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук. Кроме того, имеется 18 публикаций в рецензируемых научных журналах и изданиях (в основном за рубежом), не входящих в список ВАК и 2 статьи в электронном архиве Cornell University.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти основных разделов, общих выводов и приложения. Она содержит 340 страниц, включая 148 рисунков, 24 таблицы и список использованных источников из 250 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общий анализ литературы по ГМИ и приводится в качестве примеров лишь часть источников. Этот список существенно расширяется во вступлениях к соответствующим главам, уточняющих в каждом конкретном случае рассматриваемую проблематику. Он дополняется по ходу изложения оригинального материала и в части обсуждения результатов для сравнения их с данными других авторов. Во введении обосновывается актуальность направления исследований, формулируются основная цель, конкретные задачи работы и новые научные результаты, выносимые на защиту.

В первом разделе рассматриваются особенности процессов намагничивания, линейный ГМИ и нерезонансное микроволновое поглощение в аморфных и нанокристаллических лентах. В первых как экспериментальных, так и теоретических работах, описывавших импедансный эффект и ГМИ [1-3], использовали классический линейный режим и определяли импеданс как отношение падения напряжения к величине возбуждающего тока. Позднее был рассмотрен и ГМИ нелинейного типа [15], и на определенном этапе не существовало четкого разделения между этими разными процессами. По мнению автора данной диссертационной работы определение самого термина «импеданс» относится к явлению линейного отклика. Широко же распространенный термин «нелинейный импеданс» употребляется лишь для простоты или по традиции для описания отношения напряжение/ток [13]. О магнитоимпедансном эффекте первого типа (линейном МИ) и идет речь в разделах 1-3 этой работы.

В начале первого раздела даётся краткий обзор экспериментальных и теоретических результатов, относящихся к эффекту ГМИ в однородных ферромагнетиках. Описываются методики получения и аттестация образцов в виде аморфных лент и лент с нанокристаллической структурой. Особое внимание уделяется методам исследования магнитных свойств,

магнитострикции и магнитной анизотропии, наблюдения магнитной доменной структуры, измерения резистивных свойств, магнитного импеданса, резонансного и нерезонансного поглощения в микроволновом диапазоне. На Рис. 1 показаны типичные экспериментальные полевые зависимости ГМИ аморфной ленты на основе кобальта для нескольких частот возбуждающего тока f . Хорошо видно, что по мере увеличения f происходит трансформация кривой типа «одиночный пик» в кривую типа «двойной пик».

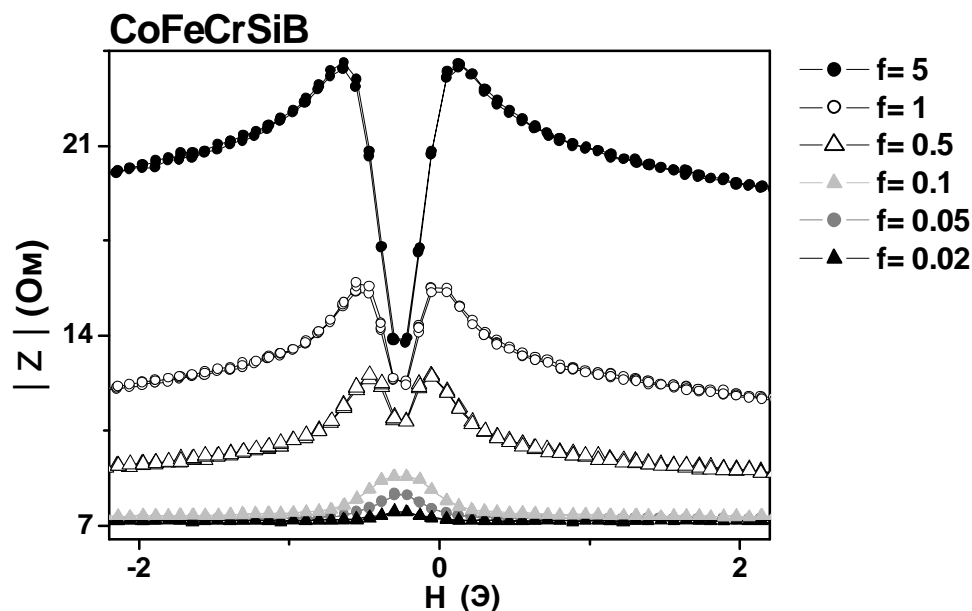


Рис. 1. Зависимости величины импеданса быстрозакаленной аморфной ленты от величины внешнего магнитного поля для токов разной частоты.. Амплитуда высокочастотного тока $I_{\text{rms}} = 15$ мА. Частоты указаны в МГц.

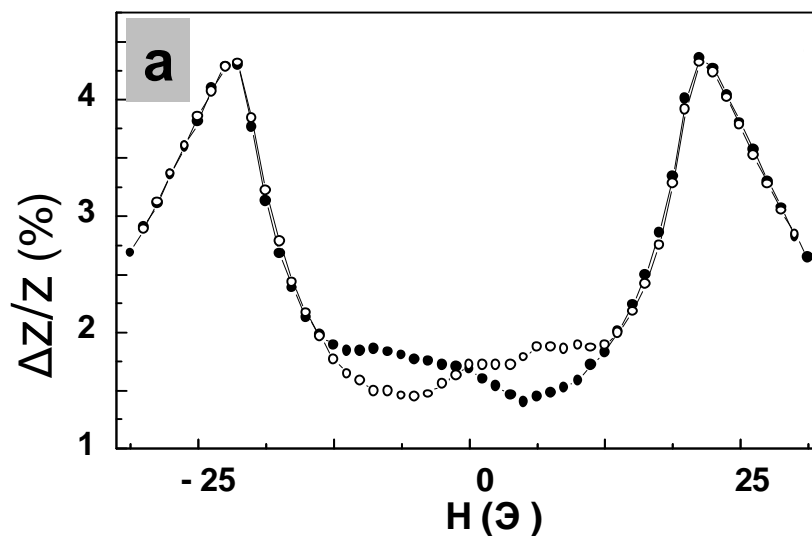
Для морфных лент CoFeSiB, быстрозакаленных в присутствии магнитного поля или без него, прошедших или не прошедших дополнительную термическую обработку, проводится сравнительный анализ особенностей магнитной анизотропии, магнитной доменной структуры, процессов намагничивания и ГМИ, предлагается модель релаксации напряжений, позволяющая качественно описать экспериментальные результаты.

Быстрозакаленные аморфные ленты CoFeMoSiB исследовались в различных состояниях: после релаксационного отжига и после термомеханической обработки (ТМехО), приводящей к формированию одноосной магнитной анизотропии с осью легкого намагничивания (ОЛН), перпендикулярной оси ленты (поперечной анизотропии). Анализ структурного состояния, магнитных свойств, магнитострикции, магнитных доменов и МИ в лентах CoFeCrSiB в исходном состоянии и после ТМехО при различных температурах показал наличие в лентах магнитной анизотропии высокого порядка, для описания которой необходимо не менее 3-х констант. В первой главе изложено решение таких частных задач как определение констант магнитной анизотропии по кривым намагничивания в модели пластины, сравнительное исследование магнитной доменной структуры и ГМИ в образцах с различными особенностями магнитной анизотропии, угловая зависимость эффекта ГМИ, особенности микроволнового поглощения.

На Рис. 2 в качестве примера приведены кривые МИ и картины доменной структуры ленты $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$, позволяющие сопоставить гистерезис МИ и магнитный гистерезис. МИ отношение было определено следующим образом

$$\Delta Z/Z = 100 \times ((|Z(H)| - |Z(H_{\max})|) / |Z(H_{\max})|) \quad (1)$$

где $H_{\max} = 150 \text{ Э}$ – максимальное значение внешнего поля.



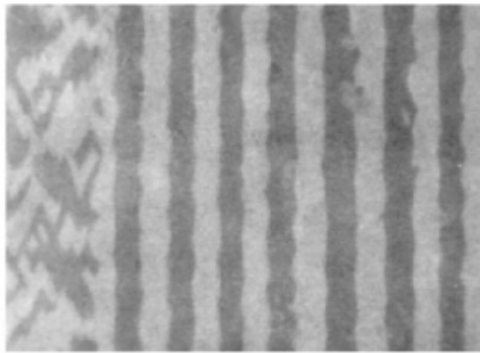
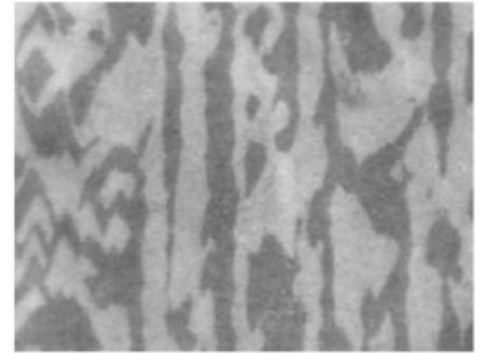
б**H = - 4.1 Э****H = 0****H = + 4.1 Э****H = + 15.5 Э**

Рис. 2. (а) - Магнитный импеданс ($f= 2$ МГц, $I_{\text{rms}}= 3$ мА) аморфной ленты $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ с поперечной магнитной анизотропией, индуцированной отжигом под нагрузкой: открытые символы – восходящие ветви, закрытые символы – нисходящие ветви. (б) – Магнитная доменная структура (наблюдения выполнены с помощью магнетооптического эффекта Керра).

Далее изложены результаты исследований структуры, магнитных свойств, магнитной анизотропии, магнитострикции и ГМИ нанокристаллических лент $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ и $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{16.5}\text{B}_6$, прошедших ТМехО и ТМО в специальных режимах. Наибольшее внимание уделено рассмотрению влияния магнитной анизотропии, созданной различными воздействиями, на ГМИ нанокристаллических лент и частотной зависимости эффекта ГМИ в нанокристаллических лентах $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ с высокой поперечной анизотропией.

В конце первого раздела анализируются такие общие физические проблемы как эффект ГМИ и магнитный гистерезис; способы снижения гистерезиса ГМИ; эффект ГМИ и явление магнитострикции; эффект ГМИ и распределение локальных осей магнитной анизотропии.

В втором разделе рассматриваются особенности процессов намагничивания, линейный ГМИ и резонансное микроволновое поглощение в однослойных и многослойных тонких пленках типа FeNi и CoFeB. Дается краткий обзор экспериментальных и теоретических результатов ГМИ в многослойных плоских ферромагнетиках, описываются методики получения и аттестации образцов в виде тонких пленок и многослойных структур, включая способы получения и общую характеристику пленочных структур в конфигурации «чипа». В этой конфигурации на одну подложку $20 \times 20 \text{ мм}^2$ параллельно друг другу напылялись четыре одинаковых функциональных ГМИ элемента FeNi(150 нм)/Cu(500 нм)/FeNi(150 нм), чередующихся с четырьмя технологическими элементами (Рис. 3).

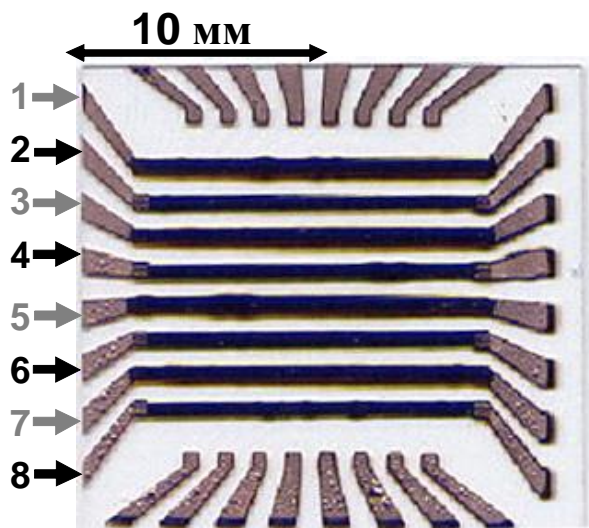


Рис. 3. Набор высокочувствительных ГМИ элементов FeNi(Cu)FeNi, собранных в виде «чипа» на стеклянной подложке: общий вид в оптический микроскоп.

Технологическим элементам присвоили номера 1, 3, 5 и 7, а ГМИ элементам присвоили номера 2, 4, 6 и 8. Геометрические параметры магнитных слоёв в ГМИ элементах составляли $15 \times 0.5 \text{ мм}^2$, а медного слоя - $15 \times 0.05 \text{ мм}^2$. Геометрические параметры

магнитных слоёв технологических элементов составляли $15 \times 0.05 \text{ мм}^2$, а медного слоя $15 \times 0.5 \text{ мм}^2$.

Особое место отводится описанию методов измерения резистивных свойств и резонансного микроволнового поглощения. На Рис. 4 приведены картины доменной структуры однослойных пленок $\text{Co}_{76}\text{Fe}_4\text{B}_{20}$ ($20 \times 2 \text{ мм}^2$) с разной магнитной анизотропией в следующих состояниях: исходное состояние (после осаждения на плоскую подложку и без дополнительных обработок); ТМО в переменном магнитном поле, приложенном в плоскости плёнки параллельно короткой стороне образца; ТМО в постоянном поле, приложенном в плоскости плёнки параллельно короткой стороне образца; осаждение на выгнутую подложку (без дополнительных обработок).

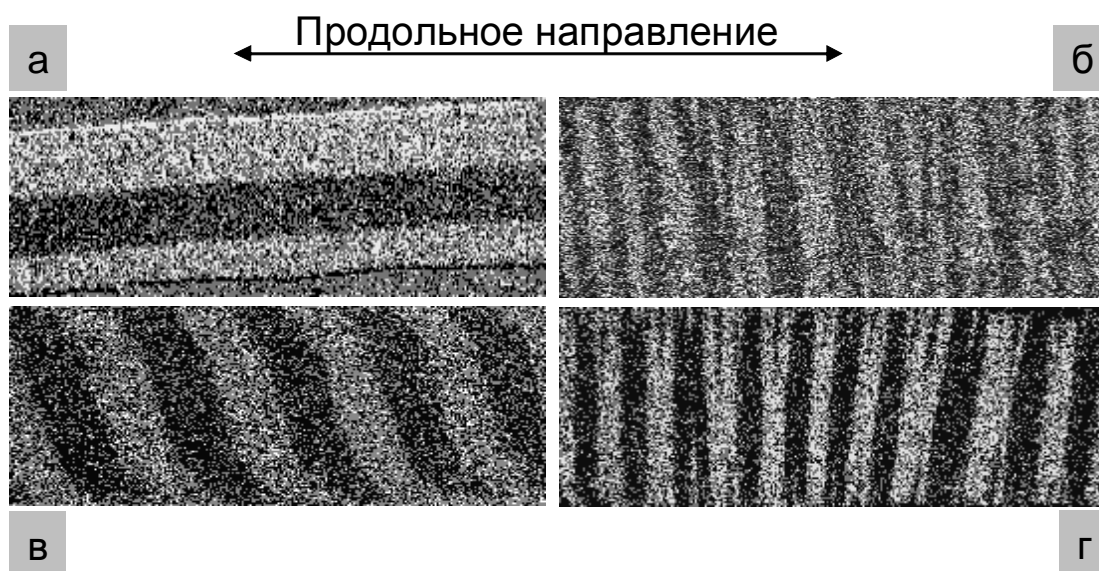


Рис. 4. Керровские картины магнитной доменной структуры однослойных пленок $\text{Co}_{76}\text{Fe}_4\text{B}_{20}$ в состоянии остаточной намагниченности: (а) – исходное состояние; (б) – ТМО в переменном поле; (в) – ТМО в постоянном поле; (г) – осаждение на выгнутую подложку.

Величины остаточной намагниченности для всех описанных случаев, хорошо коррелируют с особенностями магнитной доменной структуры в состоянии остаточной намагниченности (см. Рис. 4 и таблицу). Это позволяло сделать достаточно аргументированные заключения о характере магнитной

анизотропии лент. Совместный анализ данных об особенностях магнитной анизотропии и ГМИ в однородных пленках CoFeB показал их четкую взаимосвязь.

Решение общей проблемы оптимизации анизотропии и магнитных свойств тонких пленок и многослойных структур для получения устойчивого и высокочувствительного эффекта ГМИ включало рассмотрение таких задач, как анализ закритического состояния тонких пленок $Ni_{75}Fe_{16}Cu_5Mo_4$; исследование зависимости магнитной анизотропии, магнитных свойств и ГМИ от условий напыления и последующих термообработок тонких пленок $Co_{76}Fe_4B_{20}$; сравнительный анализ структуры магнитных доменов и процессов намагничивания многослойной структуры FeNi/Cu/FeNi/Cu/FeNi/Cu/FeNi (геометрия ГМИ сэндвича); оценка влияния немагнитных прослоек на ГМИ в многослойных пленках FeNi/Cu/FeNi и FeNi/Si/Cu/Si/FeNi: экспериментальные результаты и численный модельный расчет частотной зависимости максимума магнитоимпедансного эффекта для ГМИ плёночных структур указанного типа; угловая зависимость эффекта МИ.

Таблица. Некоторые характеристики, полученные из анализа поперечных петель гистерезиса однослойных пленок $Co_{76}Fe_4B_{20}$; M_s – намагниченность насыщения

Образец	Остаточная намагниченность (в единицах M_s)	H_c (Э)	Магнитная энергия (кДж/м ³)
Исходное состояние	0.010	0.24	1.65
ТМО в переменном поле	0.006	0.15	1.39
ТМО в постоянном поле	0.010	0.28	1.53
Осаждение на выгнутую подложку	0.015	0.22	0.85

Впервые в общем виде был поставлен и для частного случая тонких плёнок $Fe_{19}Ni_{81}$ решен вопрос об особенностях магнитных, магниторезистивных свойств и ГМИ для материалов, характеризующихся как относительно высоким эффектом МИ, так

и заметным магниторезистивным эффектом (МР). В качестве примера на Рис. 5 приведены экспериментальные данные для продольного эффекта (при параллельной ориентации внешнего магнитного поля и постоянного тока). МР отношение было определено следующим образом ($H_{\max} = 150$ Э):

$$\Delta R/R = 100 \times ((|R(H) - R(H_{\max})|) / |R(H_{\max})|) \quad (2)$$

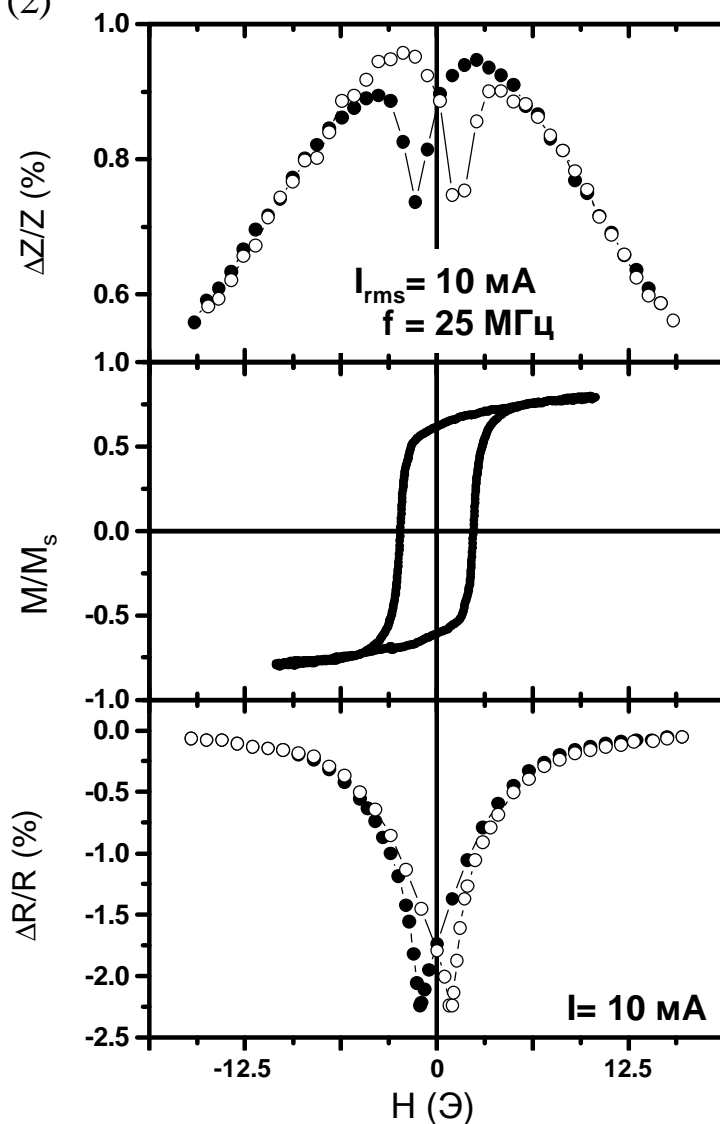


Рис. 5. Продольный эффект МИ ($\Delta Z/Z$), продольная объемная петля гистерезиса (M/M_s), и продольный эффект магнитосопротивления ($\Delta R/R$) наблюдаемые в однородной пленке $Fe_{19}Ni_{81}$.

До определенной степени выводы, сделанные на основе анализа экспериментальных результатов и данных модельных расчетов, полученные для тонких пленок $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$, подтвердились для многослойной структуры, содержащей набор квадратных $\text{FeCoNi}/\text{TiN}/\text{FeCoNi}$ элементов, соединённых одним линейным тоководом.

Во втором разделе анализируются магнитные свойства и ГМИ нескольких одинаковых чувствительных элементов, скомпонованных в виде «чипа», состоящего из набора линейных $\text{FeNi}/\text{Cu}/\text{FeNi}$ элементов, параллельных друг другу. Дизайн «чипа», содержащего несколько независимых элементов, позволял провести статистическое исследование свойств, проверить устойчивость разработанной технологии получения пленочных наноструктур.

Кроме того, такая конфигурация чипа при условии хорошей повторяемости свойств отдельных элементов может быть предложена в качестве прототипа биодатчика, основанного на ГМИ эффекте, адаптированного на режим детектирования сразу нескольких биоконпонент [15].

Полученные значения максимальной чувствительности эффекта ГМИ (до 35%/Э) при частотах возбуждения порядка 60 МГц являются одними из лучших результатов, опубликованных в печати для пленочных структур (Рис. 6).

В конце второго раздела анализируются такой важный общий вопрос как влияние магнитных свойств и геометрических параметров на чувствительность ГМИ в ферромагнитных объектах.

В третьем разделе рассматриваются особенности процессов намагничивания, линейный ГМИ, резонансное и нерезонансное поглощение в микроволновом диапазоне в композиционно неоднородных цилиндрических ферромагнитных структурах (на примере проволок CuFe с электроосажденными слоями FeCoNi разных составов). В начале раздела даётся краткий обзор экспериментальных и теоретических результатов для случая линейного ГМИ в образцах цилиндрической геометрии типа «ферромагнитная пленка/высокопроводящая не ферромагнитная основа», описываются методики получения и аттестации проволок с ферромагнитными покрытиями, имеющими различную магнитную анизотропию.

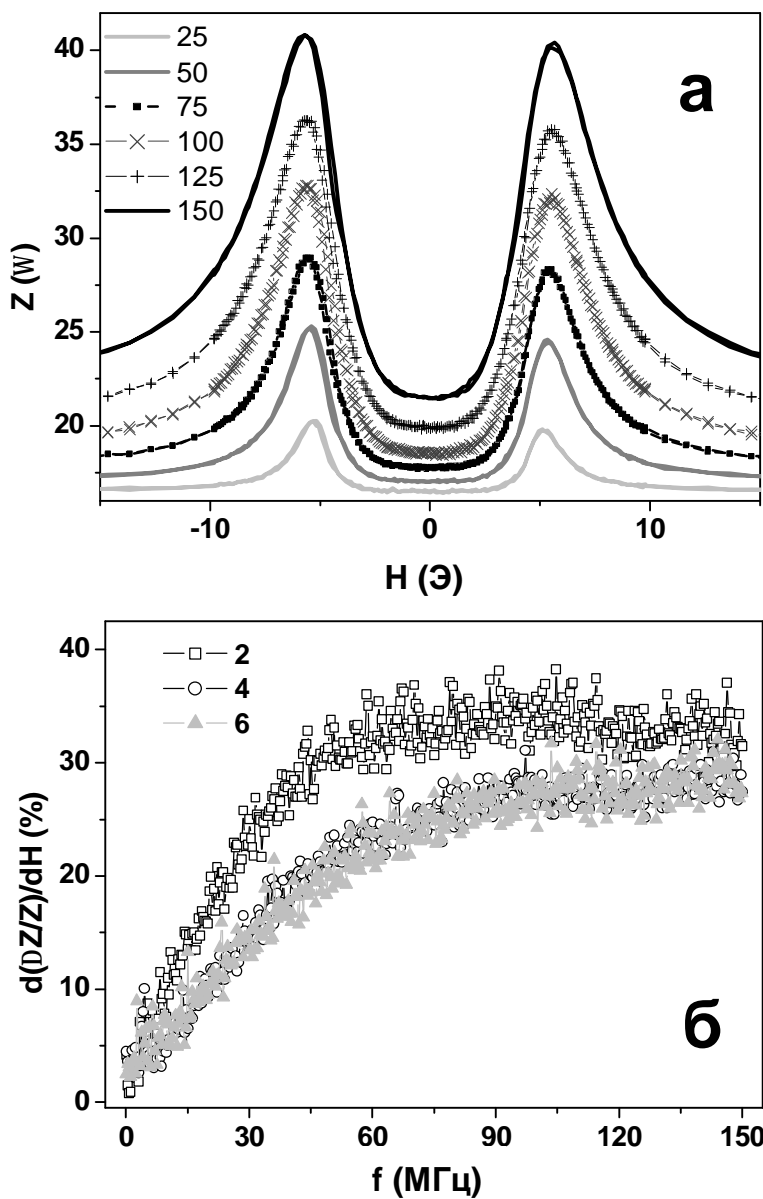


Рис. 6. ГМИ чувствительных элементов FeNi/Cu/FeNi. Цифры на рисунке (а) обозначают частоты возбуждающего тока в МГц. Данные полевой зависимости импеданса соответствуют элементу 2, а данные частотной зависимости чувствительности импеданса соответствуют элементам 2, 4, 6 (см. Рис. 3).

Далее подробно описываются результаты исследования состояния магнитной бистабильности, впервые полученного в композиционно неоднородных ферромагнитных структурах цилиндрической геометрии автором настоящей работы.

На основе исследования свойств электроосажденных проволок, покрытых слоем феррожидкости, предлагается новый метод исследования процессов взаимодействия между наночастицами суспензии и магнитным материалом и оценки динамического перемагничивания последнего при низких частотах. Высказывается предположение о том, что в конкретных условиях этот метод может быть применен не только для случая композиционно неоднородных, но и быстрозакаленных аморфных и нанокристаллических проволок (в частности, для исследования особенностей движения доменной границы во время скачка Баркгаузена).

Далее исследовалось резонансное и нерезонансное микроволновое поглощение в электроосажденных проволоках FeCoNi/CuBe и аморфных лентах CoFeCrSiB в микроволновом диапазоне. В случае FeCoNi/CuBe цилиндрических структур речь идет о планарной геометрии, при которой и внешнее постоянное и радиочастотное поля располагаются в одной и той же «плоскости». В рамках такой модели, если резонансные линии узкие, предполагалось обнаружить ферромагнитный резонанс (ФМР) и ферромагнитный антирезонанс (ФМАР), описываемые обычными выражениями,

$$\text{ФМР: } \left(\frac{w}{g} \right)^2 = (H_R + H_{an}) (H_R + H_{an} + 4p M_{eff}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{ФМАР: } \quad & \frac{w}{g} = H_T + H_{an} + 4p M_{eff} \text{ для} \\ & w \geq g (H_{an} + 4p M_{eff}) \approx 30 \text{GHz} \end{aligned} \quad (4)$$

Где $w = 2\pi f$ - круговая частота, $g = g_{\text{мв}}/?$ - гиромангнитное отношение, H_R и H_T - поля резонанса и антирезонанса соответственно, H_{an} - поле анизотропии и M_{eff} - эффективная намагниченность. В случае всех исследованных типов образцов в интервале частот от 9 до 56 ГГц были обнаружены четкие линии резонансного поглощения. По спектрам поглощения рассчитывались поле ФМР и ширина резонансной линии.

Резонансные спектры ФМР при 9,65 ГГц довольно симметричны и их форма близка к Лорентцевской. Хотя во всех исследованных структурах есть указание на присутствие антирезонансных явлений при 56 ГГц, только в случае образцов типа FeNi сигнал был достаточно сильным для того, чтобы с уверенностью определить величину поля антирезонанса.

Гигантский магнитный импеданс в проволоках типа FeCoNi/CuBe исследовался в связи с особенностями наведенной магнитной анизотропии. При этом анализировалось влияние частоты и амплитуды возбуждающего тока на величину ГМИ. Результаты предложенных автором модельных расчётов линейного ГМИ для проводящего цилиндра с поверхностным ферромагнитным слоем находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, полученными в данной работе.

В четвертом разделе рассматривается нелинейный ГМИ в композиционно неоднородных ферромагнитных структурах цилиндрической и композиционно однородных ферромагнитных структурах планарной геометрий. В начале раздела даётся краткий обзор экспериментальных и теоретических результатов по нелинейному ГМИ и описываются методические особенности измерения нелинейного ГМИ. Примеры соответствующих экспериментальных данных и их анализа показаны на Рис. 7.

Нелинейный ГМИ в композиционно неоднородных ферромагнитных структурах цилиндрической геометрии исследовался на проволоках FeCoNi/CuBe разного состава в исходном состоянии и после термомагнитной обработки. Примеры квазистатических петель гистерезиса и кривых нелинейного ГМИ приведены на Рис. 8.

К наиболее интересным результатам можно отнести качественное совпадение экспериментальных результатов (Рис. 8) и данных модельного расчета магнитной восприимчивости (χ) для случая нелинейного возбуждения вблизи спин-переориентационного фазового перехода. Кривые полевой зависимости мнимой ($\text{Im}(\chi_{z\phi}) - H_0$) и действительной частей ($\text{Re}(\chi_{z\phi}) - H_0$) магнитной восприимчивости характеризуются очень острыми экстремумами при величине поля 1.2 Э, представляющими собой переходы первого рода. Кривая $\text{Im}(\chi_{\phi\phi}) -$

H_0 характеризуется наличием двух пиков, которым соответствует два ориентационных фазовых перехода. Эти пики различаются по форме: первый (в положительном поле) широкий, без особенностей и по форме близок к симметричному, что свидетельствует о его соответствии переходу второго рода в магнитном поле. Второй пик (в отрицательном поле) характеризуется резким скачком магнитной восприимчивости, т.к. фазовый переход является переходом первого рода (Рис. 9).

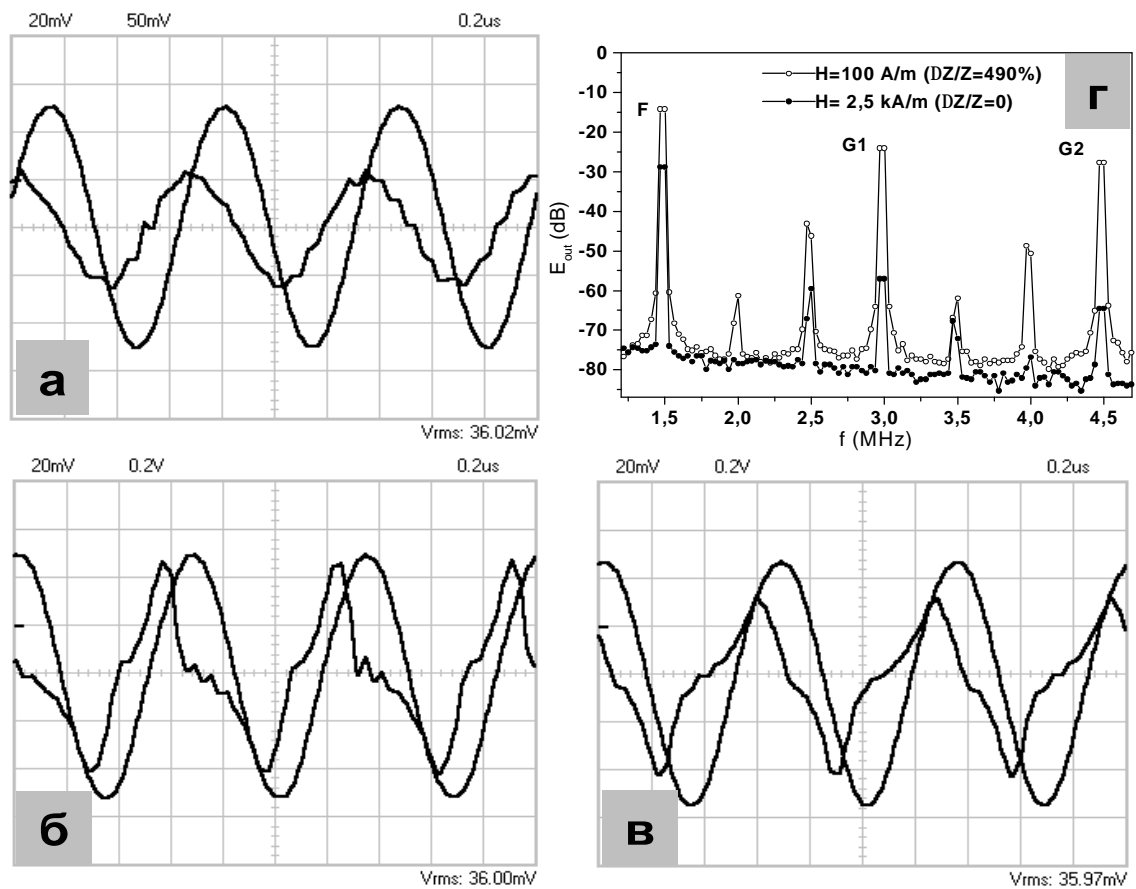


Рис 7. (а-в) - осциллограммы синусоидального высокочастотного тока возбуждения и падения напряжения на концах проволоки FeCoNi/CuBe для разных значений намагничивающего поля: (а) $H = -2.6$ кА/м; (б) $H = -100$ кА/м; (в) $H = +100$ кА/м. (г) – результаты Фурье анализа сигналов, представленных на рисунках (а-в).

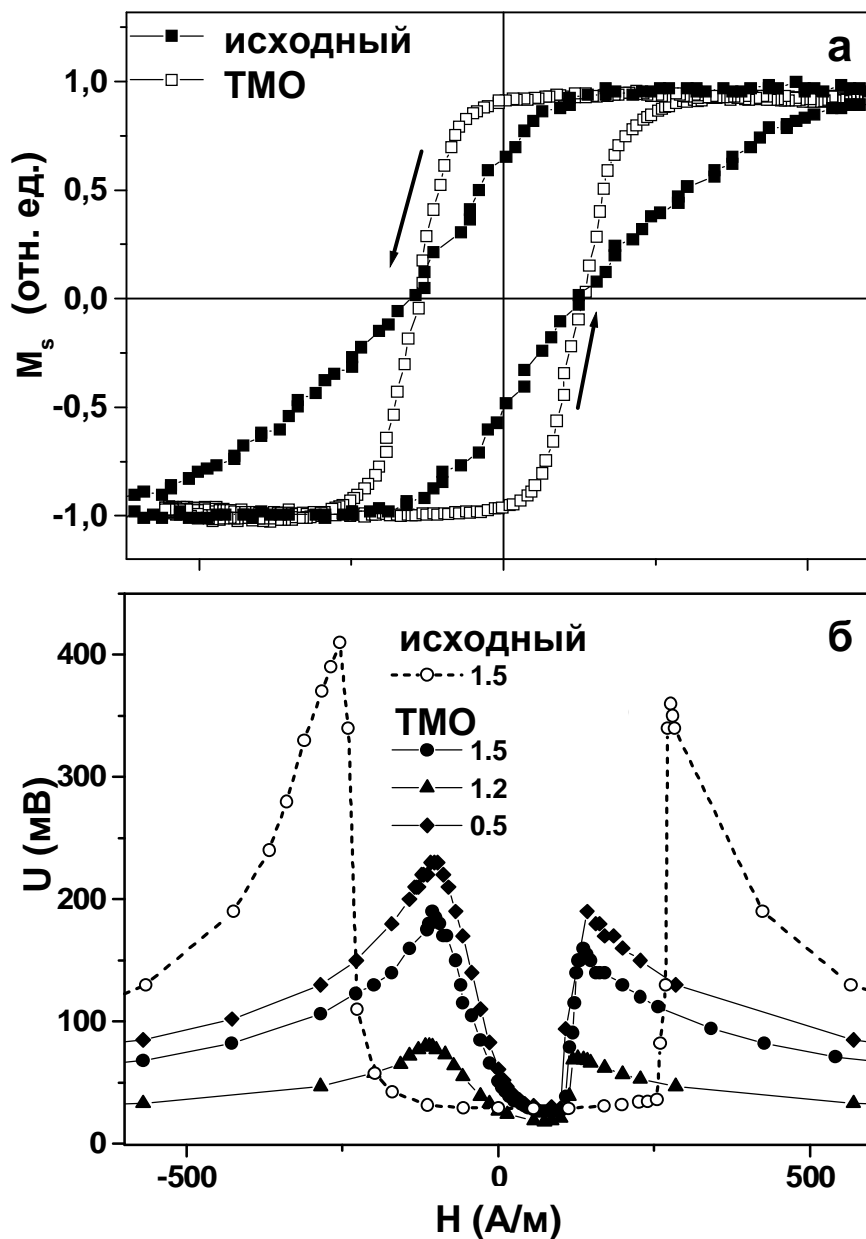


Рис. 8. Продольные петли гистерезиса проволок FeCoNi/CuBe длиной 6 см в исходном состоянии и после ТМО в постоянном аксиальном магнитном поле (а). Кривые ГМИ-отклика в монотонно возрастающем поле для проволоки в исходном состоянии и после ТМО для нескольких частот возбуждающего тока (б). Частоты указаны на рисунке в МГц.

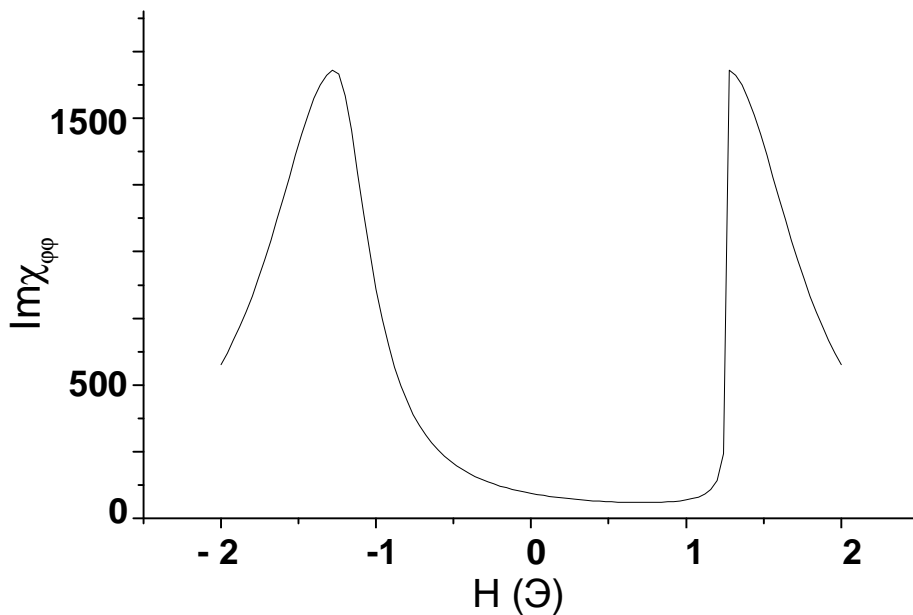


Рис. 9. Результаты модельных расчетов мнимой части магнитной восприимчивости.

Нелинейный ГМИ в композиционно однородных планарных структурах исследовался на примере быстрозакалённых аморфных лент на основе кобальта. Была установлена возможность устойчивого нелинейного возбуждения при увеличении амплитуды переменного тока в интервале амплитуд от 10 до 160 мА. Исследовались зависимости изменения общего падения напряжения и по отдельности вклады трех первых гармоник. Было обнаружено интересное несимметричное поведение третьей гармоники a_3 (для частоты $f = 3f_{ex}$, где f_{ex} – это частота тока возбуждения). В лентах $CoFeSiB$ с острой продольной анизотропией была обнаружена резкая зависимость формы второй гармоники от угла приложения внешнего поля вблизи поля 27 Э. (чувствительность как минимум 0.01 мВ/°).

В пятом разделе приведены примеры целенаправленного достижения высокой чувствительности в специализированных прототипах датчиков, работающих с использованием явления ГМИ. Обсуждаются некоторые примеры прототипов датчиков магнитного поля, предложенных автором. Следует подчеркнуть, что, хотя все описываемые типы датчиков и были доведены до лабораторных образцов, испытания которых подтвердили

правильность положенных в их основу физических концепций, в задачу собственно исследований не входила оптимизация дизайна прототипов. Использованный упрощенный дизайн скорее вытекал из полученных знаний о процессах динамического перемагничивания ГМИ структур. В частности, рассмотрены: прототипы датчиков слабого поля, действующие на принципе линейного и нелинейного ГМИ с чувствительным элементом в виде аморфной ленты CoFeMoSiB или CoFeCrSiB в планарной геометрии или геометрии тороида; прототип датчиков слабого поля, действующих на принципе линейного ГМИ, с двумя чувствительными элементами.

Специальный интерес вызывает проблема магнитных биодатчиков. Она также затронута в пятом разделе. Дается общая характеристика существующих типов магнитных биодатчиков. Обсуждаются требования к устройству ГМИ биодатчиков, работающих при постоянной или в условиях переменной геометрии чувствительного элемента, и особенности процессов намагничивания каждого из магнитных элементов, вовлеченных в процесс детектирования с помощью ГМИ биодатчика в том случае, когда используются магнитные маркеры. В данном разделе также анализируются возможности эффекта ГМИ как методической основы для получения дополнительных знаний об эффективной магнитной анизотропии и особенностях процессов квазистатического и динамического намагничивания.

Диссертация имеет приложение, в котором дается краткий анализ перспектив использования наночастиц в биологии, медицине и фармакологии (в том числе и в совокупности с магнитными биодатчиками) и какие требования в связи с этим предъявляются к упомянутым наночастицам. Далее приведены результаты исследований, проведенных автором с использованием магнитных микрочастиц Dynabeads[®] M-450, которые представляют собой сферы диаметром 4.5 мкм. Композиционный магнитный материал представлял собой смесь наночастиц оксида железа (Fe_3O_4) и полистирола, игравшего роль наполнителя. Найдено, что во внешнем поле частицы проявляют тенденцию к организации и образованию высоко симметричной структуры с гексагональной упаковкой элементов. В частности, из Рис. 10, иллюстрирующего такую тенденцию, видно, что у каждой сферы

имеется шесть ближайших соседей, расстояния до которых одинаковы. Если внешнее поле приложено почти перпендикулярно поверхности, то процесс организации системы приводит к образованию очень похожих симметричных структур, но вместо одной сферы ее положение занимают две сферы, расположенные одна на другой. Было обнаружено, что подобные ансамбли возникают в широкой области концентраций от 10^2 до 10^4 сфер/мм². Образование структур первого и второго типов можно объяснить на основе магнитоэлектростатического взаимодействия суперпарамагнитных сфер, используя простые модели, более подробно описанные в тексте диссертационной работы.

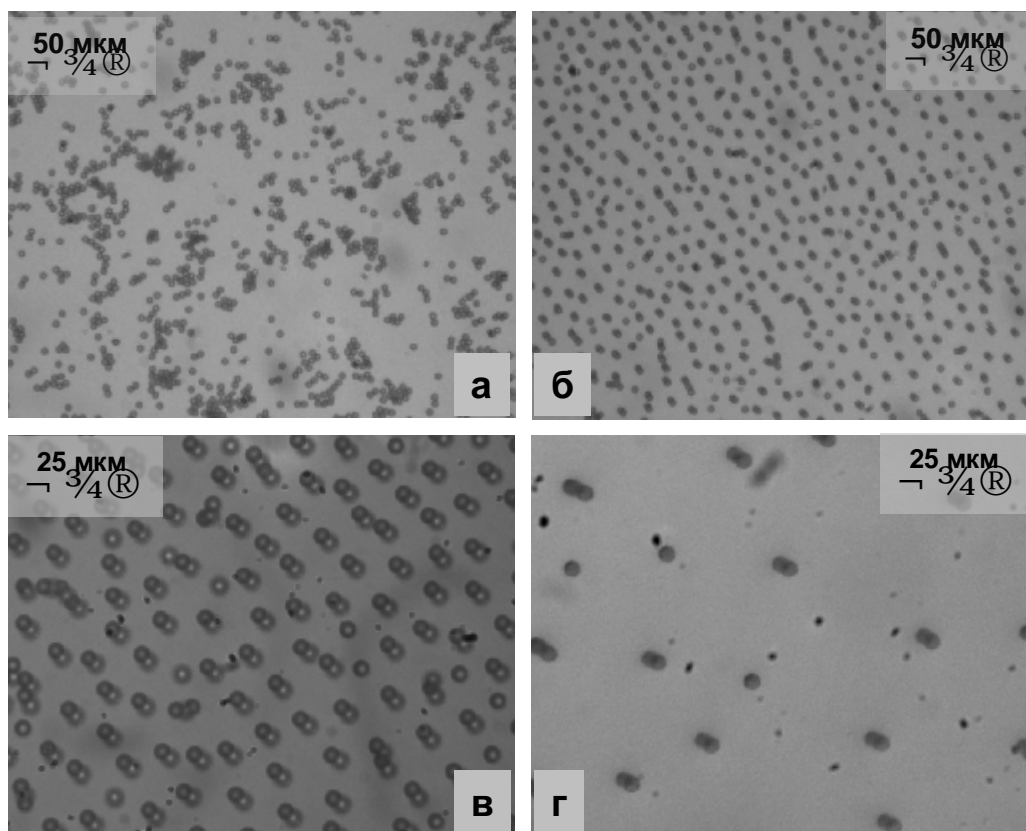


Рис. 10. Оптическая микрофотография частиц Dynabeads® M-450 в основном фосфатном растворе, нанесенных на поверхность стекла: а – без приложения магнитного поля (концентрация $3.3 (\pm 0.5) \times 10^3$ сфер/мм²); б – во внешнем поле, приложенном перпендикулярно плоскости подложки, (концентрация $6.6 (\pm 0.5) \times 10^3$ сфер/мм²); в и г - во внешнем поле, приложенном почти

перпендикулярно плоскости подложки с небольшой компонентой ориентированной по диагонали из левого верхнего угла в правый нижний угол (концентрации $1.5 (\pm 0.3) \times 10^3$ сфер/мм² и $2.0 (\pm 0.3) \times 10^3$ сфер/мм² соответственно).

В приложении также отражены результаты, связанные с возможностью организации процессов детектирования в прототипах ГМИ биодатчиков, предложенных автором, при использовании магнитных маркеров или наночастиц. В частности, рассмотрены примеры получения и аттестации наночастиц Fe₃O₄ в полианилиновой оболочке (средний размер частиц составлял 20 нм) и без нее и частиц Co₈₀Ni₂₀ (средний размер частиц составлял 45, 100 и 200 нм). Подробная аттестация наночастиц важна при последующем использовании, например, в качестве магнитных маркеров (Рис. 11).

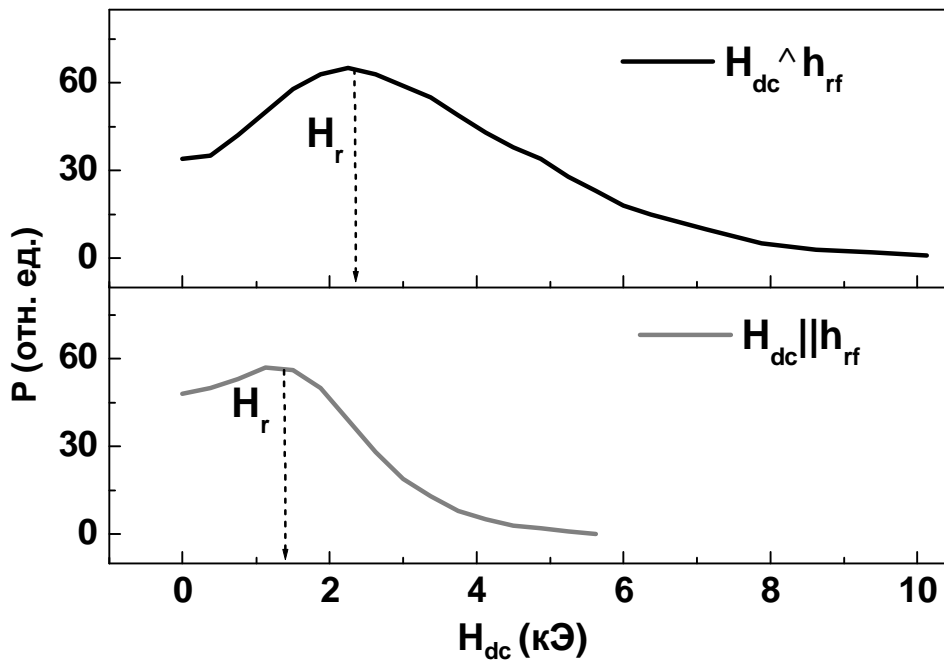


Рис. 11. Микроволновое поглощение в образцах, содержащих наночастицы CoNi, в зависимости от величины магнитного поля (H_{dc}): верхний рисунок - переменное h_{rf} и постоянное H_{dc} магнитные поля перпендикулярны, нижний рисунок - h_{rf} и H_{dc} параллельны. Частота поля h_{rf} составляет 11.875 ГГц.

Первая система является модельной для низкоанизотропных, а вторая для высокоанизотропных частиц. В работе показано, что сравнительный анализ данных структурных, магнитных и микроволновых исследований оказывается полезным для оценки степени неоднородности системы и формы частиц. Нерезонансное микроволновое поглощение в системе наночастиц CoNi представляет и самостоятельный интерес. Первая отличительная особенность CoNi наночастиц – это то, что на сигнал, соответствующий резонансному поглощению, накладывается большой сигнал в нулевом поле, который быстро уменьшается при приложении постоянного магнитного поля. Ширина линии ФМР оказывается очень большой. Анализ величин резонансных полей наночастиц в совокупности с данными магнитных измерений приводят к заключению о невозможности описания ФМР экспериментов в рамках модели сферических частиц.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для быстрозакалённых лент на основе кобальта впервые показано что:

- наведённая магнитная анизотропия может иметь сложный характер и описываться не менее чем тремя константами анизотропии;
- ГМИ может быть использован как эффективный дополнительный метод исследования особенностей магнитной анизотропии;
- имеет место хорошее согласие между результатами выполненных численных расчетов величины МИ эффекта в материалах с заданными особенностями магнитной анизотропии высокого порядка и экспериментальными данными для аморфных лент, прошедших термомеханическую обработку (ТМехО).

2. Для нанокристаллических сплавов FeCuNbSiB установлены закономерности формирования магнитной анизотропии, наведенной одно- или двухступенчатым отжигом под нагрузкой. С помощью анализа гистерезиса МИ эффекта показано, что при температурах отжига выше 500°C наведённая анизотропия имеет сложное описание, базирующееся на учёте констант высокого порядка.

3. Впервые продемонстрирована связь гистерезиса МИ эффекта и особенностей процессов квазистатического

перемагничивания путем смещения доменных границ в аморфных и нанокристаллических лентах. Выявлена одна из причин ГМИ гистерезиса при отклонении внешнего поля от оси ленты, состоящая в вовлечении доменных стенок в процесс перемагничивания. Предложены приемы оценки и способы уменьшения гистерезиса МИ, состоящие в создании поперечной или продольной анизотропии с низкой дисперсией осей легкого намагничивания и выборе оптимальных параметров переменного тока возбуждения.

4. На основе комплексного исследования особенностей магнитной анизотропии, процессов намагничивания, магнитной доменной структуры и магнитного импеданса пленок $\text{Co}_{64.5}\text{Fe}_{2.5}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ показано, что отжиг в переменном поле обеспечивает наиболее однородное магнитное состояние объектов и высокий эффект ГМИ. В узких образцах, подвергнутых термомагнитной обработке (ТМО) в переменном поле, в результате конкуренции индуцированной магнитной анизотропии и анизотропии формы возникает характерная S-образная магнитная доменная структура, параметры которой зависят от температуры ТМО. На примере плёнок пермаллоя показано, что в низкочастотной области тока возбуждения эффект анизотропного магнитосопротивления приводит к появлению сильного гистерезиса комплексного сопротивления. В высокочастотной области вклад МР гораздо меньше вклада МИ и им можно пренебречь.

5. Впервые установлены закономерности перестройки доменной структуры в процессе квазистатического перемагничивания ГМИ-сэндвича $\text{FeNi/Cu/FeNi/Cu/FeNi/Cu/FeNi}$ прямоугольной формы с осью лёгкого намагничивания перпендикулярной длинной оси образца. При намагничивании вдоль ОЛН в малых полях изменения доменной структуры и суммарного магнитного момента связаны с зарождением доменов в форме «заплат» вблизи медного токовода. При ориентации внешнего поля поперек ОЛН процесс перемагничивания включает вращение векторов намагниченности вблизи токовода. Установлено, что в ГМИ-сэндвичах в отличие от аморфных лент отклонение внешнего поля от направления протекания тока в плоскости пленочной наноструктуры не вызывает существенного

изменения ГМИ гистерезиса. Зависимость $\Delta Z/Z$ в углах до 45° удовлетворительно описывается функцией $\cos\alpha$, а в интервале углов от 45 до 90° – функцией $\cos^3\alpha$.

6. Впервые путем численного расчета получены частотные зависимости МИ эффекта в магнито неоднородных прямоугольных проводниках с многослойной структурой и со структурой МИ-сэндвича. Установлено качественное сходство этих зависимостей для обоих типов объектов. Показано, что процессы релаксации доменных границ могут существенно влиять на величину МИ эффекта, приводя к его резкому снижению при больших временах релаксации.

7. Установлены основные закономерности ТМО в постоянном и переменном магнитных полях для проволок FeNi/CuBe и FeNiCo/CuBe. Найдены способы управления эффективной магнитной анизотропией, величиной и гистерезисом магнитного импеданса, определены оптимальные условия обработок для получения большой чувствительности ГМИ в определенных полевых интервалах. Предполагается, что важную роль в эффекте ТМО в переменном поле играет формирование оптимальной анизотропии при отсутствии стабилизации доменных границ. ТМО в переменном поле впервые был применен по отношению к ГМИ материалам разного типа авторами этой работы. Предложена модель для описания частотной зависимости поля максимума импедансного отношения.

8. В проволоках типа FeNiCo/CuBe путём термомагнитной обработки впервые получено состояние магнитной бистабильности. Установлено, что величина поля старта в бистабильном состоянии зависит от состава, параметров термомагнитных воздействий и длины проволоки. Минимальная длина, при которой в исследованных объектах существует бистабильное состояние (5мм) существенно меньше, чем в аморфных или нанокристаллических проволоках.

9. Впервые определены закономерности микроволнового поглощения в малых полях, ФМР и ФМАР для FeNiCo/CuBe и FeNi/FeNiCo/CuBe проволок с разной эффективной анизотропией. Для описания явления поглощения предложена соответствующая модель. В геометрии, при которой микроволновое магнитное поле

ориентировано параллельно оси проволоки, расстояние между пиками на кривых мощности микроволнового поглощения в малых полях близко к удвоенной величине коэрцитивной силы.

10. Установлены основные закономерности нелинейного магнитного импеданса в FeCoNi/CuBe проволоках разного состава. Обнаружены сильная зависимость ГМИ отношения от величины высокочастотного тока. Расчётным путём показано, что наблюдаемые особенности нелинейного МИ связаны с повышенной чувствительностью магнитной системы к циркулярному магнитному полю вблизи спин-переориентационного перехода. Получены очень высокие величины МИ отношения (до 1200%) и чувствительности МИ отношения (до 4500%/Э).

11. Создан ряд новых физико-технических решений, направленных на практическое использование явления гигантского магнитного импеданса:

- показана возможность уменьшения размера ГМИ-датчика малого поля на основе аморфной ленты до нескольких миллиметров при использовании чувствительного элемента в форме тороида;
- в лентах CoFeSiB, подвергнутых специальному отжигу, обнаружена резкая зависимость формы второй гармоники ГМИ от угла приложения внешнего поля, которая позволяет сконструировать детектор ориентации;
- предложена новая конструкция датчика магнитного поля на основе двух чувствительных элементов в виде аморфных лент в симметричной конфигурации под углом 15° между их осями, которая обладает откликом, не зависящим от ориентации внешнего поля в интервале углов от 0 до 45° и от частоты в интервале от 2 до 6 МГц;
- предложена концепция нового типа биодатчиков: детектирование с использованием высокочувствительного эффекта ГМИ.

12. Установлен ряд закономерностей в поведении магнитных суспензий, используемых в биомедицинских датчиках на основе ГМИ:

- обнаружены и смоделированы элементы организации в системе суперпарамагнитных сфер Dynabeads M-480 при приложении внешнего магнитного поля;

- показана возможность использования явления микроволнового поглощения как эффективного способа оценки формы и способности к магнетоабсорбции наночастиц с низкой (Fe_3O_4) и с высокой ($\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$) магнитокристаллической анизотропией;
- разработаны новые статистические методики исследования особенностей распределения суспензии Dynabeads[®] M-450 на магнитных и слабомагнитных поверхностях разного типа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Перечень публикаций по теме диссертации в ведущих рецензируемых научных журналах

1. А.В. Свалов, Г.В. Курляндская, Х. Хаммер, П.А. Савин, О.И. Тутынина. Изменение «закритического» состояния плёнок $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{16}\text{Cu}_2\text{Mo}_4$, полученных радиочастотным напылением// ЖТФ.-2004.-Т.74, вып.7.-С.62-65.
2. H. Hammer, G.V. Kurlyandskaya. Colloid-SEM method for domain structure observation in magnetic tapes and cards// Phys. Met. Metall.-2001.-V.92, Suppl.1.-S57-S61.
3. J.L. Muñoz, G.V. Kurlyandskaya, J.M. Barandiarán, A.P. Potapov, V.A. Lukshina, M. Vázquez. Anisotropy distribution and magnetoimpedance in stress annealed nanocrystalline and amorphous ribbons// Phys. Met. Metall.-2001.-V.91 Supl.1.-S139-S142.
4. G.V. Kurlyandskaya, H. García-Miquel, A.V. Svalov, V.O. Vas'kovskiy, M. Vázquez. Magnetic bistability of NiFeCo electroplated wires// Phys. Met. Metall.-2001.-V.91.-Supl.1.-S125-S128.
5. E. Kisker, G.V. Kurlyandskaya, H.P. Yakabchuk, V.O. Vas'kovskiy, N.G. Bebenin. High harmonics generation in electroplated FeNi wire showing giant magnetoimpedance// Phys. Met. Metall.-2001.-V.91.-Supl.1.-S129-S132.
6. Г.В. Курляндская, М. Баскес, Дж. Маккорд, Дж.Л. Муньез, Д. Гарсия, А.П. Потапов. Магнитная структура и магнитоимпедансный эффект в аморфных лентах на основе кобальта, отожженных под растяжением, с различной величиной наведенной магнитной анизотропии// ФММ.-2000.-Т.90,N.6.-С.27-34.

7. Н. В. Дмитриева, Г. В. Курляндская, В. А. Лукшина, А. П. Потапов. Наведенная магнитная анизотропия, вызванная отжигом под нагрузкой аморфного сплава на основе кобальта, и ее термическая стабильность// ФММ.-1998.-Т.86, N.3.-С.58-64.
8. Г. В. Курляндская, Н. В. Дмитриева, А. П. Потапов, В. А. Лукшина, Л. М. Воронова, И. В. Гервасьева, Н. Г. Бебенин. Магнитная анизотропия, наведенная в результате термомеханической обработки аморфного сплава $Fe_3Co_{67}Cr_3Si_{15}B_{12}$ // ФММ.-1997.-Т.83, N.5.-С.41-46.

Перечень публикаций по теме диссертации в зарубежных журналах и изданиях, входящих в список ВАК

1. G.V. Kurlyandskaya, V. Fal Miyar. Surface Modified Amorphous Ribbon Based Magnetoimpedance Biosensor// Biosensors & Bioelectronics.-2007.- V.9-10.- P.2341-2345.
1. G.V. Kurlyandskaya, V. Fal Miyar, A. Saad, E.Asua, J.Rodriguez. Giant magnetoimpedance: a label free option for surface effect monitoring// J. Appl. Phys.-2007.-V.101.-P.054505/1-054505/9.
2. G.V. Kurlyandskaya, S.M. Bhagat, C. Luna, M. Vazquez. Microwave absorption of nanoscale CoNi powders// J. Appl. Phys.-2006.-V.99.-P. 104308/1-104308/5.
3. A. Garcia-Arribas, A. Saad, I. Orue, G.V. Kurlyandskaya, J.M. Barandiaran, J.A. Garcia. Non-linear magnetoimpedance in amorphous ribbons// Sensors and Actuators A.-2006.-V.129.-P.275-278.
4. G.V. Kurlyandskaya, V.I. Levit. Advanced Materials for Drug delivery and Biosensors based on Magnetic Label Detection// Materials Sci. and Eng. C.-2006.- V.3.-P.495-503.
5. V. Fal-Miyar, G.V. Kurlyandskaya, J.A. Garcia, L. Elbaile, R.D. Crespo, M. Tejedor. Surface magnetic properties of $Co_{69}Fe_4Si_{15}B_{12}$ when DC and AC currents flow through the ribbon// J. Magn. Magn. Mater.-2006.-V.304.-e853-e855.
6. H. Garcia-Miquel, G.V. Kurlyandskaya, V. Levit. Magnetic properties of electroplated wires covered by ferrofluid// J. Magn. Magn. Mater.-2006.-V.300.- e55-e58.
7. G.V. Kurlyandskaya, V.I. Levit. Magnetic Dynabeads detection by sensitive element based on giant magnetoimpedance// Biosensors & Bioelectronics.-2005.-V.20.-P.1611-1616.

8. G.V. Kurlyandskaya, F. Alves, B. Ahamada, R. Barrué, A.V. Svalov, V.O. Vas'kovskiy. Domain structure and magnetization process of giant magneto-impedance geometry FeNi/Cu/FeNi(Cu)FeNi/Cu/FeNi sensitive element// *J. Phys.: Cond. Matter.*-2004.-V.16.-P.6561-6568.
9. H. García-Miquel, S.M. Bhagat, S.E. Lofland, G.V. Kurlyandskaya, A.V. Svalov. Ferromagnetic resonance in FeCoNi electroplated wires// *J. Appl. Phys.*-2003.-V.94.-P.1868-1872.
10. G.V. Kurlyandskaya, M.L. Sánchez, B. Hernando, P. Gorria, V.M. Prida, M. Tejedor. Giant-magnetoimpedance-based sensitive element as a model for biosensors// *Appl. Phys. Lett.*-2003.-V.82.-P.3053-3055.
11. V.M. Prida, P. Gorria, G.V. Kurlyandskaya, M.L. Sánchez, B. Hernando, M. Tejedor. Magnetoimpedance effect in nanostructured soft ferromagnetic alloys// *Nanotechnology.*-2003.-V.14.-P.231-238.
12. B. Hernando, V. Prida, M.L. Sánchez, P. Gorria, G.V. Kurlyandskaya, M. Tejedor, M. Vázquez. Magnetoimpedance effect in Co-rich metallic glasses// *J. Magn. Magn. Mater.*-2003.-V.258-259.-P.183-188.
13. J.L. Muñoz, J.M. Barandiarán, G.V. Kurlyandskaya, A. García-Arribas. Magnetoimpedance simulations in wire and tubes// *J. Magn. Magn. Mater.*-2002).- V.249.-P.319-323.
14. G.V. Kurlyandskaya, J.L. Muñoz, J.M. Barandiaran, A. García-Arribas, A.V. Svalov, V.O. Vas'kovskiy. Magnetoimpedance of sandwiched films: experimental results and numerical calculations// *J. Magn. Magn. Mater.*-2002.-V.-242-245 (P1).-P.291-293.
15. J.M. Barandiaran, A. García-Arribas, J.L. Muñoz, G.V. Kurlyandskaya, R. Valenzuela. Domain wall permeability limit for the giant magnetoimpedance effect// *J. Appl. Phys.*-2002.-V.91.-P.7451-7453.
16. G.V. Kurlyandskaya, H. García-Miquel, M. Vázquez, A.V. Svalov, V.O. Vas'kovskiy. Longitudinal Magnetic bistability of electroplated wires// *J. Magn. Magn. Mater.*-2002.-V.249.-P.34-38.
17. G.V. Kurlyandskaya, E. Kisker, H. Yakabchuk, N.G. Bebenin. Non-linear giant magnetoimpedance// *J. Magn. Magn. Mater.*-2002.-V.240.-P.206-208.
18. G.V. Kurlyandskaya, H. Yakabchuk, E. Kisker, N.G. Bebenin, H. García-Miquel, M. Vázquez, V.O. Vas'kovskiy. Very large magnetoimpedance effect in FeCoNi ferromagnetic tubes with high order magnetic anisotropy// *J. Appl. Phys.*-2001.-V.90.-P.6280-6286.

19. M. Tejedor, B. Hernando, M.L. Sánchez, V.M. Prida, G.V. Kurlyandskaya, D. Garcia, M. Vázquez. Frequency dependence of hysteretic magnetoimpedance in CoFeMoSiB amorphous ribbons// J. Magn. Magn. Mater.-2000.-V.215-216.-P. 425-427.
20. G.V. Kurlyandskaya, J.M. Barandiarán, M. Vázquez, D. Garcia, J. Gutiérrez, V.O. Vasíkovskiy, V.N. Lepalovskij. The magnetoresistance contribution to the total magneto-impedance of thin films: a simple model and experimental basis// J. Magn. Magn. Mater.-2000.-V.215-216.-P.516-518.
21. G.V. Kurlyandskaya, J.M. Barandiarán, M. Vázquez, D. Garcia, Dmitrieva N.V. Influence of geometrical parameters on the giant magnetoimpedance response in amorphous ribbons// J. Magn. Magn. Mater.-2000.-V.215-216.-P.740-742.
22. G.V. Kurlyandskaya, J.M. Barandiarán, D. Garcia, J.L. Muñoz, M. Vázquez, J. Gutiérrez, V.O. Vasíkovskiy. Frequency dependence of giant magnetoimpedance effect in CuBe/CoFeNi plated wire with different types of magnetic anisotropy// J. Appl. Phys.-2000.-V.87.-P.4822-4824.
23. G.V. Kurlyandskaya, M. Vázquez, J.L. Muñoz, D. García, J. McCord. Effect of induced magnetic anisotropy and domain structure features on Magneto impedance in stress annealed Co-rich amorphous ribbons// J. Magn. Magn. Mater.1999.-V.197.-P.259-261.
24. N.V. Dmitrieva, G.V. Kurlyandskaya, V.A. Lukshina, A.P. Potapov. The recovery kinetics of the magnetic anisotropy induced by stress annealing of the amorphous Co-based alloy with low Curie temperature// J. Magn. Magn. Mater.1999.-V.197.-P.320-321.
25. G.V. Kurlyandskaya, J.M. Barandiarán, J. Gutiérrez, D. Garcia, M. Vázquez, V.O. Vasíkovskiy. Magneto-impedance effect in CoFeNi plated wire with ac annealing destabilized domain structure// J. Appl. Phys.-1999.-V.85.-P.5438-5440.
26. D. Garcia, J.L. Muñoz, G.V. Kurlyandskaya, M. Vazquez, M. Ali, M.R.J. Gibbs. Induced anisotropy, magnetic domain structure, and magnetoimpedance effect in CoFeB amorphous thin films// J. Magn. Magn. Mater.-1999.-V.191.-P.339-344.
27. D. Garcia, G.V. Kurlyandskaya, M. Vazquez, F.I. Toth, L.K. Varga. Influence of field annealing on the hysteretic behaviour of the giant magnetoimpedance effect of Cu wires covered with Ni₈₀Fe₂₀ outer shells// J. Magn. Magn. Mater.-1999.-V.203.-P.208-210.

28. G.V. Kurlyandskaya, J.M. Garcia-Beneytez, M. Vazquez, J.P. Sinnecker, V.A. Lukshina, A.P. Potapov. The influence of field- and stress- induced magnetic anisotropy on the magnetoimpedance in nanocrystalline FeCuNbSiB alloys// J. Appl. Phys.-1998.-V.83.-P.6581-6583.
29. J.P. Sinnecker, P. Tiberto, G.V. Kurlyandskaya, E.H.C.P. Sinnecker, M. Vazquez, A. Hernando. Hysteretic giant magnetoimpedance// J. Appl. Phys.-1998.-V.84.-P.5814-5816.
30. G.V. Kurlyandskaya, N.V. Dmitrieva, T.Ye. Zayarnaya, V.A. Lukshina, A.P. Potapov. The termomechanical treatment of an amorphous Co-based alloy with low Curie temperature// J. Magn. Magn. Mater.-1996.-V.160.-P.307-308.

Перечень публикаций по теме диссертации в рецензируемых научных журналах и изданиях, не входящих в список ВАК

1. A. Saad, J.A. Garcia, J.D. Santos, L. Elbaile. Influence of the residual stresses and their relaxation on the giant magnetoimpedance of CoFeSiB metallic glasses// Jpn. J. Appl. Phys. – 2005.- 44.- P.4939-4044.
2. G.V. Kurlyandskaya, V.M. Prida, B. Hernando, J.D. Santos, M.L. Sánchez, M. Tejedor. GMI sensitive element based on commercial Vitrovac amorphous ribbon// Sensors and Actuators A.-2004.-V.-110.-P.228-231.
3. G.V. Kurlyandskaya, A. García-Arribas, J.M. Barandiaran. Advantages of non-linear giant magnetoimpedance for sensor applications// Sensors and Actuators A.-2003.-V.-106.-P.134-139.
4. M.L. Sánchez, G.V. Kurlyandskaya, B. Hernando, V.M. Prida, J.D. Santos, M. Tejedor. Very high GMI effect in commercial Vitrovac®amorphous ribbons, Sensors and Actuators A.-2003.-V.-106.-P.195-198.
5. M.A. Cerdeira, G.V. Kurlyandskaya, A. Fernandez, M. Tejedor, H. García-Miquel. Giant magnetoimpedance effect in surface modified CoFeMoSiB amorphous ribbons// Chin. Phys. Lett.-2003.-V.20,N°12.-P.2246-2249.
6. M.L. Sánchez, V.M. Prida, B. Hernando, G.V. Kurlyandskaya, J.D. Santos, M. Tejedor, M. Vázquez. Magnetostriction dependence of the relaxation frequency in the magneto-impedance effect for amorphous and nanaocrystalline ribbons// Chin. Phys .Lett.-2002.-V.19,N.12.-P.1870-1873.

7. J.M. Barandiaran, A. García-Arribas, J.L. Muñoz, G.V. Kulandskaya, Influence of magnetization processes and device geometry on the GMI effect// IEEE Trans. Magn.-2002.-V.38,N.5.-P.3051-3056.
8. G.V. Kurlyandskaya, A. García-Arribas, J.M. Barandiarán, E. Kisker. Giant magnetoimpedance strip and coil sensors// Sensors and Actuators A.-2001.-V.91.-P.116-119.
9. G.V. Kurlyandskaya, J.M. Barandiaran, H. García-Miquel, M. Vázquez, V.O. Vas'kovskiy, A.V. Svalov. High frequency and magnitoelectrical properties of magnetoresistive memory element based on FeCoNi/TiN/FeCoNi film// Buletin de Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio.-2000.-V.39,N.4.-P.581-583.
10. M. Vazquez, G.V. Kurlyandskaya, J.M. Garcia-Beneytez, J.M. Barandiarán, J.P. Sinnecker, V.A. Lukshina, A.P. Potapov. Frequency dependence of the magnetoimpedance in nanocrystalline FeCuNbSiB alloy with high value of the transverse stress-induced magnetic anisotropy// IEEE Trans. Magn.-1999.-V.35,N.5.-P.3358-3360.
11. M. Vazquez, J.P. Sinnecker, G.V. Kurlyandskaya. Hysteretic behaviour and anisotropy fields in magneto-impedance effect// Mater. Sci. Forum.-1999.-V.302-303.-P.209-218.
12. J.M. Barandiarán, G.V. Kurlyandskaya, M. Vázquez, J. Gutiérrez, D. Garcia, J.L. Muñoz. A simple model of the magnetoresistance contribution to the magnetoimpedance effect in thin films// Phys. Stat. Sol. (a).-1999.-V.171.-R3.
13. G.V. Kurlyandskaya, M. Vázquez, E.A. Sinnecker, A.P. Zhukov, J.P. Sinnecker, A. Hernando, M. El Ghannami. Influence of various heat treatments on giant magneto-impedance effect in nanocrystalline FeSiBNbCu ribbons// Text. Microstr.-1999.-V.32.-P.269-279.
14. M. Tejedor, B. Hernando, M.L. Sánchez, V.M. Prida, G.V. Kurlyandskaya, D. Garcia, M. Vázquez. Low hysteretic magneto-impedance in nearly zero magnetostrictive amorphous alloys for magnetic field sensors// Quimica Analitica.-1998.-V.18,Supl.1.-P.83-86.
15. D. Garcia, J.L. Muñoz, G.V. Kurlyandskaya, M. Vazquez, M. Ali, M.R.J. Gibbs. Magnetic domains and transverse induced anisotropy in magnetically soft CoFeB amorphous thin films// IEEE Trans. Magn.-1998.-V.34,N.4.-P.1153-1155.
16. M. Vazquez, G.V. Kurlyandskaya, J.L. Muñoz, A. Hernando, N.V. Dmitrieva, V.A. Lukshina, A.P. Potapov. Giant magneto-impedance

effect in stress annealed Co-rich amorphous ribbons// J. Phys. IV.- 1998.-V.8.-P.143-146.

17. G.V. Kurlyandskaya. Giant Magnetoimpedance for sensor applications// Encyclopedia of Sensors.- Edited by Grimes C.A., Dickey E.C., and Pishko M.V.: American Scientific Publishers, 2006.- V.4.- P.205-237.

18. B. Hernando, P. Gorria, M.L. Sánchez, V.M. Prida, G.V. Kurlyandskaya. Magnetoimpedance in nanocrystalline alloys// Encyclopedia of Nanotechnology.- American Scientific Publishers.- 2004.-V.4.-P.949-966.

Список использованных источников

1. Антонов А.С., Гадецкий С.Н., Грановский А.Б., Дьячков А.Л., Парамонов В.П., Перов Н.С., Прокошин А.Ф., Усов Н.А., Лагарьков А.Н. Гигантский магнитоимпеданс в аморфных и нанокристаллических мультислоях// ФММ.- 1997.- Т.83.- №6.- С.61-71.

2. Usov N.A., Antonov A.S., Lagar'kov A.N. Theory of giant magnetoimpedance effect in amorphous wires with different types of magnetic anisotropy// J. Magn. Magn. Mater. 185, 159-173, 1998.

3. Gromov A., Korenivski V. Electromagnetic analysis of layered magnetic/conductor structures J. Phys. D: Appl. Phys 33 (2000) 773-779.

4. Chiriac H., Herea D.D., Corodeanu S. Microwire array for giant magneto-impedance detection of magnetic particles for biosensor prototype J. Magn. Magn. Mater, 311, 2007, 425-428.

5. Harrison E.P., Turney G.L., Rowe H. An impedance magnetometer// Nature.- 1935.- №135.- P.961.

6. Harrison E.P., Turney G.L., Rowe H., Gollop H. The electrical properties of high permeability wires carrying alternating current// Proc. Roy. Soc.- 1936.- V.157.- №891.- P.451-479.

7. L.D. Landau, E.M. Lifshitz, Electrodynamics of Continuous Media, Pergamon, New York, 1975.

8. 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.

9. Panina L.V., Mohri K., Bushida K., Noda M. Giant magneto-impedance and magneto-inductive effects in amorphous alloys// J. Appl. Phys.- 1994.- V.76.- P.6198-6203.
10. Beach R.S. and Berkowitz A.E. Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire// Appl. Phys. Lett.- 1994.- V.64.- P.3652-3654.
11. Masumoto T., Ohnaka I., Inoue A., Hagiwara M. Production of Pd-Cu-Si amorphous wires by melt spinning method using rotating water// Scripta. Metall.- 1981.- V.15.- P.293-296.
12. Хандрих К., Кобе С. Аморфные ферро- и ферримагнетики. Пер. с нем.-М.: Мир, 1982.- 293 с.
13. Humphrey F.B., Mohri K., Yamasaki J., Kawamura H., Malmhall L., Ogasawara I. Re-entrant magnetic flux reversal in amorphous wires // Proceedings of Symposium on Magnetic Properties of Amorphous Metals.- Edited by Hernando A., Madurga, V., Sánchez, M.C. and Vázquez, M. et al.- Amsterdam: Elsevier, 1987.- P.110-115.
14. Глазер А.А., Клейнерман Н.М., Лукшина В.А., Потапов А.П., Сериков В.В. Термомеханическая обработка нанокристаллического сплава $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ // ФММ.- 1991.- №12.- С.56-61.
15. Baselt D.R., Lee G.U., Natesan M., Metzger S.W., Sheehan P.E., Colton R.J. Biosensor based on magnetoresistance technology// Biosensors and Bioelectronics.- 1998.- V.13.- P.731-739.
16. Beach, R.S., Smith, N., Platt C.L., Jeffers F., Berkowitz A.E., Magneto-impedance effect in NiFe plated wire // Appl. Phys. Lett.- 1996.-68 (19) 2753-2755.

Подписано в печать _____. Формат 60×84 1/16
Бумага типографская. Объём 2,5 п.л. Тираж 100. Заказ № _____
Екатеринбург, К-83, пр. Ленина, 51. Типолаборатория УрГУ.