

На правах рукописи

Семиров Александр Владимирович

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИМПЕДАНС И  
МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА  
АМОРФНЫХ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПРОВОДНИКОВ ПРИ  
ТЕРМИЧЕСКОМ, ДЕФОРМАЦИОННОМ И  
МАГНИТОПОЛЕВОМ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Специальность  
01.04.11 – Физика магнитных явлений

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена на кафедре физики  
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Иркутский государственный университет»

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор  
Курляндская Галина Владимировна

Официальные оппоненты: Аплеснин Сергей Степанович, доктор физико-  
математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО  
«Сибирский государственный аэрокосмический  
университет имени академика М.Ф. Решетнева»,  
заведующий кафедрой физики;

Грановский Александр Борисович, доктор  
физико-математических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный  
университет имени М.В.Ломоносова»,  
профессор кафедры магнетизма;

Калинин Юрий Егорович, доктор физико-  
математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО  
"Воронежский государственный технический  
университет", заведующий кафедрой физики  
твердого тела.


Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт теоретической и  
прикладной электродинамики Российской  
академии наук (ИТПЭ РАН)

Защита состоится 1 октября 2015 г. в 13:00 час. на заседании  
диссертационного совета Д 212.285.24 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский  
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»  
по адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр.Ленина, д. 51, ауд. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н.Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,

 — А.С.Овчинников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы исследования*

Особое место среди магнитомягких материалов занимают аморфные и нанокристаллические сплавы на основе переходных металлов. На сегодняшний день достаточно полно исследованы условия их получения, позволяющие формировать необходимые функциональные свойства [1, 2, 3, 4, 5]. В конце 20 века новый пик интереса к данным материалам возник в связи с обнаруженным в них высоким значением эффекта магнитоимпеданса - зависимости комплексного электрического сопротивления от внешнего магнитного поля [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Первоначально этот эффект был обнаружен в 1935 г. Харрисоном Е.П. с соавторами при исследовании железо-никелевого провода и составлял менее 20% [14, 15]. Ими же было дано его объяснение исходя из изменения под воздействием внешнего магнитного поля магнитной проницаемости материала и, соответственно, индуктивности и глубины скин-слоя при протекании по проводнику высокочастотного переменного тока. Затем, достаточно долгое время эффект магнитоимпеданса не вызывал интереса исследователей и только в начале 90-х годов 20 века на него вновь было обращено внимание.

Именно высокая магнитомягкость современных аморфных и нанокристаллических ферромагнитных материалов, обеспечивающая чрезвычайную чувствительность их магнитной проницаемости к внешнему магнитному полю и, соответственно, высокие значения эффекта магнитоимпеданса, имеющего перспективы практического использования, вновь стала причиной его активного изучения. Особенности магнитных свойств и, в частности, высокие значения магнитной проницаемости данных материалов были успешно объяснены в рамках модели случайной магнитной анизотропии [16, 17, 18, 19].

Относительное изменение модуля импеданса аморфных и нанокристаллических магнитомягких проводников в магнитных полях напряженностью порядка единиц Эрстед может превышать 100%. Ввиду высокого значения этот эффект часто стали именовать эффектом гигантского магнитоимпеданса (ГМИ - эффект) [9]. Максимальные значения ГМИ - эффекта, его чувствительность значительно превосходят соответствующие величины для гигантского магниторезистивного эффекта активно используемого в сенсорной технике. При этом высокая прочность и коррозионная стойкость аморфных материалов позволяет говорить о возможности их использования даже в экстремальных условиях эксплуатации, что создает перспективы широкого применения магнитоимпедансного эффекта в датчиках слабых магнитных полей, в том числе, создаваемых маркированными биологическими объектами [20].

Достаточно часто понятие «магнитоимпедансный эффект» используется в более широком смысле, чем просто зависимость импеданса ферромагнитного проводника от внешнего магнитного поля. Ввиду того что определяющим фактором, вызывающим изменение импеданса магнитомягких материалов на

высоких частотах, является их магнитная проницаемость, под магнитоимпедансным эффектом также понимают любые изменения импеданса проводника, связанные с откликом его магнитных свойств на различные внешние воздействия. Однако в этом случае возникает некоторая терминологическая сложность в обозначении этих эффектов. Поэтому в данной работе под магнитоимпедансным эффектом понимается магнитополевая зависимость импеданса, а его изменения при деформационном и термическом воздействии на проводник рассматриваются как стрессимпедансный и термоимпедансный эффекты.

Температурная зависимость магнитной проницаемости аморфных и нанокристаллических магнитомягких проводников является одним из ключевых факторов, определяющих области возможного применения и рабочие диапазоны магнитоимпедансных измерительных преобразователей. В ряде работ рассматривались термоиндуцированные изменения импеданса магнитомягких проводников [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30], однако некоторые аспекты теплового влияния на импеданс оставались слабо исследованными. В частности, это относилось к поведению импеданса и ГМИ - эффекта при температурах ниже комнатных, а также к их изменению вблизи температуры Кюри. Исследование импеданса аморфных сплавов в области ферромагнитного фазового перехода представляется особенно интересным, так как значительное изменение магнитной проницаемости должно приводить к существенным изменениям импеданса, что может быть использовано для создания высокочувствительных тепловых преобразователей. Не меньший интерес представляют исследования эффекта магнитоимпеданса упругодеформированных аморфных и нанокристаллических магнитомягких материалов вблизи температуры смены знака константы магнитострикции. Актуально и изучение термоиндуцированных изменений магнитоимпеданса композитных сред на основе магнитоактивных проводников.

Высокая чувствительность импеданса к магнитному полю, температуре и деформациям позволяет не только создавать прецизионные преобразователи физических величин, но и выявлять тонкие особенности магнитной анизотропии, оценивать величину и знак константы магнитострикции, изучать особенности структурной релаксации и кристаллизации аморфных магнитомягких проводников.

**Цель работы** - выявление механизмов влияния на высокочастотный электрический импеданс и магнитные свойства магнитомягких проводников термического, деформационного, магнитополевого и их комплексного воздействий.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение ряда основных **задач**:

1. Развитие методологии исследований и разработка измерительного обо-

рудования для изучения высокочастотного электрического импеданса и магнитных свойств магнитомягких проводников в условиях теплового, деформационного, магнитополевого и их совместного воздействий.

2. Изучение отдельного и совместного влияния термического, деформационного и магнитополевого воздействий на высокочастотные электрические и магнитные свойства аморфных и нанокристаллических магнитомягких проводников цилиндрической и планарной геометрии.

3. Изучение особенностей влияния режимов термообработки аморфных магнитомягких проводников на электрический импеданс и магнитные свойства, а также их изменения при тепловом, деформационном и магнитополевым воздействиях на проводник.

4. Оценка применимости метода магнитоимпедансной спектроскопии для изучения процессов структурной релаксации и кристаллизации аморфных магнитомягких проводников.

5. Изучение особенностей магнитоимпеданса композитных материалов на основе магнитомягких проводников.

Исследования изменений импеданса магнитомягких проводников при тепловом, деформационном и магнитополевым воздействиях, а также температурные исследования электросопротивления и магнитострикции магнитомягких проводников выполнены на кафедре физики ФГБОУ ВПО «Восточно - Сибирская государственная академия образования». Изучение магнитных свойств проводников проводилось на кафедре физики Восточно - Сибирской государственной академии образования, в Иркутском государственном университете, Уральском федеральном университете и в Институте физики металлов УрО РАН. Рентгеноструктурные и электронномикроскопические исследования изучаемых материалов проведены в Институте геохимии СО РАН и Институте физики металлов УрО РАН.

***На защиту выносятся:***

1. Результаты исследований отдельного и совместного влияния теплового, деформационного и магнитополевого воздействий на высокочастотный импеданс и магнитные свойства аморфных и нанокристаллических ферромагнитных проводников, а также композитных материалов на их основе.

2. Результаты исследований влияния различных видов термообработок аморфных магнитомягких лент и проводов на их магнитные и высокочастотные электрические свойства.

3. Методические подходы к исследованию магнитных и высокочастотных электрических свойств магнитомягких проводников.

***Основные новые научные результаты и положения,*** представляемые к защите:

1. Частотные зависимости действительной и мнимой компонент импедан-

са магнитомягкого низкострикционного провода и их изменения под влиянием растягивающего и магнитополевого воздействий, а также отжига электрическим током свидетельствуют о более высокой чувствительности мнимой компоненты импеданса к ориентационным изменениям намагниченности и о значительном влиянии на магнитополевые изменения импеданса механизмов перемагничивания приповерхностного слоя провода с геликоидальной магнитной анизотропией. Исходя из данных магнитоимпедансной спектроскопии и магнитных гистерезисных свойств показана возможность реализации в объеме магнитомягкого провода с низкой положительной магнитострикцией магнитной доменной структуры включающей, помимо слоев с геликоидальной и аксиальной, керн с циркулярной анизотропией.

2. Наличие интервала магнитных полей, в котором изменение высокочастотного импеданса магнитомягких проводников планарной и цилиндрической геометрии близко к нулю, обусловлено компенсационным характером магнитополевых изменений магнитных проницаемостей доменов в объеме скин-слоя.

3. Компенсационный характер изменения циркулярных магнитных проницаемостей областей с аксиальным и геликоидальным типами магнитных анизотропий при упругой деформации растяжения провода с низкой положительной магнитострикцией обуславливает наличие узкого интервала частот в котором стрессимпедансный эффект снижается до нулевых значений.

4. Термообработка аморфных сплавов на основе переходных металлов при температурах ниже температур Кюри и начала кристаллизации, а также воздействие внешнего магнитного поля при формировании нанокристаллической структуры может слабо влиять на процессы квазистатического перемагничивания магнитомягких проводников, но приводит к значительным изменениям высокочастотных электрических свойств. Высокая чувствительность метода магнитоимпедансной спектроскопии к изменениям электрических и магнитных свойств магнитомягких материалов позволяет успешно использовать его для детектирования отдельных температурных стадий процесса структурной релаксации аморфных магнитомягких сплавов.

5. Возрастающий, убывающий или экстремальный характер температурной зависимости высокочастотного импеданса магнитомягких проводников в основном обусловлен конкурирующими температурными изменениями намагниченности насыщения, константы магнитной анизотропии и электросопротивления, из которых доминирующий фактор определяется глубиной скин-слоя, температурным диапазоном, напряженностью внешнего магнитного поля и величиной механических напряжений.

6. Наличие граничной температуры, выше и ниже которой влияние упругой деформации растяжения на высокочастотный импеданс и эффект магнитоимпеданса магнитомягких аморфных проводников различно, обусловлено температурной сменой знака константы магнитострикции. Вблизи граничной температуры происходит значительный рост температурной чувствитель-

ности импеданса упругодеформированных магнитомягких проводников как планарной, так и цилиндрической геометрии.

7. Немонотонный характер температурной зависимости импеданса магнитомягких лент по мере приближения к температуре Кюри в основном обусловлен конкурирующими температурными изменениями намагниченности насыщения и константы магнитной анизотропии.

8. Нанесение на магнитомягкую ленту магнитного проводящего покрытия с отличающимися магнитными и электрическими характеристиками позволяет целенаправленно влиять на магнитополевые диапазоны с максимальной чувствительностью импеданса к магнитному полю, а также на его температурную чувствительность, особенно в области ферромагнитных фазовых переходов. Полимерное покрытие магнитомягких лент может выполнять не только их защитную функцию, но и влиять на высокочастотные электрические свойства.

9. Развита методические аспекты измерения высокочастотного электрического импеданса магнитомягких проводников при тепловом, деформационном и магнитополевом воздействиях. Разработан автоматизированный измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии, позволяющий определять электрический импеданс и компоненты импеданса проводников в частотном диапазоне ( $10^{-5} \div 110$ ) МГц, диапазонах магнитных полей до  $\pm 12$  кА/м, растягивающих сил ( $0 \div 10$ ) Н и температур ( $100 \div 720$ ) К.

#### ***Практическая значимость полученных результатов:***

Результаты проведенных исследований могут использоваться при разработке на основе магнитомягких аморфных и нанокристаллических проводников высокочувствительных импедансных датчиков магнитного поля, деформаций и температуры. Данные о высокой чувствительности компонент импеданса магнитомягкого проводника к тепловому, деформационному, магнитополевому воздействиям, а также к режимам термообработки развивают метод магнитоимпедансной спектроскопии материалов и позволяют расширить направления его применения. К основным выводам о практическом использовании полученных результатов можно отнести следующие:

1. Показана применимость метода магнитоимпедансной спектроскопии для детектирования отдельных температурных стадий процесса структурной релаксации аморфных магнитомягких сплавов.

2. Показано, что детектирование деформационного и магнитополевого воздействий на магнитомягкие проводники по мнимой компоненте импеданса повысит чувствительность стрессимпедансных и магнитоимпедансных преобразователей.

3. Предложен метод определения константы магнитострикции насыщения исходя из магнитоимпедансных и стрессимпедансных зависимостей.

4. Использование обнаруженного узкого интервала частот переменного тока, в котором при упругой деформации растяжения близко к нулю измене-

ние импеданса аморфного магнитомягкого провода с низкой положительной магнитострикцией, повысит температурную стабильность магнитоимпедансных датчиков и линейность термоимпедансных датчиков функционирующих на его основе.

5. Предложен способ минимизации влияния температурного фона на чувствительность магнитоимпедансных датчиков путем создания композита, состоящего из аморфного магнитомягкого провода с низкой положительной магнитострикцией и нанесенного на него вспомогательного слоя, с коэффициентами линейного теплового расширения и модулями Юнга обеспечивающими компенсацию теплового изменения импеданса упругой деформацией растяжения.

6. Обнаруженные вблизи температуры смены знака константы магнитострикции высокие значения температурной чувствительности импеданса упругодеформированных магнитомягких проводников, достигающие 3%/К для аморфных лент сплава  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$ , а также резкое температурное изменение импеданса в области ферромагнитного фазового перехода, достигающее 8 %/К для аморфных лент  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ , могут быть использованы как для точного определения температур Кюри и смены знака константы магнитострикции, так и при создании высокочувствительных тепловых измерительных преобразователей.

### *Апробация работы.*

Основные результаты диссертационной работы были представлены на более чем 30 Международных и Всероссийских научных семинарах, конференциях и симпозиумах: Международная конференция «Магнитные материалы и их применение» (Минск, 1998); Moscow International Symposium on Magnetism (Moscow - 1999, 2005, 2008, 2011, 2014); Международная школа-семинар «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (Москва, 2000, 2002, 2006); Международная конференция «Аморфные прецизионные сплавы» (Москва, 2000); Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии» (Иркутск, 2001, 2003, 2008, 2010, 2012, 2014); Международная конференция «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов» (Воронеж, 2005, 2007); Eight International Workshop on Non-Crystalline Solids (Gijon, Spain, 2006); Всероссийская научно-техническая конференция «Методы создания, исследования материалов, приборов и экономические аспекты микроэлектроники» (Пенза, 2006); Thirteenth international conference on liquid and amorphous metals (Екатеринбург, 2007); Всероссийская конференция по наноматериалам НАНО (Екатеринбург, 2009; Звенигород, 2013); Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (Москва, 2009; Астрахань, 2012); Пятая Российская научно-практическая конференция «Физические свойства металлов и сплавов» (Екатеринбург, 2009); International Conference and Seminar on Micro/Nano Electron Devices EDM'2010 (Erlagol, 2010); IV Euro-Asian symposium "Trends in magnetism"



(Ekaterinburg, 2010); Recent Trends in Nanomagnetism, Spintronics and their Applications (Ordizia, Spain, 2011); II Международная научно-техническая конференция "Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2012)" (Тольятти, 2012); III Российская конференции с международным участием "Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения" (Москва, 2012); XIII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, 2012); V Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (Владивосток, 2013 г.); VI Международная школа «Физическое материаловедение» (Новочеркасск, 2013 г.).

### ***Публикации.***

По направлению исследований опубликовано 32 работы. Из них в рецензируемых научных изданиях представлено 29 статей: 23 статьи в журналах из списка ВАК (журналы и их переводные версии входят в международные базы данных научного цитирования); 6 статей опубликовано в зарубежных журналах, также входящих в международные базы данных научного цитирования Web of Science и Scopus. Депонирована в ВИНТИ 1 печатная работа. Получено 2 патента на изобретения.

Частично результаты исследований отражены в отчетах по двум руководимым проектам РФФИ: 05-08-18063-а «Магнитоимпедансные и магнитоупругие свойства аморфных и нанокристаллических сплавов на основе переходных металлов»; 09-08-00406-а «Термостабильность магнитоимпедансных характеристик аморфных и наноструктурированных ферромагнитных сплавов», а также в 3 диссертационных работах на соискание ученой степени к.ф.-м.н. защищенных руководимыми аспирантами.

***Личный вклад автора*** заключается в самостоятельном выборе направления исследований, постановке задач и определении путей их решения, анализе экспериментальных данных. Представляемые к защите результаты получены либо лично автором, либо под его руководством и при непосредственном участии руководимыми им аспирантами.

***Структура и объем диссертации.*** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем работы 266 страниц, включая 119 рисунков и 3 таблицы. Список цитированной литературы содержит 221 наименование.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, формулируются цель и задачи исследования, приводятся основные новые научные результаты и положения выносимые на защиту, формулируется практическая значимость полученных результатов, даются сведения об апробации работы, кратко излагается ее структура и содержание.

**В первой главе** рассмотрены основные методические подходы к исследованию высокочастотных свойств магнитомягких проводников и особенностей их изучения при тепловом, деформационном и магнитополемом воздействиях на проводник. Дано краткое описание разработанных экспериментальных установок (*параграфы 1.1 – 1.3*). Так, разработанный на базе прецизионного анализатора импеданса Agilent 4294A автоматизированный измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии с системой компенсации геомагнитного и техногенных магнитных полей обеспечивает измерение импеданса и его компонент на частотах до 110 МГц в магнитных полях до  $\pm 150$  Э, диапазоне температур  $-170$  °С до  $450$  °С, при воздействии растягивающих сил до 10 Н в измерительной ячейке адаптированной для исследований проводов и лент сечением от  $10^{-6}$  м<sup>2</sup> до  $10^{-9}$  м<sup>2</sup>, а также при воздействии на образец постоянного подмагничивающего электрического тока величиной от 0 до  $\pm 100$  мА (рис. 1). Приведены данные о погрешности измерений.

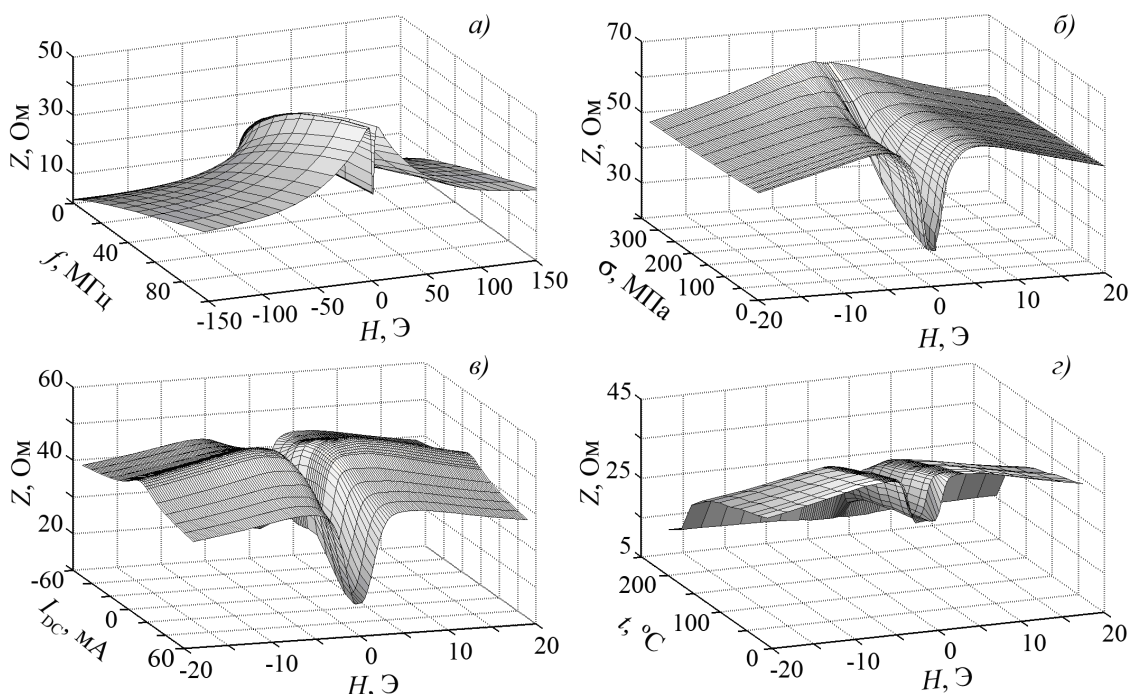


Рис. 1: Зависимости импеданса  $Z$  аморфного провода на основе кобальта от внешнего магнитного поля  $H$  и от: частоты переменного тока  $f$  - (а); упругих напряжений  $\sigma$  - (б); постоянного электрического тока  $I_{DC}$  - (в); температуры  $t$  - (г).

В *параграфе 1.4* рассмотрены особенности влияния механизма крепления

магнитомягкого проводника на его высокочастотный импеданс и его температурные изменения. Показано, что при жесткой фиксации образца в держателе, изменение температурного фона приводит к возникновению в нем механических напряжений вследствие различия температурных коэффициентов расширения образца и держателя. В этом случае, возникающие в образце, жестко зафиксированном в держателе, термодиформационные механические напряжения, могут значительно влиять на его магнитные и электрические свойства. Учет данного фактора особенно важен при проведении температурных исследований высокочастотного импеданса магнитомягких материалов ввиду высоких значений стрессимпедансного эффекта. Величину возникающих механических напряжений можно оценить зная коэффициенты температурного расширения материала держателя  $\alpha_d$  и закрепленного образца  $\alpha_f$ :

$$\sigma_T = |\alpha_d - \alpha_f| \cdot |T - T_0| \cdot E \quad (1)$$

где  $E$  — модуль Юнга материала образца,  $T$  — температура, при которой ведется измерение,  $T_0$  — температура, при которой образец был закреплен в держатель. Расчетные значения  $\sigma_T$  для  $\Delta T = 100\text{К}$  и значений  $\alpha$  и  $E$  характерных для используемых материалов дают величину порядка десятков МПа, что достаточно для значительного изменения импеданса магнитомягкого проводника (рис. 2).

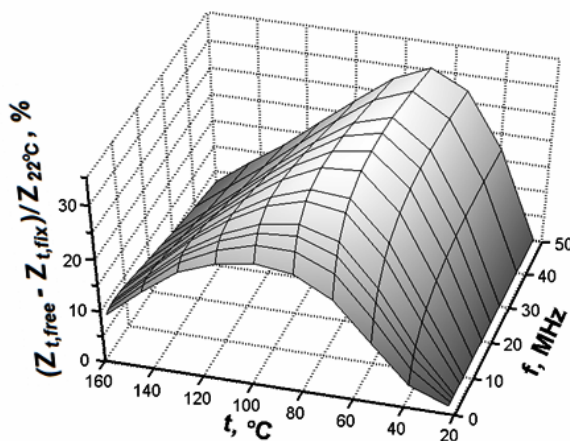


Рис. 2: Температурно-частотная зависимость относительного различия значений импеданса магнитомягкого проводника при его свободной  $Z_{t,free}$  и жесткой  $Z_{t,fix}$  фиксации в измерительной ячейке.

В параграфе 1.5 рассмотрено влияние собственного импеданса токоподводящей системы на измеряемые значения импеданса и величины магнитоимпедансного эффекта. Данный вопрос принципиален при измерении импеданса по схеме стабилизации переменного тока последовательным соединением образца с высокоомной активной нагрузкой. Показана высокая степень влияния собственного импеданса токоподводящей системы не только на измеряемые

значения импеданса, но и на частотную зависимость эффекта магнитоимпеданса.

**Во второй главе** рассмотрено влияние на импеданс и магнитную проницаемость магнитомягких сред взаимной ориентации оси легкого намагничивания, внешнего магнитного поля, оси высокочастотного электрического тока и ориентации переменного магнитного поля (*параграф 2.1*). Дано объяснение ряда особенностей экспериментальных магнитополевых зависимостей импеданса и магнитной проницаемости аморфных лент состава  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$ . Рассмотрено влияние на высокочастотные магнитные и электрические свойства магнитной доменной структуры и динамических свойств доменных границ. В частности, показано, что причиной слабого влияния внешнего магнитного поля, ориентированного вдоль оси легкого намагничивания на высокочастотные импеданс и поперечную магнитную проницаемость является близкий к компенсационному характер изменения магнитных проницаемостей соседних полосовых доменов в магнитных полях меньших поля перехода ленты в однодоменное состояние.

Исходя из рассмотрения частотной зависимости импеданса магнитомягкого провода с аксиальной магнитной анизотропией, определяемой согласно классическому выражению [31]:

$$\dot{Z} = -\frac{j\omega}{c^2}L_e + \frac{1}{2}R_{DC}ra\frac{J_0(ra)}{J_1(ra)} \quad (2)$$

где  $r = (1+j)/\delta$ ,  $j$  — мнимая единица,  $\delta = c\sqrt{\rho/2\pi\omega\mu_\phi}$  — глубина скин-слоя,  $c$  — скорость света,  $\omega$  — циклическая частота переменного электрического тока,  $\mu_\phi$  — циркулярная магнитная проницаемость,  $R_{DC}$  — сопротивление постоянному току (электросопротивление),  $L_e$  — внешняя часть самоиндукции провода,  $J_0$  и  $J_1$  — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка, соответственно, и циркулярных магнитных проницаемостей, вычисляемых на основе квазистатической модели вращения намагниченности и тензора магнитной проницаемости, определяемого уравнением движения вектора намагниченности с учетом диссипативного члена (уравнение Ландау—Лифшица—Гильберта), показана применимость вычисления импеданса магнитомягкого проводника на частотах до 100 МГц используя квазистатический подход в нахождении  $\mu_\phi$  (*параграф 2.2*).

В ходе исследований импеданса аморфного магнитомягкого провода с низкой положительной константой магнитострикции и комбинированным типом магнитной анизотропии было обнаружено, что переход от монотонного уменьшения к возрастанию мнимой компоненты импеданса под влиянием растягивающего и магнитополевого воздействий начинает проявляться на значительно более низких частотах по сравнению с соответствующими изменениями действительной компоненты импеданса, что свидетельствует о более высокой чувствительности мнимой компоненты импеданса к ориентационным измене-

ниям намагниченности в объеме провода (рис. 3). Поэтому, детектирование деформационного и магнитополевого воздействий на магнитомягкие проводники по мнимой компоненте импеданса позволит повысить чувствительность стрессимпедансных и магнитоимпедансных преобразователей, а компонентный анализ импеданса расширит возможности метода магнитоимпедансной спектроскопии материалов.

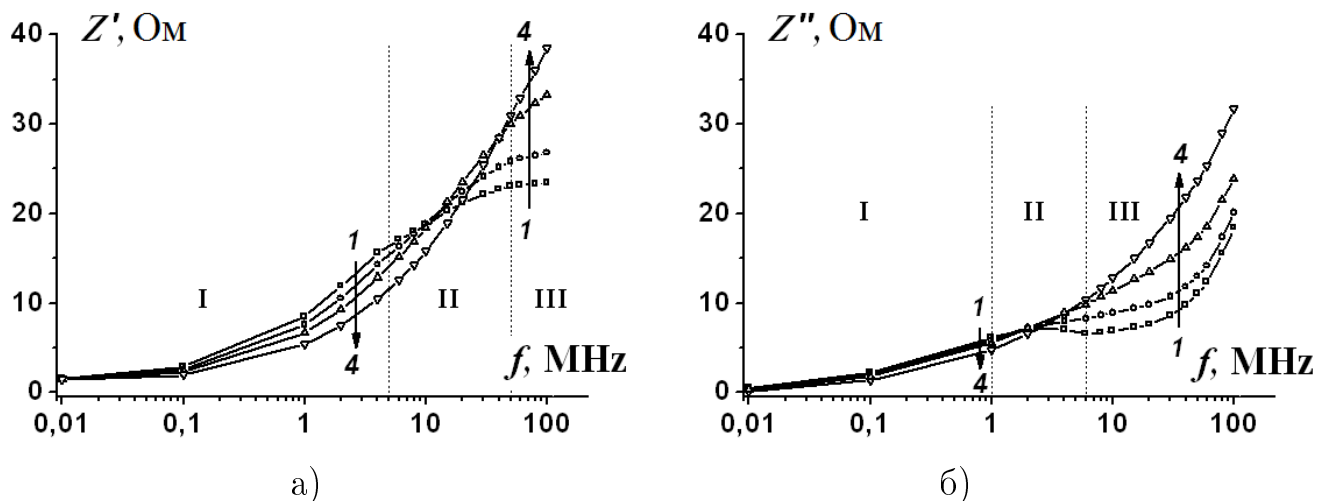


Рис. 3: Частотные зависимости действительной  $Z'$  (а), мнимой  $Z''$  (б) компонент импеданса аморфного провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  радиусом 85 мкм при разных значениях упругих растягивающих напряжений: кривая 1 – 0 МПа; 2 – 96 МПа; 3 – 173 МПа; 4 – 327 МПа.

Наличие узкого интервала частот, в котором изменение импеданса магнитомягкого провода с комбинированным типом магнитной анизотропии при его упругой деформации растяжения становится минимальным, обусловлено компенсационным характером изменений магнитных проницаемостей областей провода с аксиальным и геликоидальным типами магнитных анизотропий. Этот эффект может быть использован в магнитопольевых и температурных датчиках на основе эффекта магнитоимпеданса с целью минимизации влияния деформации провода на импеданс и его компоненты.

Анализ частотных зависимостей импеданса, его действительной и мнимой компонент, их отклика на магнитополевое и деформационное воздействия, квазистатических магнитных гистерезисных свойств аморфного магнитомягкого провода с низкой положительной магнитострикцией позволил сделать вывод о возможности реализации в нем магнитной доменной структуры, включающей, помимо слоев с геликоидальной и аксиальной, kern с циркулярной анизотропией. Применительно к аморфному проводу состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  радиусом  $a = (75 \div 90)$  мкм оценка размеров областей с разным типом магнитной анизотропии, вытекающая из импедансных и магнитометрических исследований, дает следующие результаты: радиус керн составляет около 25% от радиуса провода; толщины последующих слоев с ак-

сиальной и геликоидальной ориентациями намагниченности  $\sim 70\%$  и  $\sim 5\%$ , соответственно.

При протекании по магнитомягкому проводу постоянного электрического тока  $I_{DC}$  магнитолевая зависимость высокочастотного импеданса  $Z(H)$  будет асимметричной, если приповерхностный слой с геликоидальной магнитной анизотропией находится в однодоменном состоянии, либо в нем доминирует объем доменов циркулярная компонента намагниченности которых совпадает с направлением магнитного поля постоянного электрического тока протекающего по проводу. Асимметричной будет и зависимость  $Z(I_{DC})$  при воздействии на провод аксиального магнитного поля  $H$ . Расчетные зависимости  $\mu_\phi(H)$  и  $\mu_\phi(I_{DC})$  согласуются с экспериментальными  $Z(H)$  и  $Z(I_{DC})$  (рис. 4).

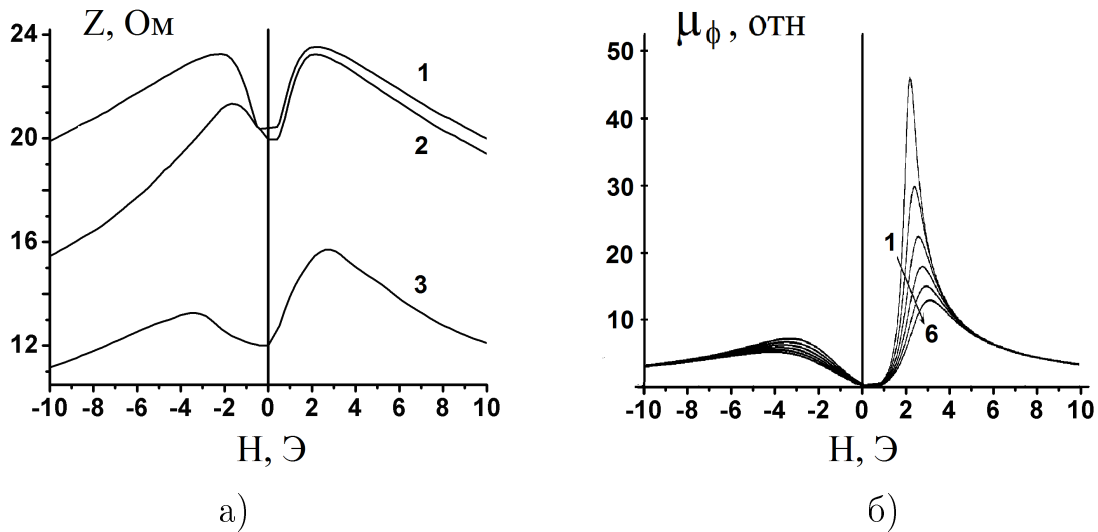


Рис. 4: Влияние постоянного подмагничивающего тока  $I_{DC}$ , протекающего магнитомягкому проводу на зависимости импеданса  $Z$  и циркулярной магнитной проницаемости  $\mu_\phi$  от внешнего аксиального магнитного поля  $H$ . (а) — Экспериментальные зависимости  $Z(H)$  на частоте переменного тока 10 МГц для аморфного провода  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  диаметром 170 мкм при значениях  $I_{DC}$ : 1 — 0; 2 — 20 мА; 3 — 60 мА. (б) — Расчетные зависимости  $\mu_\phi(H)$  для геликоидальной магнитной анизотропии с углом отклонения ЛЛН от циркулярной ориентации  $\alpha = 15^\circ$ ,  $M_S = 3,2 \cdot 10^5$  А/м,  $K = 30$  Дж/м<sup>2</sup> и значениях  $I_{DC}$  от 30 мА до 55 мА для зависимостей 1 ÷ 6, соответственно.

Наличие в магнитомягком аморфном проводе магнитной анизотропии комбинированного типа и многодоменность его приповерхностного слоя объясняют и частотные изменения зависимостей  $Z_0(I_{DC})$  (рис. 5, а). На низких частотах влияние  $\mu_\phi$  объема провода с аксиальной магнитной анизотропией на  $Z_0$  значительно и с ростом  $I_{DC}$  импеданс монотонно уменьшается. На частотах выше 6 МГц, ввиду уменьшения глубины скин-слоя, становится определяющим уже влияние на  $Z_0$  приповерхностного слоя провода с геликоидальной магнитной анизотропией. Однако и в этом случае для однодоменного состояния провода с намагниченностью циркулярная компонента которой ориен-

тирована по направлению магнитного поля тока  $I_{DC}$  с его увеличением  $\mu_\phi$  должна монотонно уменьшаться. Только наличие в приповерхностном слое доменной структуры с противоположными направлениями циркулярной компоненты намагниченности в соседних доменах объясняет переход с ростом  $f$  от монотонно убывающей зависимости  $Z_0(I_{DC})$  к зависимости имеющей два характерных участка.

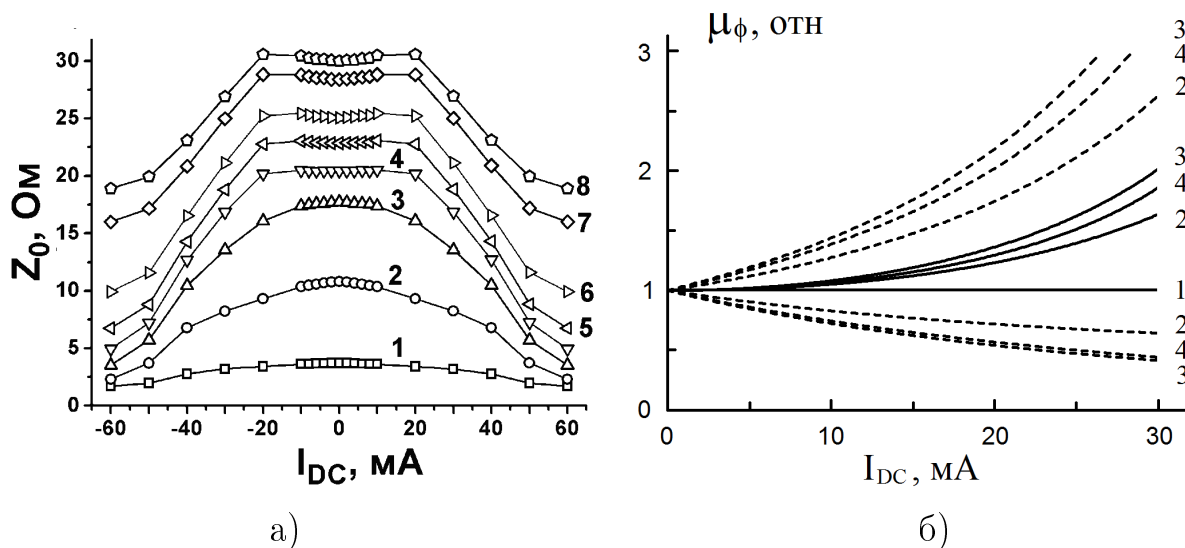


Рис. 5: (а) - Зависимости начального импеданса аморфного провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  от величины постоянного подмагничивающего электрического тока для частот переменного тока: 1 – 0,1 МГц; 2 – 1 МГц; 3 – 4 МГц; 4 – 10 МГц; 5 – 20 МГц; 6 – 40 МГц; 7 – 80 МГц; 8 – 100 МГц. (б) - Расчетные зависимости циркулярной магнитной проницаемости  $\mu_\phi$  магнитомягкого провода от величины постоянного подмагничивающего электрического тока  $I_{DC}$  при разных углах  $\alpha$  отклонения ЛЛН от циркулярной ориентации: зависимость 1 соответствует  $\alpha = 0^\circ$ ; 2 –  $1,5^\circ$ ; 3 –  $15^\circ$ ; 4 –  $30^\circ$ . Зависимости  $\mu_\phi(I_{DC})$  представленные пунктиром соответствуют однодоменному состоянию провода с противоположно ориентированными циркулярными компонентами намагниченности, сплошными линиями – многодоменному состоянию с равными по объему доменами с противоположными направлениями намагниченности.

Появление на зависимости  $Z_0(I_{DC})$  начального участка, на котором при увеличении  $I_{DC}$  до  $\sim 20$  мА (что на поверхности провода  $a = 85$  мкм соответствует магнитному полю  $H_\phi \approx 40$  А/м)  $Z_0$  либо не изменяется, либо незначительно возрастает объясняется многодоменностью структуры приповерхностного слоя провода и ее перемагничиванием вращением намагниченности. Уменьшение, с ростом  $I_{DC}$ , магнитной проницаемости доменов в которых циркулярная компонента намагниченности совпадает с направлением магнитного поля подмагничивающего тока компенсируется ее увеличением в доменах с обратной ориентацией намагниченности (рис. 5, б). При достижении магнитным полем  $H_\phi$  величины  $H_{ст}$  поля старта доменных границ происходит переход приповерхностного слоя провода в однодоменное состояние и  $Z_0$  с увеличением  $I_{DC}$  монотонно уменьшается.

**В третьей главе** представлены результаты исследований влияния термообработок разных видов на структуру, магнитные и высокочастотные электрические свойства магнитомягких материалов цилиндрической и планарной геометрии. Показана высокая чувствительность импеданса магнитомягких аморфных материалов к процессам их структурной релаксации и кристаллизации. Рассмотрены особенности влияния процесса нанокристаллизации во внешних магнитных полях аморфных сплавов разных составов и геометрии на их импеданс. Проанализирована связь изменений импеданса аморфного магнитомягкого провода в ходе его структурной релаксации с изменениями угловой дисперсии магнитной анизотропии, магнитной доменной структурой провода и распределением в его объеме закалочных напряжений.

В *параграфе 3.1* рассмотрено влияние магнитного поля, действующего при термообработке в ходе нанокристаллизации магнитомягких лент сплавов  $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{16,5-x}\text{B}_{6+x}\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  ( $x = 0; 3$ ), на их структуру, магнитные свойства и импеданс. В частности, показано, что воздействие постоянного поперечного магнитного поля при термообработке аморфных лент состава  $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  слабо влияет на формируемую нанокристаллическую структуру и процессы квазистатического перемагничивания (рис.6), но приводит к значительным изменениям их высокочастотных электрических и магнитных свойств.

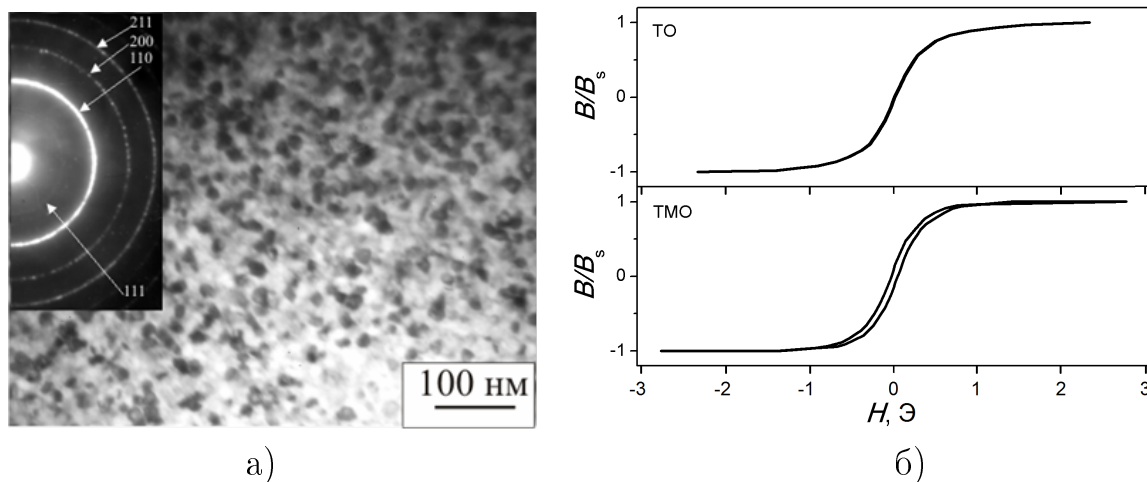


Рис. 6: Светлопольное изображение микроструктуры и картина микродифракции сплава  $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  прошедшего термообработку (ТО) при  $520^\circ\text{C}$ . Кроме линий твердого раствора  $\alpha\text{-Fe}$  ((110), (200) и (211)) видна слабая линия (111) от фазы  $\text{Fe}_3\text{Si}$  - (а). Квазистатические петли гистерезиса, измеренные на лентах сплава  $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ , подвергнутых термообработкам видов ТО и ТМО - (б).

Влияние термообработки электрическим током аморфных лент и проводов на основе  $\text{Co}$  и  $\text{Fe}$  на их структуру, магнитные и электрические свойства рассмотрено в *параграфе 3.2*. В частности, определены диапазоны плотностей токов отжига аморфных лент состава  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$  в которых



характер изменений их импеданса различен (рис.7), показаны влияние наведения поперечной магнитной анизотропии на магнитоимпеданс и возможность магнитоимпедансного детектирования термоиндуцированных изменений электрических и магнитных свойств магнитомягких материалов.

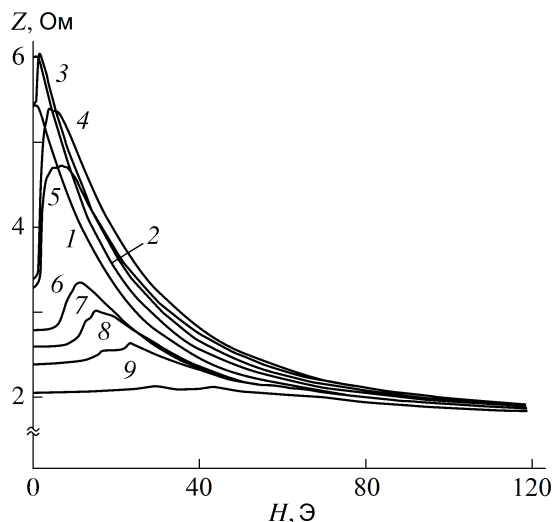


Рис. 7: Зависимости импеданса от внешнего магнитного поля для лент сплава  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{V}_{11}$  подвергнутых отжигу переменным электрическим током плотностью: 1 —  $J = 0$ ; 2 —  $30 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 3 —  $35 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 4 —  $40 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 5 —  $45 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 6 —  $50 \text{ A/m}^2$ ; 7 —  $55 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 8 —  $60 \text{ A/m}^2$ ; 9 —  $65 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ . Частота переменного тока 10 МГц.

Для детектирования и определения характера структурных изменений аморфных магнитомягких сплавов в ходе их отжига электрическим током информативность и чувствительность метода магнитоимпедансной спектроскопии можно значительно повысить, анализируя зависимости импеданса и его компонент от упругих растягивающих напряжений, а также магнитопольные зависимости импеданса упругодеформированных материалов. Так, упругая деформация растяжения проводов состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{V}_{15}$ , подвергнутых отжигу током разной плотности  $J$ , вызывает расщепление интервала значений импедансов на три диапазона, в каждом из которых импедансы упругодеформированных проводов имеют близкие значения (рис. 8). Вероятной причиной наличия этих диапазонов  $J$  отжига является преимущественное протекание в них различных процессов структурной перестройки сплавов, вызывающих изменения импедансных свойств провода.

В ходе исследований отжига постоянным электрическим током аморфного провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{V}_{15}$  также показано, что степень и характер изменений высокочастотного импеданса и его компонент определяются не только величиной плотности тока отжига, но и частотой переменного тока. Так, наибольшие изменения мнимой компоненты импеданса происходят в диапазоне частот соответствующих глубине скин-слоя, близкой к толщине

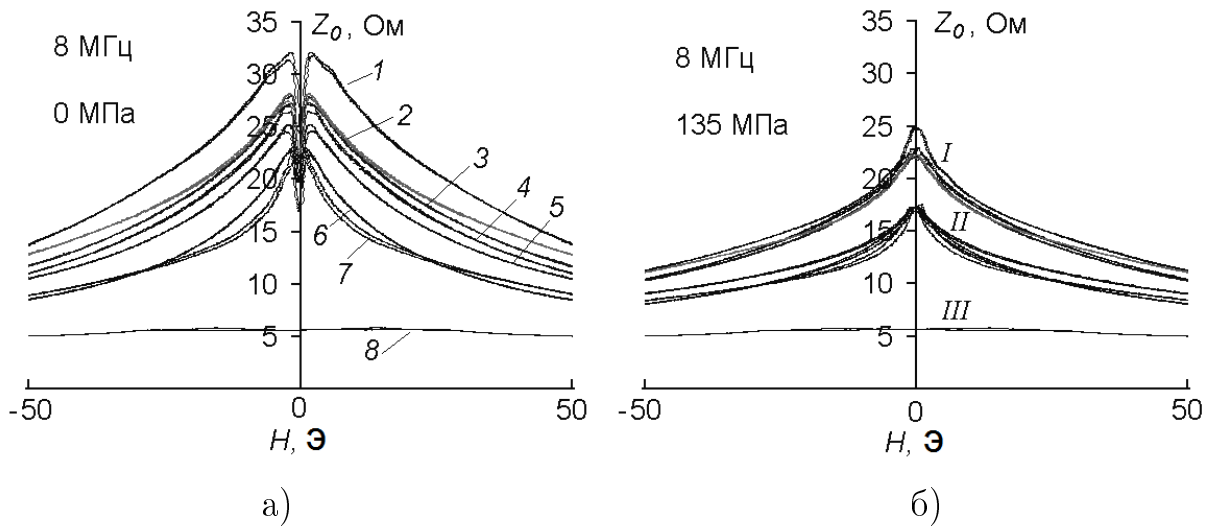


Рис. 8: Влияние плотности тока отжига  $J$  аморфного провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  на зависимости импеданса  $Z$  от внешнего аксиального магнитного поля  $H$ . (а) –  $\sigma = 0$ : 1 –  $J = 0$ ; 2 –  $4,2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 3 –  $6,2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 4 –  $12,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 5 –  $25 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 6 –  $31 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 7 –  $33,3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 8 –  $35,4 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ . (б) –  $\sigma = 135 \text{ МПа}$ : группа зависимостей  $Z(H)$  – I соответствует диапазону значений  $J = (0 \div 12,5 \cdot 10^6) \text{ A/m}^2$ , II –  $(25 \cdot 10^6 \div 33,3 \cdot 10^6) \text{ A/m}^2$ , III –  $J = 35,4 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ .

приповерхностного слоя провода с геликоидальной магнитной анизотропией (рис.9). Причиной этого являются значительные изменения циркулярной магнитной анизотропии и ориентации векторов намагниченности в объеме провода. При отжиге током в диапазоне  $J \sim (25 \cdot 10^6 \div 33,3 \cdot 10^6) \text{ A/m}^2$ , соответствующем началу формирования в сплаве нанокристаллической структуры, изменения зависимостей  $Z(f)$  свидетельствуют об исчезновении резкой границы перехода от внутреннего слоя с аксиальной магнитной анизотропией к приповерхностному, намагниченность в котором ориентирована геликоидально. Данный вывод согласуется с изменениями стрессимпедансных зависимостей провода подвергнутого отжигу электрическим током.

*Параграф 3.3* посвящен изучению структурной релаксации аморфных сплавов и ее влияния на высокочастотный импеданс. На примере рассмотрения длительной изотермической обработки аморфного магнитомягкого провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  при температурах значительно ниже температур начала кристаллизации и Кюри показано, что высокая чувствительность метода магнитоимпедансной спектроскопии к изменениям электрических и магнитных свойств магнитомягких материалов позволяет успешно использовать его для детектирования отдельных температурных стадий структурной релаксации сплава. Исходя из различия механизмов уменьшения избыточного объема [32, 33], влияния на них распределения в объеме провода закалочных напряжений, влияния дефектной структуры сплава на угловую дисперсию  $\gamma$  магнитной анизотропии и особенностей зависимости циркулярной магнитной проницаемости от  $\gamma$  для разных видов магнитных анизотропий, дано

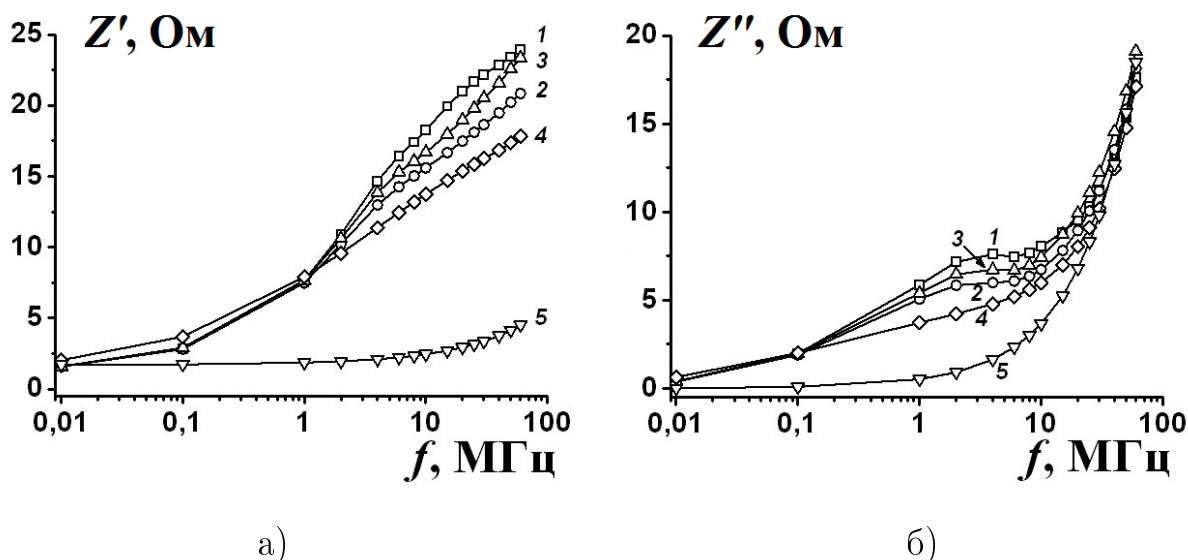


Рис. 9: Частотные зависимости действительной  $Z'$  (а) и мнимой  $Z''$  (б) компонент импеданса провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ , подвергнутого отжигу постоянным электрическим током плотностью: 1 -  $J = 0 \text{ A/m}^2$ ; 2 -  $6,2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 3 -  $12,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 4 -  $31 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ; 5 -  $35,4 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ .

объяснение зависимостей импеданса от температуры термообработки и частоты переменного тока. Прикладное значение данного вида термообработки связано с повышением температурно-временной стабильности электрических и магнитных характеристик сплава при сохранении его аморфной структуры.

**В четвертой главе** рассмотрены: закономерности температурного изменения импеданса магнитомягких проводников; влияние на импеданс магнитомягких проводников совместного термического, деформационного и магнитополевого воздействий; влияние постоянного подмагничивающего электрического тока на температурные зависимости импеданса магнитомягкого провода имеющего приповерхностный слой с геликоидальной магнитной анизотропией; высокочастотные электрические свойства проводников вблизи температуры ферромагнитного фазового перехода; температурные изменения импеданса упругодеформированных ферромагнитных проводников вблизи температуры смены знака константы магнитострикции; влияние условий нанокристаллизации магнитомягких сплавов из аморфного состояния на их высокочастотные электрические свойства. Проанализированы основные факторы, определяющие температурные изменения импеданса магнитомягких проводников. Предложен метод определения константы магнитострикции насыщения магнитомягких сплавов исходя из их магнитоимпедансных и стрессимпедансных зависимостей. Предложен ряд направлений практического использования обнаруженных закономерностей.

**В параграфе 4.1** рассмотрено влияние на импеданс магнитомягкого аморфного провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  теплового воздействия и совместно с ним деформационного и магнитополевого воздействий. В отличие от элек-

тросопротивления импеданс аморфного провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  в частотном диапазоне от 0,01 МГц до 100 МГц с ростом температуры уменьшается (рис. 10). Характер изменения  $Z(t)$  близок к линейному (рис. 10), что позволяет ввести температурный коэффициент импеданса  $\varepsilon_z = \frac{\Delta Z}{Z \cdot \Delta t} = \frac{Z_t - Z_{t=22^\circ\text{C}}}{Z_{t=22^\circ\text{C}} \cdot (t - 22)}$  по аналогии с температурным коэффициентом электросопротивления. Наиболее резкие изменения  $\varepsilon_z$  испытывает в интервале частот от 100 кГц до 20 МГц. Максимальное абсолютное значение составляющее  $|\varepsilon_z| = 3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  температурный коэффициент импеданса принимает на частоте переменного тока 2 МГц при напряженности магнитного поля 35 Э (рис. 11). Увеличение электросопротивления провода с его нагревом начинает оказывать определяющее влияние на температурное изменение импеданса на частотах ниже 100 кГц при воздействии внешнего магнитного поля напряженностью  $H$  выше поля магнитной анизотропии  $H_K$ .

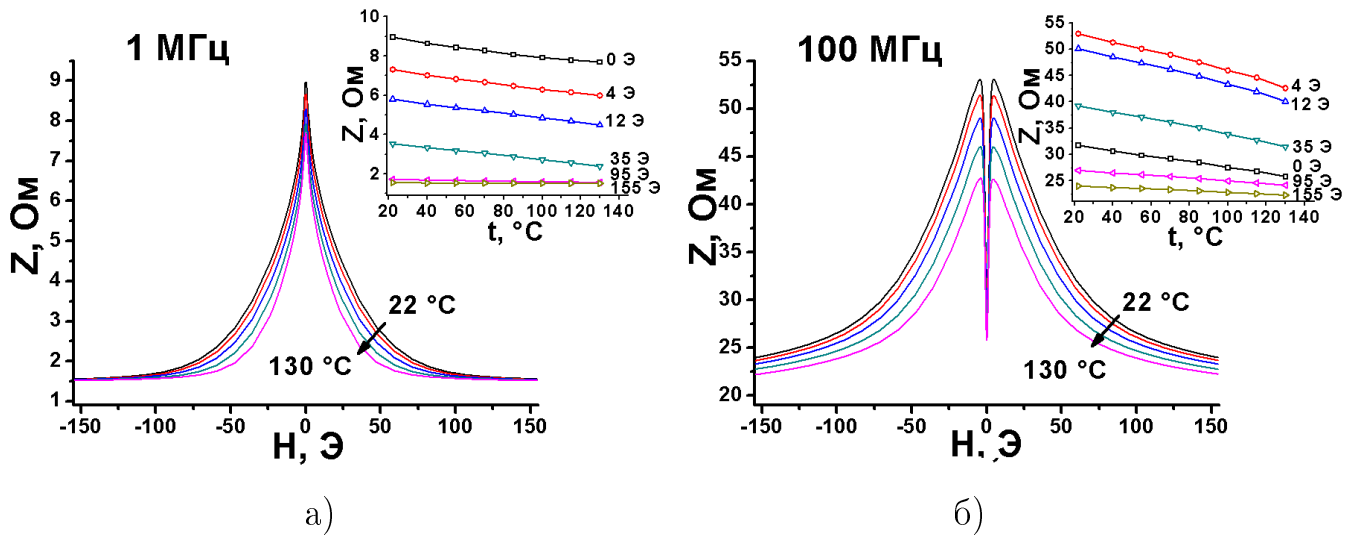


Рис. 10: Зависимости импеданса провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  от внешнего магнитного поля при разных значениях температуры и частоты пробного переменного тока: а) 1 МГц, б) 100 МГц. На вставках приведены температурные зависимости импеданса при разных значениях внешнего магнитного поля.

Показано, что на частотах выше  $\sim 10$  кГц температурное изменение импеданса аморфного провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  в основном определяется температурным изменением его магнитных свойств. Наблюдаемое уменьшение импеданса с ростом температуры обусловлено доминирующим влиянием на изменение циркулярной магнитной проницаемости температурного уменьшения намагниченности насыщения по отношению к влиянию соответствующих изменений константы анизотропии и электросопротивления  $Z \sim M_S \cdot \sqrt{\rho/K}$ . Уменьшение с ростом  $t$  напряженности внешнего магнитного поля  $H_P \sim K/M_S$ , соответствующего максимальному импедансу на частотах выше 2 МГц, связано с определяющим влиянием температурного уменьшения  $K$  по отношению к изменению  $M_S$ . Немаловажную роль на температурные

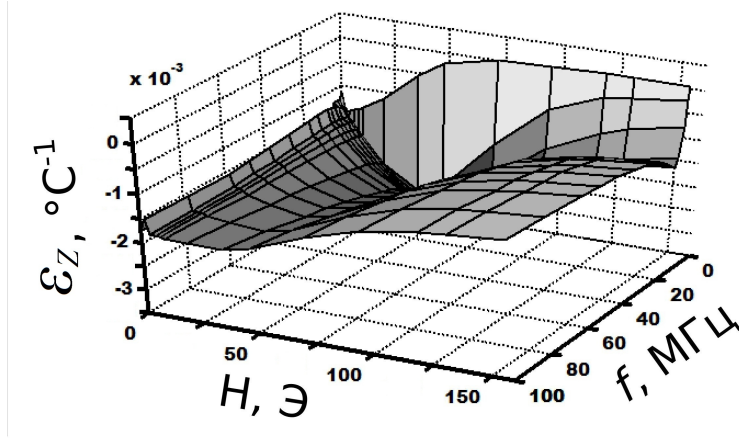


Рис. 11: Зависимости температурного коэффициента импеданса  $\varepsilon_z$  провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  от частоты  $f$  переменного тока и от внешнего магнитного поля  $H$ .

изменения  $Z$  и  $H_P$  также оказывает изменение угла отклонения линии легкого намагничивания (ЛЛН) от циркулярной ориентации ввиду снижения при нагреве провода уровня внутренних механических напряжений.

Близкие к линейным зависимости импеданса от температуры и растягивающих напряжений позволяют говорить о возможности компенсации температурных изменений начального импеданса упругой деформацией растяжения и решить актуальную проблему температурного влияния на показания магнитоимпедансных датчиков. Практическая реализация этого возможна путем создания композитного материала с соответствующими коэффициентами линейного теплового расширения для магнитоактивной среды и компенсационного слоя (рис. 12).

Основным фактором влияния постоянного подмагничивающего электрического тока на температурные зависимости начального импеданса (рис.13) и магнитополевые зависимости импеданса (рис. 14) магнитомягкого провода выступает изменение его  $\mu_\phi$  под воздействием магнитного поля постоянного электрического тока. Температурная зависимость модуля импеданса вычисленная согласно выражения (2) с учетом температурного изменения удельного электросопротивления  $\rho(t)$ , намагниченности насыщения  $M_S(t)$  и константы эффективной анизотропии  $K(t)$  для однодоменного состояния приповерхностного слоя провода с геликоидальной магнитной анизотропией в целом согласуется с экспериментом, однако не объясняет тенденцию перехода с увеличением  $I_{DC}$  монотонно убывающей зависимости  $Z_0(t)$  к экстремальной, а также появление на ней участка с резким ростом температурного коэффициента  $Z_0$  (рис.13). Учет в этих вычислениях наличия доменной структуры в приповерхностном слое, имеющей место при  $I_{DC} \lesssim 20$  мА, несколько снижает температурное изменение импеданса.

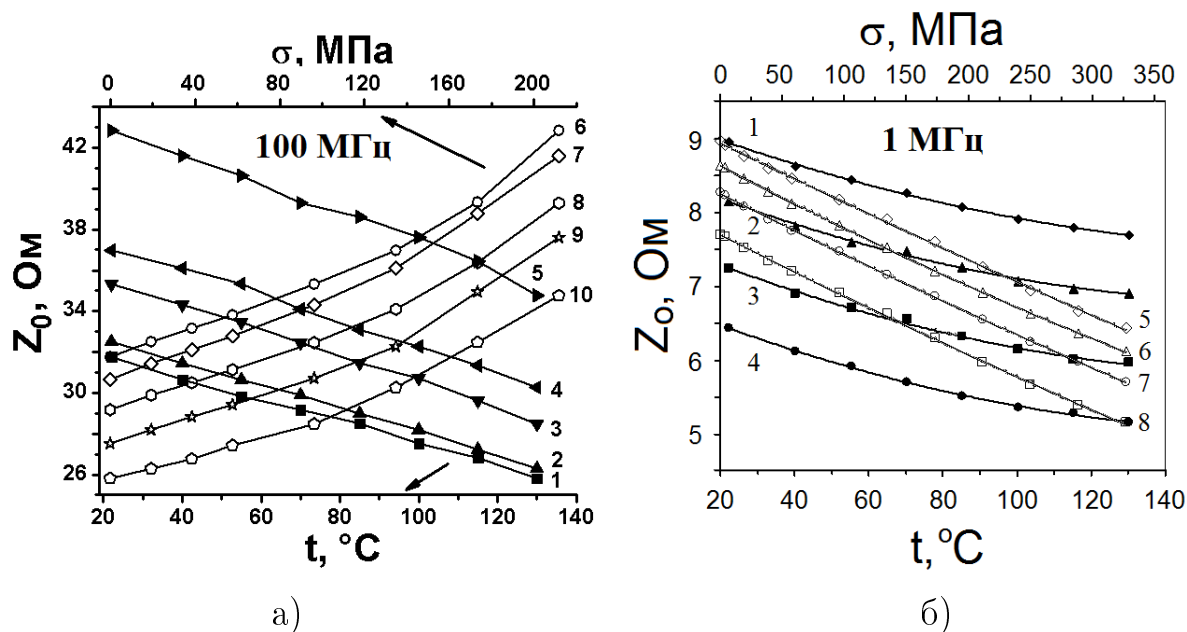


Рис. 12: Зависимости начального импеданса магнитомягкого провода от температуры при разных упругих напряжениях (темные маркеры) и от упругих растягивающих напряжений при разных температурах (светлые маркеры) на частотах 100 МГц (а) и 1 МГц (б). На рисунке — (а) зависимостям  $Z_0(t)$  соответствуют следующие значения растягивающих напряжений: 1 —  $\sigma = 0$  МПа, 2 — 19.2 МПа, 3 — 96.3 МПа, 4 — 134.8 МПа, 5 — 212 МПа; зависимостям  $Z_0(\sigma)$  соответствуют следующие температуры: 6 —  $t = 22^{\circ}\text{C}$ , 7 —  $40^{\circ}\text{C}$ , 8 —  $70^{\circ}\text{C}$ , 9 —  $100^{\circ}\text{C}$ , 10 —  $130^{\circ}\text{C}$ . На рисунке — (б) зависимостям  $Z_0(t)$  соответствуют следующие растягивающие напряжения: 1 —  $\sigma = 0$  МПа, 2 — 96 МПа, 3 — 212 МПа, 4 — 327 МПа; зависимостям  $Z_0(\sigma)$  соответствуют следующие температуры: 5 —  $t = 22^{\circ}\text{C}$ , 6 —  $40^{\circ}\text{C}$ , 7 —  $70^{\circ}\text{C}$ , 8 —  $130^{\circ}\text{C}$ .

Согласно расчету, для геликоидальной ориентации ЛЛН в приповерхностном слое провода уменьшение  $\alpha$  вызывает уменьшение  $Z_0$ , во всем исследованном диапазоне значений  $I_{DC}$  (рис.15), а рост угловой дисперсии локальных осей анизотропии  $\gamma$  приводит к увеличению  $\mu_\phi$  (рис.??) и, соответственно, импеданса. Поэтому, вероятной причиной незначительного увеличения  $Z_0$  в начале нагрева провода при относительно высоких значениях  $I_{DC}$  (малых углах отклонения намагниченности от циркулярной ориентации) является температурный рост угловой дисперсии анизотропии. При дальнейшем нагреве определяющую роль в температурном изменении  $\mu_\phi$  и  $Z_0$  начинают оказывать уменьшение намагниченности и углового отклонения ЛЛН от циркулярной ориентации.

Изменение угла  $\alpha$  также должно влиять на толщину приповерхностного слоя с геликоидальной ориентацией намагниченности. Этот вывод согласуется с тенденцией снижения с ростом температуры значения частоты переменного тока, соответствующей смене магнитополевой зависимости импеданса с максимумом при одном из направлений поля  $H_Z$  на зависимость с миниму-

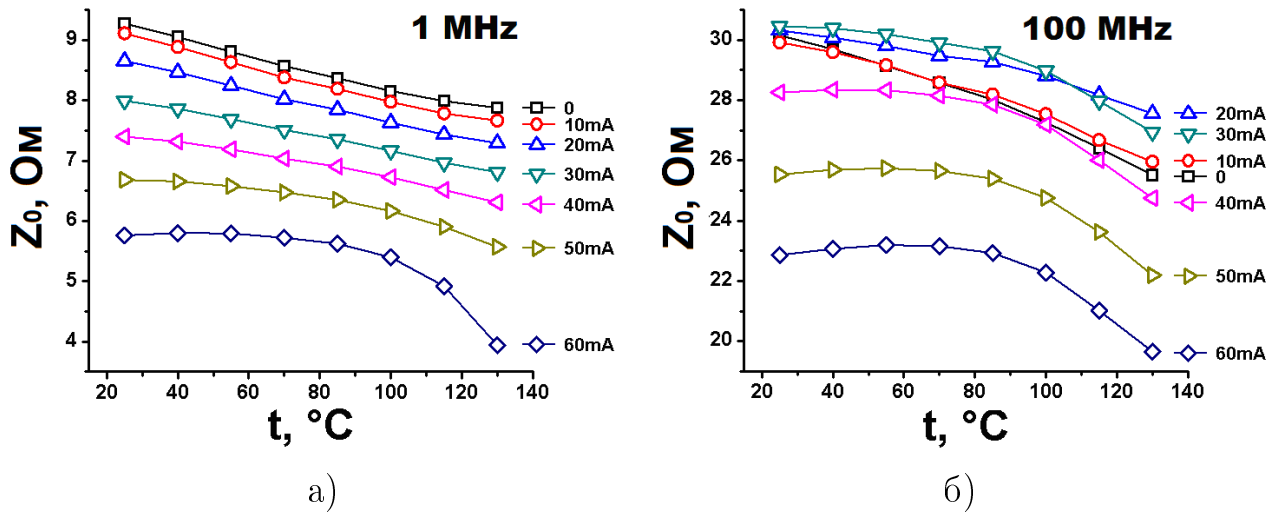


Рис. 13: Температурные зависимости начального импеданса аморфного провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  при разных значениях подмагничивающего тока. Частота переменного тока составляла 1 МГц - (а) и 100 МГц - (б).

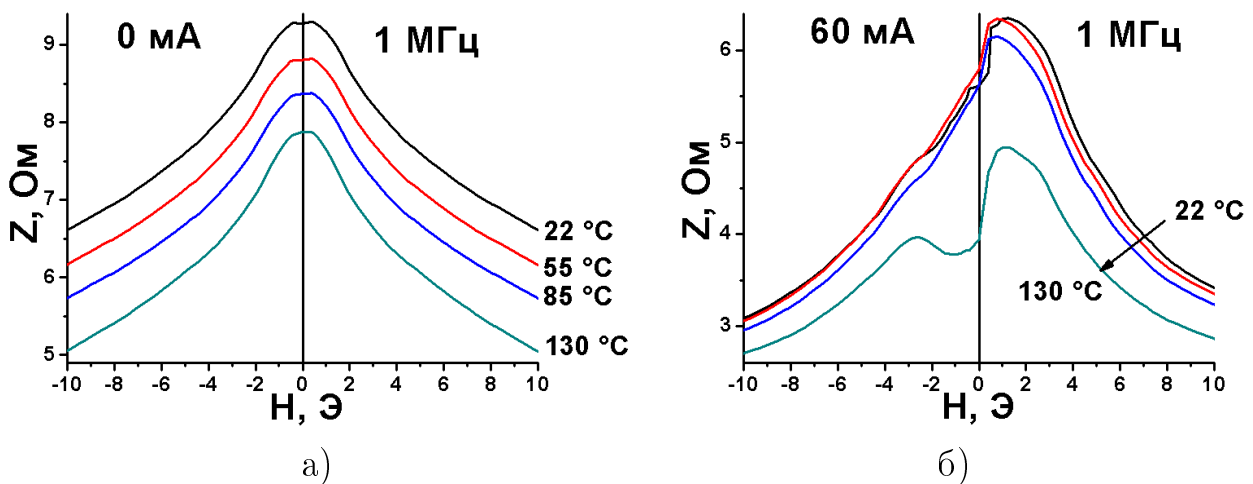


Рис. 14: Магнитополевые зависимости импеданса аморфного провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  в диапазоне температур ( $22 \div 130$ ) $^{\circ}\text{C}$  для разных частот переменного тока и значений силы подмагничивающего тока:  $I_{DC} = 0$  (а);  $I_{DC} = 60$  мА (б).

мами при противоположных направлениях магнитного поля (рис. 14, б).

Влияние температуры, механических напряжений и магнитного поля на электрические и магнитные свойства нанокристаллических лент сплавов типа Finemet  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5-x}\text{B}_{6+x}\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  ( $x = 0; 3$ ) предварительно подвергнутых термообработкам без магнитного поля (ТО) и с магнитным полем (ТМО) рассмотрено в параграфе 4.2. Показано, что температурные зависимости импеданса определяются как составом сплава и видом его термообработки, так и частотой переменного тока (рис.16).

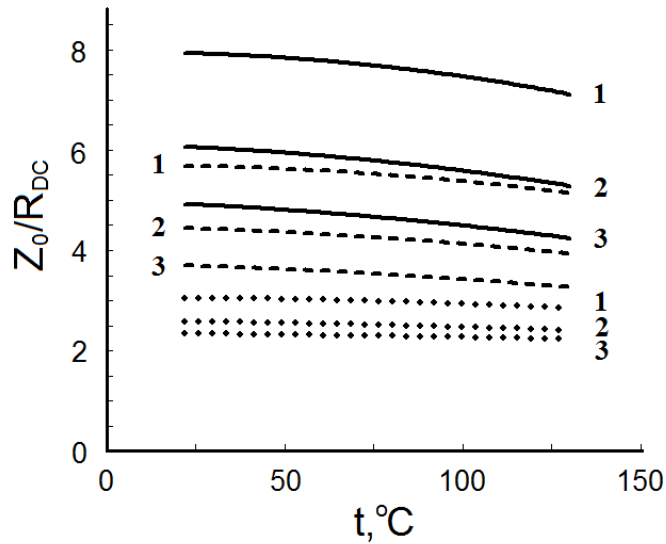


Рис. 15: Расчетные температурные зависимости импеданса магнитомягкого провода соответствующие разным значениям подмагничивающего тока  $I_{DC}$  и разным углам  $\alpha$  отклонения ЛЛН от циркулярной ориентации. Зависимостям 1 соответствует  $I_{DC} = 0$ ; 2 -  $I_{DC} = 40$  мА; 3 -  $I_{DC} = 80$  мА. Зависимости изображенные сплошными линиями рассчитаны для  $\alpha = 15^\circ$ , пунктиром —  $\alpha = 10^\circ$ , точками —  $\alpha = 4^\circ$ . Вычисления проведены для частоты переменного тока 50 МГц с использованием экспериментальных зависимостей  $M_S(t)$ ,  $H_p(t)$  и  $\rho(t)$  аморфного провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  диаметром 180 мкм.

Показательно изменение с частотой переменного тока характера зависимостей  $Z_0(T)$  ТО и ТМО лент состава  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ . На частотах выше 0,5 МГц начальный импеданс ТО лент с ростом температуры изменяется немонотонно (рис.16, б). Зависимости  $Z_0(T)$  имеют максимум, который с ростом частоты переменного тока смещается в область меньших температур. Температурный рост магнитной проницаемости и импеданса на частотах переменного тока ниже  $\sim 0,5$  МГц и наличие возрастающего участка на зависимостях  $\mu_t(T)$  и  $Z_0(T)$  при  $f \gtrsim 0,5$  МГц в основном обусловлено уменьшением эффективной продольной магнитной анизотропии. Расчетные зависимости  $\mu_t(T)$  и  $Z_0(T)$  с учетом экспериментальной  $M_S(T)$  показывают, что значительный температурный спад  $\mu_t$  и  $Z$ , особенно на высоких частотах, не может быть полностью объяснен уменьшением  $M_S$ . Дополнительными факторами влияющими на  $Z_0(T)$  являются уменьшения угла  $\alpha$  отклонения ОЛН от поперечной ориентации с нагревом провода и некоторый рост угловой дисперсии локальных осей легкого намагничивания.

Для ТМО лент  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  вблизи 0,5 МГц происходит переход от монотонно возрастающей зависимости  $Z_0(T)$  к убывающей практически по линейному закону, что делает их перспективными для использования в качестве чувствительных элементов датчиков температуры. На частотах ни-



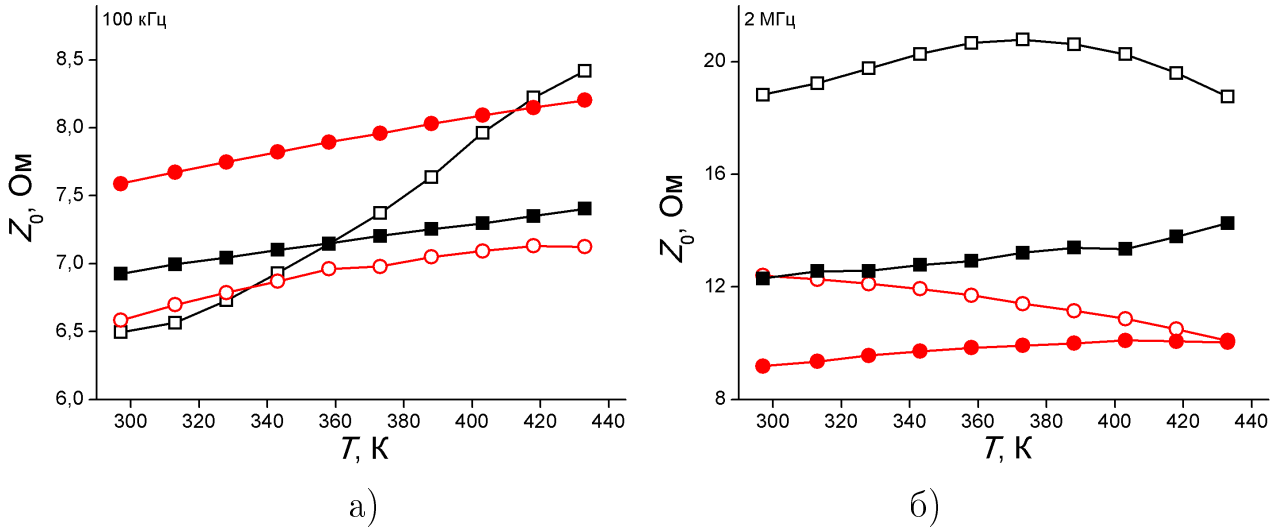


Рис. 16: Температурные зависимости начального импеданса лент сплава  $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{16,5-x}\text{B}_{6+x}\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  пустые маркеры соответствуют составу с  $x = 0$ , закрашенные —  $x = 3$ , после термообработок видов ТО (квадрат) и ТМО (окружность). Частота переменного тока составляет 0,1 МГц для зависимостей  $Z_0(T)$  на рисунке (а) и 2 МГц — (б).

же  $\sim 0,5$  МГц значительное влияние на  $Z_0(T)$  оказывает температурное изменение электросопротивления. На частотах выше  $\sim 0,5$  МГц уменьшение с ростом  $T$  импеданса ТМО лент данного сплава в основном обусловлено уменьшением  $M_S$  и  $\alpha$ . Для ТО и ТМО лент сплава  $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  в пользу влияния на  $Z_0(T)$  уменьшения угла отклонения ОЛН от поперечной ориентации с ростом температуры свидетельствует не только уменьшение  $Z_0$  и смещение максимума зависимости  $Z(H)$  в область больших магнитных полей, но и рост  $Z_{max}$ .

Увеличение импеданса лент сплава  $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  ( $x = 3$ ) с ростом температуры на частотах выше 0,5 МГц (рис.16), в основном обусловлено температурным уменьшением константы эффективной анизотропии. Об уменьшении  $K$  с увеличением  $T$  свидетельствует и смещение максимума на зависимостях  $Z(H)$  лент подвергнутых ТМО в область меньших магнитных полей. Кроме роста магнитной проницаемости температурному увеличению импеданса будет способствовать и рост электросопротивления лент, влияние которого с уменьшением частоты тока усиливается.

При рассмотрении особенностей влияния температуры на импеданс упругодеформированных нанокристаллических лент сплавов  $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{16,5-x}\text{B}_{6+x}\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  ( $x = 0; 3$ ) определена значительная роль температурного изменения их констант магнитострикции  $\lambda_S$ .

Показано, что величину и знак константы магнитострикции можно оценить исходя из магнитоимпедансных  $Z(H)$  и стрессимпедансных  $Z(\sigma)$  зависимостей:

$$\lambda_s = -\frac{\mu_0 M_S H_{P(\sigma=0)}}{3\sigma_{P(H=0)}} \quad (3)$$

где  $H_{P(\sigma=0)}$  напряженность магнитного поля соответствующего максимуму зависимости  $Z(H)$ ,  $\sigma_{P(H=0)}$  - значение растягивающих напряжений соответствующих максимуму зависимости  $Z(\sigma)$ .

Зная зависимости  $H_P(T)$ ,  $\sigma_P(T)$  и  $M_S(T)$  можно определить зависимость  $\lambda_S(T)$ . Значения  $\lambda_S$ , найденные этим методом, хорошо согласуются с данными других методов измерений.

В параграфе 4.3 рассмотрены термоиндуцированные изменения импеданса упругодеформированных низкострикционных лент аморфного сплава  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$ . На основе анализа магнитоимпеданса упругодеформируемой ленты при разных температурах (рис.17) показано, что изменение характера отклика импеданса на деформацию растяжения при  $T \approx 360$  К обусловлено сменой знака константа магнестрикции сплава. Этот вывод был подтвержден температурной зависимостью  $\lambda_S$  определенной методом SAMR. Стоит отметить, что подобные температурные изменения магнитополевых зависимостей импеданса нами наблюдались и у упругодеформированных аморфных лент сплава  $\text{Co}_{75}\text{Fe}_5\text{Si}_4\text{B}_{16}$ , а также аморфного провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ .

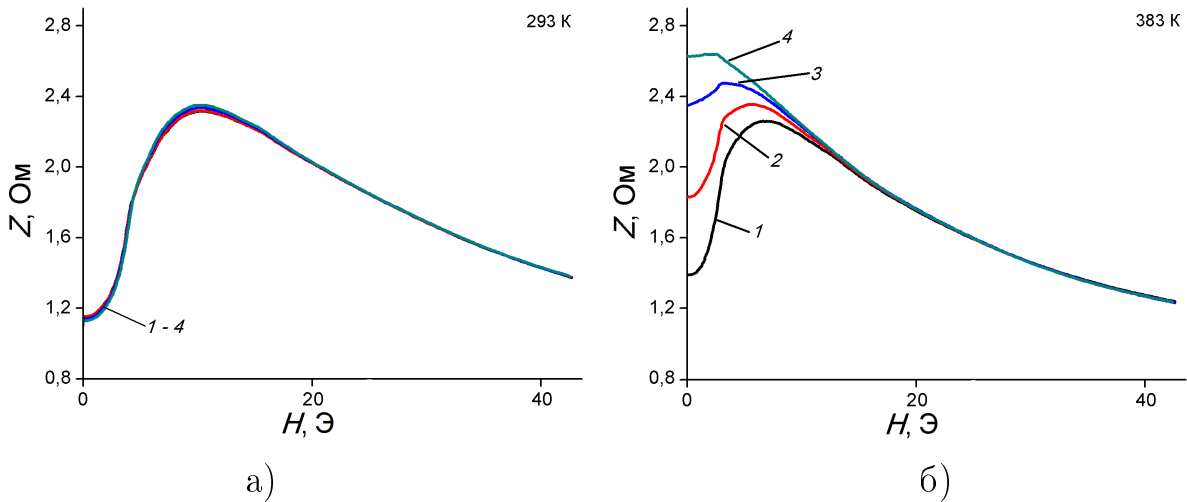


Рис. 17: Зависимости импеданса  $Z$  аморфных лент сплава  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$  от величины внешнего магнитного поля  $H$  на частоте переменного тока 10 МГц. Зависимости  $Z(H)$  получены при величине растягивающих напряжений: 1 — 0 МПа; 2 — 98 МПа; 3 — 176 МПа; 4 — 255 МПа. Внешнее магнитное поле, растягивающие напряжения и переменный ток приложены вдоль длины образца. ОЛН образца ориентирована перпендикулярно его длине. Температура образцов составляла: а) 293 К; б) 383 К.

Показано, что значения  $\lambda_S$ , определенные согласно предложенному методу исходя из экспериментальных зависимостей  $H_P(T)$ ,  $\sigma(T)$  и  $M_S(T)$ , близки к значениям полученным методом SAMR (рис. 18).

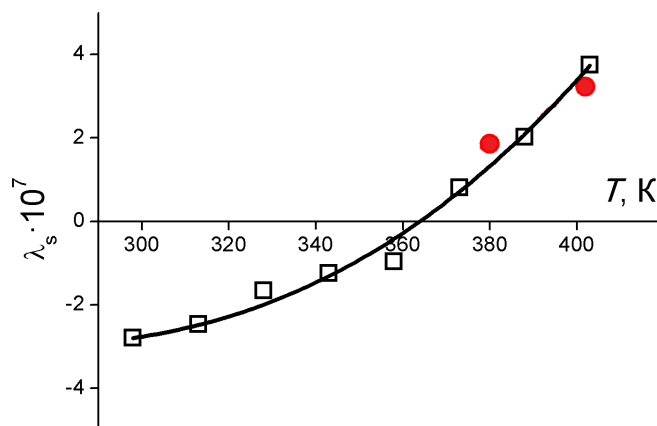


Рис. 18: Температурная зависимость константы магнитострикции насыщения аморфного сплава  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ . Квадратные маркеры — измерения методом SAMR, круглые — расчет из выражения (3).

Результаты изучения импеданса аморфных магнитомягких сплавов в области ферромагнитного фазового перехода рассмотрены в *параграфе 4.4*. Показано, что резкие температурные изменения импеданса, обнаруженные ранее в нанокристаллических сплавах [34], наблюдаются и в аморфных ферромагнетиках вблизи температуры Кюри. Причем  $Z_0$ , в отличие от намагниченности, с повышением температуры испытывает вначале рост и лишь затем уменьшается, как это видно из температурных зависимостей  $(\Delta Z/Z)_T = \frac{Z_0(T) - Z_0(T_K)}{Z_0(T_K)} \cdot 100\%$  (рис. 19). Такое поведение импеданса особенно выражено в случае лент  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  (рис. 19, б). Наличие возрастающего участка свидетельствует о росте магнитной проницаемости, что, принимая во внимание монотонно убывающую температурную зависимость намагниченности сплава, вызвано уменьшением константы магнитной анизотропии. Учитывая поперечную ориентацию ОЛН лент значительный вклад в увеличение  $Z_0$  с нагревом лент может вносить и рост угловой дисперсии локальных осей анизотропии. В области фазового перехода импеданс испытывает резкий спад позволяя достаточно точно определять температуру Кюри. С дальнейшим повышением температуры происходит слабое увеличение импеданса вследствие уменьшения электропроводности сплава. Высокие значения температурной чувствительности импеданса исследованных аморфных лент достигающие на частоте 2 МГц вблизи ферромагнитного фазового перехода 8%/К могут представлять интерес при создании высокочувствительных тепловых измерительных преобразователей. Варьируя состав сплава, можно изменять температуру Кюри, добиваясь максимальной чувствительности преобразова-

теля в нужном температурном диапазоне.

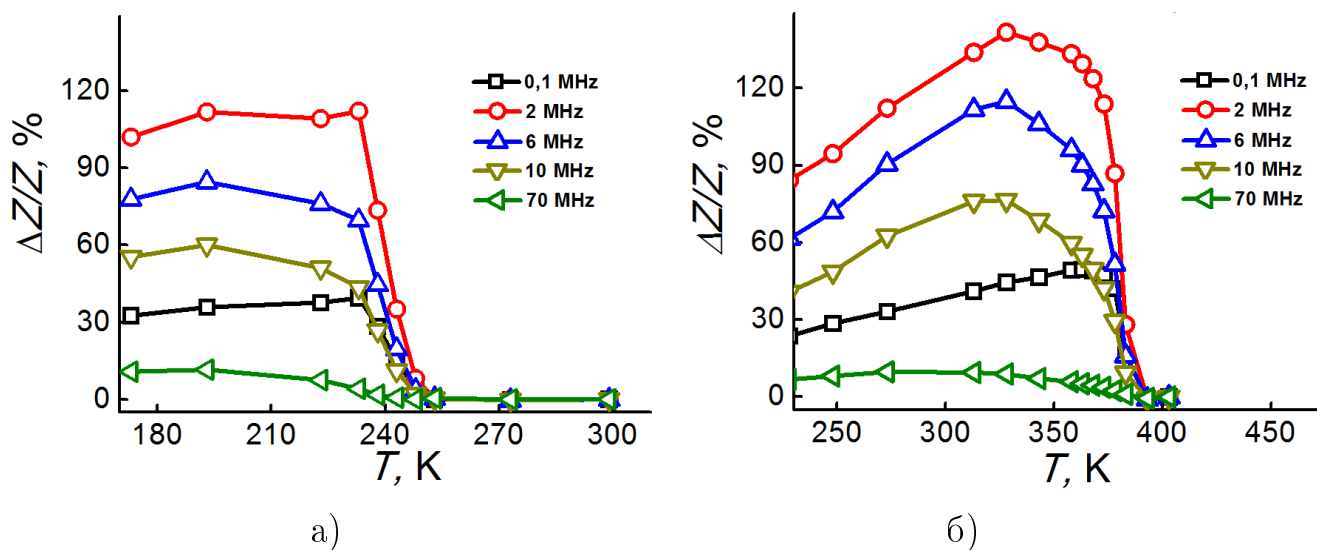


Рис. 19: Относительное температурное изменение модуля импеданса аморфных лент сплавов  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  (а) и  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  (б) на разных частотах переменного тока.

**В пятой главе** представлены результаты исследований высокочастотного импеданса композитных материалов на основе магнитомягких проводников и его зависимостей от напряженности магнитного поля и температуры.

Основной предпосылкой разработки композитных функциональных материалов на основе магнитоактивных проводников является возможность улучшения различных технических характеристик магнитоимпедансных преобразователей. Преимущественно это относится к повышению их чувствительности, в заданном интервале магнитных полей, миниатюризации и оптимизации геометрии чувствительного элемента [35, 36, 37, 38, 39, 40]. Учитывая особенности высокочастотного импеданса структура большинства рассматриваемых композитов включает высокопроводящую центральную часть и поверхностный магнитоактивный проводящий слой. Другие варианты, включая защитные полимерные покрытия, магнитомягкие покрытия аморфных ферромагнитных лент практически не рассматривались.

В качестве примера влияния термического воздействия на импеданс композитных магнитомягких проводников в *параграфе 5.1.* рассмотрены исследования многослойной системы  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ . Слой пермаллоя толщиной 1 мкм наносился на очищенную поверхность аморфных лент имеющих толщину 20 мкм, ширину 2 мм и длину 50 мм с обеих сторон методом ионно-плазменного распыления. Магнитное поле в процессе напыления не прикладывалось.

Магнитопольевые зависимости импеданса как исходной аморфной ленты, так и ленты с покрытием  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$  при температурах ниже 250 К экстремальны во всем исследованном частотном диапазоне (рис. 29), что свидетельствует о наличии поперечной компоненты эффективной магнитной анизотропии

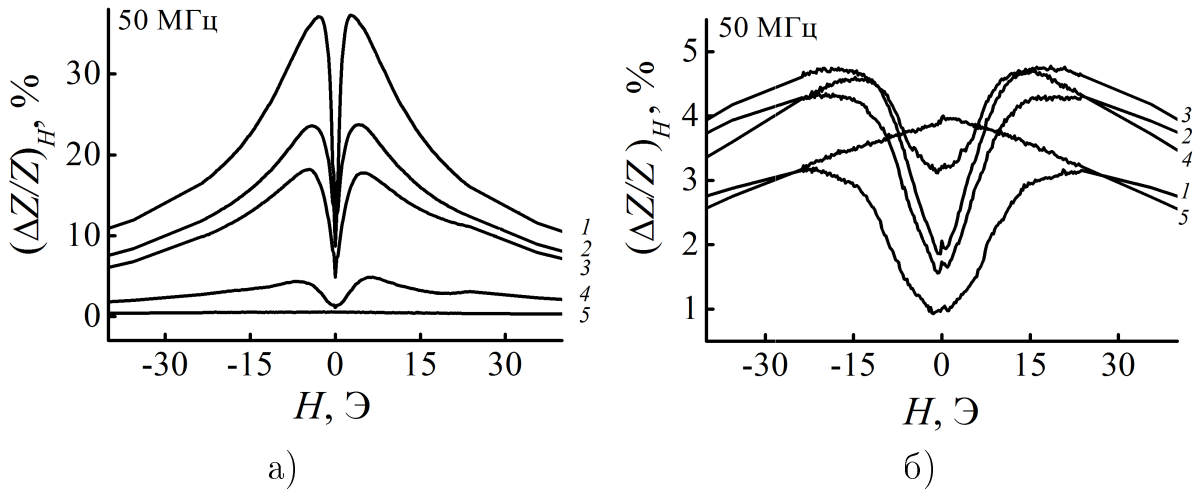


Рис. 20: Зависимости магнитоимпедансного отношения  $(\Delta Z/Z)_H = [(Z(H) - Z(H_{max}))/Z(H_{max})] \cdot 100\%$  от напряженности магнитного поля  $H$  для аморфных лент сплава  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  без покрытия (а) и лент, покрытых слоем пермаллоя толщиной 1 мкм (б) при температурах: 1 – 173 К; 2 – 223 К; 3 – 233 К; 4 – 243 К; 5 – 300 К.

как у аморфной ленты, так и у пермаллового покрытия. Однако, при температурах выше  $T_K$  сплава  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ , но ниже температуры Кюри пермаллоя импеданс композитного материала с ростом магнитного поля монотонно убывает, что возможно при преимущественно продольной ориентации ОЛН пермаллового покрытия. Так как напыление пермаллоя производилось при  $T$  выше  $T_{K(л)}$  аморфной ленты, то, вследствие размерного эффекта слой пермаллоя изначально должен иметь преимущественно продольную магнитную анизотропию, а значит появление в пермалловом покрытии при  $T < T_{K(л)}$  значительной поперечной компоненты поля эффективной магнитной анизотропии происходит вследствие его взаимодействия с магнитной структурой ленты.

Значительное смещение максимума на магнитолевых зависимостях импеданса композита, при  $T < T_{K(л)}$ , в область больших значений  $H$  по сравнению с исходной аморфной лентой вызвано как более высоким значением константы магнитной анизотропии пермаллоя, так и возможным возникновением в композитном материале механических напряжений вследствие различия коэффициентов теплового расширения аморфной ленты и  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$  покрытия. Эффект магнитолевого смещения максимума магнитоимпеданса в результате нанесения тонких покрытий можно использовать для целенаправленного изменения интервалов магнитных полей с максимальной чувствительностью импеданса к внешнему магнитному полю в измерительных преобразователях на основе магнитоимпедансного эффекта.

Еще одной особенностью лент с пермалловым покрытием является смена монотонно убывающей частотной зависимости температурной чувствительности мнимой компоненты импеданса на экстремальную (рис. 30). На частоте  $\sim 30$  МГц на зависимости  $S_X(f)$  появляется максимум. На этой частоте пере-

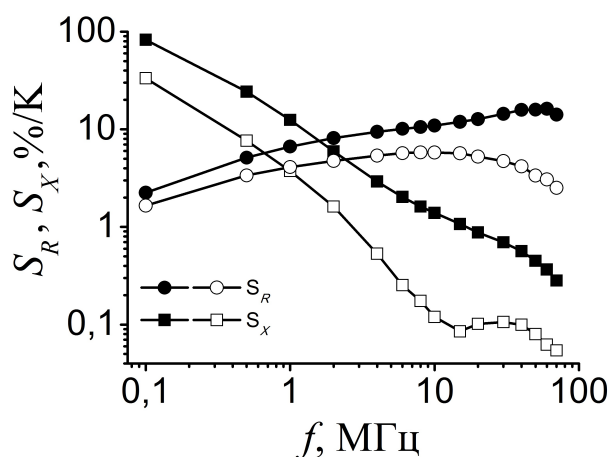


Рис. 21: Частотные зависимости максимальных значений приведенных температурных чувствительностей мнимой  $S_X$  и действительной  $S_R$  компонент импеданса аморфных лент сплава  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  без покрытия (закрашенные маркеры) и аморфных лент, покрытых слоем пермаллоя (пустые маркеры).

менного тока глубина скин слоя составляет несколько микрон, т.е. становится близка к толщине пермаллоевого покрытия. Из температурных изменений импеданса композита  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$  на разных частотах следует вывод не только о различии ориентаций осей легкого намагничивания аморфной ленты и пермаллоевого покрытия, но и о взаимном влиянии слоев на ориентацию намагниченности в области контакта поверхностей ленты и покрытия, что приводит к образованию при температурах  $T$  выше  $T_K$  аморфной ленты зоны поворота намагниченности с ростом ее продольной составляющей при приближении к свободной поверхности пермаллоевого покрытия. В связи с этим, вероятной причиной появления на частотах выше 10 МГц возрастающего участка зависимости  $S_X(f)$  является усиление влияния на изменения  $Z_0$  вблизи  $T_K$  аморфной ленты значительных изменений векторов локальной намагниченности в зоне их поворота. С ростом частоты переменного тока влияние на импеданс температурных ориентационных изменений намагниченности в зоне поворота должно начать уменьшаться, и на частотах выше 30 МГц зависимость  $S_X(f)$  уже становится монотонно убывающей.

Одними из основных аспектов определяющих спектр областей применения магнитоимпедансных и стрессимпедансных датчиков является коррозионная (химическая) стойкость и механическая прочность их магнитоактивных элементов [41]. Улучшение этих параметров, за счет применения защитных покрытий позволило бы не только расширить область использования датчиков, но и применять материалы проявляющие более высокую чувствительность к магнитным полям и деформациям. Влияние полимерных покрытий на высокочастотные электрические свойства магнитоактивных проводников рассмотрены в *параграфе 5.2*. Одним из механизмов этого влияния может стать упругое взаимодействие магнитоактивной среды и полимерного по-

крытия. Различие коэффициентов их температурного расширения и эффект стеклования полимера должны приводить к изменению уровня внутренних напряжений, а значит и к изменению температурной зависимости магнитной проницаемости и, соответственно, импеданса магнитного проводника.

О влиянии полимерных покрытий на импеданс магнитомягких проводников можно судить на примере исследований планарных композитных систем - аморфная лента сплава  $\text{Co}_{75}\text{Fe}_5\text{Si}_4\text{B}_{16}$ /полимерное покрытие (таб. 1). Использовались полимерные покрытия разных видов: MR (раствор модифицированного каучука в о-ксилоле); BMR (раствор сополимера бутилметакрилата с метакриловой кислотой в изопропанол)  $c = 10\%$ ; и КО (раствор полиметилфенилсилоксановой смолы в толуоле)  $c = (30 - 34)\%$ . Толщина полимерного покрытия составляла  $(30 \div 35)$  мкм с каждой стороны ленты.

Sample	$\Delta Z/\Delta T$ for $f = 1$ MHz ( $\mu\Omega/\text{K}$ )		$\Delta Z/\Delta T$ for $f = 10$ MHz ( $\mu\Omega/\text{K}$ )	
	H = 0	H = 5 Oe	H = 0	H = 5 Oe
CoFeSiB	410	400	1190	1060
CoFeSiB/КО	410	390	1030	820
CoFeSiB/MR	460	400	1380	1230
CoFeSiB/BMR	420	370	1230	1090

Таблица 1: Температурная чувствительность импеданса  $\Delta Z/\Delta T = (Z_{T_2} - Z_{T_1})/(T_2 - T_1)$ , где  $T_1 = 163\text{K}$  и  $T_2 = 363\text{K}$ , аморфной ленты сплава  $\text{Co}_{75}\text{Fe}_5\text{Si}_4\text{B}_{16}$  и композита - аморфная лента сплава  $\text{Co}_{75}\text{Fe}_5\text{Si}_4\text{B}_{16}$ /полимерное покрытие.

Согласно полученным данным, все исследованные полимерные покрытия показали хорошую адгезию к поверхности лент и обеспечили обратимость высокочастотных электрических свойств получаемых композитов при достаточно жестких термических и деформационных воздействиях на них. При этом полимерное покрытие играло для магнитомягкой ленты не только защитную роль, но и заметно влияло на ее функциональные свойства. Можно прогнозировать, что модификация состава и варьирование толщины полимерного покрытия будет иметь важное значение в достижении необходимых технических характеристик различных видов импедансных датчиков на основе магнитомягких проводников.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Определено влияние взаимной ориентации оси легкого намагничивания, внешнего магнитного поля, оси высокочастотного электрического тока и ориентации переменного магнитного поля на высокочастотный импеданс и магнитную проницаемость магнитомягких планарных сред. Дано объяснение

особенностей экспериментальных магнитопольевых зависимостей импеданса и магнитной проницаемости аморфных лент состава  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{V}_{11}$ . Показано, что причиной слабого влияния на импеданс магнитомягкой ленты внешнего магнитного поля, ориентированного вдоль оси легкого намагничивания, является близкий к компенсационному характер изменения магнитных проницаемостей соседних доменов в объеме скин-слоя. Монотонное уменьшение импеданса с увеличением напряженности магнитного поля выше некоторого критического значения обусловлено переходом проводника в однодоменное состояние.

2. Обнаруженные частотные особенности изменения действительной и мнимой компонент импеданса под влиянием растягивающего и магнитопольевого воздействий на аморфный провод состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{V}_{15}$ , а также его отжига электрическим током, свидетельствуют о более высокой чувствительности мнимой компоненты импеданса к ориентационным изменениям намагниченности. Показано, что при деформации растяжения компенсационный характер изменений циркулярных магнитных проницаемостей областей магнитомягкого провода с аксиальным и геликоидальным типами магнитных анизотропий приводит к появлению узкого частотного интервала, в котором влияние деформации растяжения на импеданс минимально. Этот эффект может иметь практическое применение при разработке магнитопольевых и температурных датчиков. Показана возможность реализации в магнитомягком проводе с низкой положительной магнитострикцией магнитной доменной структуры, включающей, помимо слоев с геликоидальной и аксиальной, керн с циркулярной анизотропией.

3. Частотные особенности экспериментальных зависимостей импеданса от силы подмагничивающего постоянного электрического тока, протекающего по магнитомягкому проводу состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{V}_{15}$  с низкой положительной константой магнитострикции, отражают не только типы его магнитной анизотропии, но и свидетельствуют о многодоменной структуре приповерхностного слоя. Наличие на зависимостях высокочастотного импеданса от силы подмагничивающего тока начального участка с практически неизменным значением импеданса связано с компенсацией изменения магнитной проницаемости доменов, в которых циркулярная компонента намагниченности совпадает с направлением магнитного поля подмагничивающего тока, ее изменением в доменах с обратной ориентацией намагниченности.

4. Определено влияние различных видов термообработок аморфных магнитомягких проводников на их высокочастотные электрические свойства. Показано, что воздействие внешнего магнитного поля в ходе нанокристаллизации лент состава  $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{16,5}\text{V}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ , а также длительная (20 ÷ 100 часов) изотермическая обработка аморфных магнитомягких сплавов при температурах ниже температур Кюри и начала кристаллизации (100 ÷ 200)°C, слабо влияя на структуру и квазистатические магнитные свойства, может значительно изменять высокочастотные электрические свойства. На приме-



ре рассмотрения длительной изотермической обработки низкострикционно-го ферромагнитного провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  установлено, что высокая чувствительность метода магнитоимпедансной спектроскопии к изменениям электрических и магнитных свойств магнитомягких материалов позволяет успешно использовать его для детектирования отдельных температурных стадий процесса структурной релаксации аморфных магнитомягких сплавов.

5. Показано, что возрастающий, убывающий или экстремальный характер температурной зависимости высокочастотного импеданса магнитомягких проводников в основном обусловлен конкурирующими температурными изменениями намагниченности насыщения, константы магнитной анизотропии и электросопротивления. Так, уменьшение импеданса магнитомягкого провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  с ростом температуры в диапазоне  $(22 \div 130)$  °С на частотах выше 10 кГц в основном обусловлено изменением магнитных параметров провода, из которых доминирующее влияние оказывают уменьшение намагниченности насыщения и изменение ориентации линии легкого намагничивания приповерхностного слоя ввиду температурного изменения уровня внутренних механических напряжений.

6. Установлено, что степень влияния упругой деформации растяжения на температурную зависимость импеданса магнитомягкого провода с низкой положительной константой магнитострикции и комбинированной магнитной анизотропией определяется частотой переменного электрического тока. Исходя из особенностей изменения импеданса аморфного провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  при тепловом и деформационном воздействии, показана возможность минимизации температурных изменений импеданса путем создания композита, состоящего из магнитоактивного проводника и вспомогательного слоя с коэффициентами линейного теплового расширения и модулями Юнга, обеспечивающими компенсацию теплового изменения импеданса упругой деформацией растяжения.

7. Определены причины температурного роста асимметрии магнитолевых зависимостей импеданса магнитомягкого провода состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  и влияния на характер его температурной зависимости величины постоянного подмагничивающего тока. Показана возможность практического использования материалов данного типа в двух температурных диапазонах, в одном из которых, при определенных значениях частоты переменного и величин подмагничивающего токов, импеданс может оставаться практически неизменным (в ряде случаев наблюдаемое изменение не превышает 0,01%/К), а в другом диапазоне температурная чувствительность импеданса достигает 1%/К.

8. В аморфных магнитомягких проводниках обнаружено наличие граничной температуры, выше и ниже которой влияние деформации растяжения на импеданс и эффект магнитоимпеданса различно. Показано, что причиной этого является температурная смена знака константы магнитострикции,

которая для аморфных лент  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$  и  $\text{Co}_{75}\text{Fe}_5\text{Si}_4\text{B}_{16}$ , а также аморфного провода  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  происходит вблизи температур 363 К, 340 К и 170 К, соответственно. Обнаружено значительное увеличение температурной чувствительности импеданса упругодеформированных магнитомягких проводников планарной и цилиндрической геометрии: температурная чувствительность аморфных лент сплава  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$  на частотах (4 ÷ 10) МГц при растягивающих напряжениях 255 МПа вблизи температуры смены знака константы магнитострикции достигает 3%/К. Предложен метод определения константы магнитострикции насыщения исходя из зависимостей импеданса от внешнего магнитного поля и механических напряжений.

9. Показано, что немонотонный характер температурной зависимости импеданса магнитомягких лент по мере приближения к температуре Кюри в основном обусловлен конкурирующими температурными изменениями намагниченности насыщения и константы магнитной анизотропии. Обнаруженное в области ферромагнитного фазового перехода резкое температурное изменение импеданса, температурная чувствительность которого для аморфных лент  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  на частоте 2 МГц достигает 8 %/К, может быть использовано как для точного определения температуры Кюри ферромагнитных сплавов, так и при создании высокочувствительных тепловых измерительных преобразователей.

10. Показано, что обнаруженные различия температурных изменений импеданса, магнитоимпедансных и стрессимпедансных зависимостей лент сплавов типа Finemet, предварительно нанокристаллизованных в ходе термической и термомагнитной обработок из аморфного состояния, в основном обусловлены особенностями их магнитной анизотропии и ее угловой дисперсии. Высокие значения чувствительности импеданса лент к термическим и деформационным воздействиям могут иметь практическое приложение.

11. Определено влияние теплового, деформационного и магнитополевого воздействий на магнитомягкие композиты с ферромагнитными или полимерными поверхностными слоями. Показано, что нанесение на магнитомягкую ленту магнитного проводящего покрытия с отличающимися магнитными и электрическими характеристиками позволяет целенаправленно влиять на магнитополевые диапазоны с максимальной чувствительностью импеданса к магнитному полю, а также на его температурную чувствительность, особенно в области ферромагнитных фазовых переходов. Определены особенности термоиндуцированных изменений магнитоимпедансных свойств композита, слои которого имеют разные температуры Кюри. Установлено, что полимерное покрытие магнитомягких лент может выполнять не только защитную роль, но и влиять на их функциональные свойства.

12. Разработан автоматизированный измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии обеспечивающий изучение электрических и магнитных свойств магнитомягких материалов при тепловом, деформационном

и магнитополемом воздействия на них. Измерительный комплекс позволяет определять электрический импеданс и компоненты импеданса проводников в частотном диапазоне ( $10^{-5} \div 110$ ) МГц, диапазонах температур ( $100 \div 720$ ) К, растягивающих сил ( $0 \div 10$ ) Н и магнитных полей до  $\pm 12$  кА/м. Комплекс снабжен системой компенсации геомагнитного и техногенных магнитных полей до значений  $\sim 0,1$  А/м. Показано, что без учета собственного импеданса измерительной ячейки как значения эффекта магнитоимпеданса магнитомягких проводников, так и его частотная зависимость могут быть искажены. Обоснована необходимость учета в конструкции измерительной ячейки для изучения термического воздействия на импеданс магнитомягких низкоструктурных материалов системы компенсации различия тепловых изменений линейных размеров самой ячейки и исследуемых объектов.

## СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЯХ, ОПРЕДЕЛЕННЫХ ВАК

1. А.В.Семиров, А.А.Моисеев, В.О.Кудрявцев, Д.А.Букреев, Н.П.Ковалева, Н.В.Васюхно. Компонентный анализ комплексного сопротивления магнитомягкого провода состава  $\text{CoFeNbSiB}$  с неоднородной магнитной структурой. // Журнал технической физики, 2015, вып. 85, №5, с. 137-141.
2. Д.А. Букреев, А.А. Моисеев, М.С. Деревянко, А.В. Семиров. Высоко-частотные электрические свойства аморфных магнитомягких сплавов на основе кобальта в области перехода в парамагнитное состояние. // Известия ВУЗов. Физика, 2015, вып.58, № 2, с. 3-7.
3. А.В. Семиров, М.С. Деревянко, Д.А. Букреев, А.А. Моисеев, Г.В. Курляндская. Высоко-частотный импеданс магнитомягких аморфных лент на основе кобальта вблизи температуры Кюри. // Известия РАН. Серия физическая, 2014, вып. 78, № 2, с. 147-150.
4. А.В. Семиров, М.С. Деревянко, Д.А. Букреев, А.А. Моисеев, Г.В. Курляндская. Импеданс и магнитные свойства аморфных лент  $\text{CoFeCrSiB}$  вблизи температуры Кюри. // Журнал технической физики, 2013, вып. 83, № 5, с. 154-157.
5. А.В. Семиров, В.О. Кудрявцев, А.А. Моисеев, Д.А. Букреев, Н.П. Ковалева, Н.В. Васюхно. Высоко-частотные электрические свойства аморфного магнитомягкого провода на основе кобальта, прошедшего отжиг постоянным электрическим током. // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2013, вып. 12, с. 46-50.

6. А.В. Семиров, Д.А. Букреев, А.А. Моисеев, М.С. Деревянко, В.О. Кудрявцев. Связь температурных изменений константы магнитострикции и импеданса упругодеформированных магнитомягких аморфных лент на основе кобальта. // Известия ВУЗов. Физика, 2012, вып.55, № 9, с. 3-7.
7. А.В. Семиров, А.А. Моисеев, Д.А. Букреев, М.С. Деревянко, В.О. Кудрявцев. Температурная зависимость магнитоимпеданса упругодеформированной аморфной проволоки на основе кобальта. // Материаловедение, 2012, вып. 12, с. 27-30.
8. А.В. Семиров, Д.А. Букреев, А.А. Моисеев, В.А. Лукшина, Е.Г. Волкова, С.О. Волчков, Г.В. Курляндская. Температурная зависимость магнитных свойств и магнитоимпеданса нанокристаллических лент  $Fe_{73.5}Si_{16.5}B_6Nb_3Cu_1$ . // Журнал технической физики, 2011, вып. 81, № 3, с. 80-84.
9. А.В. Семиров, Д.А. Букреев, А.А. Моисеев, В.А. Лукшина, Е.Г. Волкова, С.О. Волчков. Влияние особенностей эффективной магнитной анизотропии на температурные зависимости магнитоимпеданса нанокристаллических лент  $Fe_{73.5}Si_{16.5}B_6Nb_3Cu_1$ . // Известия высших учебных заведений. Физика, 2011, вып.54, № 5, с. 95-100.
10. Г.В. Курляндская, А.В. Семиров, В.А. Лукшина, Е.Г. Волкова, С.О. Волчков, Д.А. Букреев, А.А. Моисеев. Магнитные свойства и магнитоимпедансный эффект наноструктурных лент  $Fe_{73.5}Si_{16.5}B_6Nb_3Cu_1$  с наведенной магнитной анизотропией. // Известия РАН. Серия физическая, 2010, вып. 74, № 10, с. 1526-1528.
11. А.В. Семиров, А.А. Моисеев, Д.А. Букреев, В.О. Кудрявцев, А.А. Гаврилюк, Г.В. Захаров, М.С. Деревянко. Автоматизированный измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии магнитомягких материалов. // Научное приборостроение, 2010, вып. 20, № 2, с. 42-45.
12. А.В. Семиров, А.А. Моисеев, Д.А. Букреев, В.О. Кудрявцев, Г.В. Захаров, А.А. Гаврилюк, А.Н. Сапожников. Магнитоимпедансное детектирование структурной релаксации аморфных ферромагнитных сплавов. // Дефектоскопия, 2010, № 12, с. 26-31.
13. А.В. Семиров, Д.А. Букреев, В.О. Кудрявцев, А.А. Моисеев, А.А. Гаврилюк, А.Л. Семенов, Г.В. Захаров. Влияние температуры на магнитоимпеданс упругодеформированной фольги состава  $Fe_4Co_{67}Mo_{1.5}Si_{16.5}B_{11}$ . // Журнал технической физики, 2009, вып. 79, № 11, с. 25-29.

14. А.А. Гаврилюк, А.В. Гаврилюк, Б.В. Гаврилюк, А.Л. Семенов, А.В. Семиров, Н.В. Турик. Устойчивость магнитных доменов в аморфной металлической проволоке. // Известия ВУЗов. Физика, 2009, вып. 52, № 1, с. 83-91.
15. А.А. Гаврилюк, А.В. Гаврилюк, И.Л. Морозов, Н.В. Турик, Б.В. Гаврилюк, А.В. Семиров, А.Л. Семенов. Магнитная структура и механизмы перемагничивания ядра быстрозакаленной ферромагнитной проволоки. // Известия ВУЗов. Физика, 2008, вып.51, № 2, с. 64-69.
16. А.В. Семиров, А.А. Гаврилюк, В.О. Кудрявцев, А.А. Моисеев, Д.А. Букреев, А.Л. Семенов, З.Ф. Ущаловская. Влияние отжига на импедансные свойства упругодеформированных магнитомягких проволок. // Дефектоскопия, 2007, № 10, с. 3-7.
17. А.В. Семиров, В.О. Кудрявцев, А.А. Гаврилюк, А.А. Моисеев. Влияние упругих напряжений растяжения на дифференциальную магнитную проницаемость аморфных ферромагнитных проволок в широком частотном диапазоне. // Письма в Журнал технической физики, 2006, вып. 32, № 15, с. 24-29.
18. А.В. Семиров, Б.В. Гаврилюк, А.А. Руденко, В.О. Кудрявцев, Н.П. Ковалева. Магнитооптическая установка для исследования динамических свойств доменных границ в тонких ферромагнитных пленках. // Журнал технической физики, 2005, вып. 75, с. 128-130.
19. А.В. Семиров, Ю.В. Аграфонов, К.В. Душутин, А.А. Анашко, А.А. Гаврилюк. Автоматизированная установка для исследования эффекта магнитоимпеданса и эффективной магнитной проницаемости магнитомягких материалов. // Приборы и техника эксперимента, 2005, № 2, с. 155-156.
20. А.А. Анашко, А.В. Семиров, А.А. Гаврилюк, К.В. Душутин. Влияние отжига на магнитоимпедансный эффект в аморфных FeCoMoSiV лентах. // Журнал технической физики, 2004, вып. 74, № 8, с. 128-129.
21. А.А. Анашко, А.В. Семиров, А.А. Гаврилюк. Магнитоимпедансный эффект в аморфных FeCoMoSiV лентах. // Журнал технической физики, 2003, вып. 73, № 4, с. 49-52.
22. А.В. Семиров, А.В. Гаврилюк. Движение зигзагообразных доменных границ в одноосноанизотропных ферромагнитных пленках. I. Экспериментальные исследования влияния внешнего магнитного поля на скорость движения зигзагообразных доменных границ. // Физика металлов и металловедение, 1999, вып. 87, № 2, с. 44-47.

23. А.В. Семиров, А.В. Гаврилюк. Движение зигзагообразных доменных границ в одноосноанизотропных ферромагнитных пленках. II. Анализ процесса движения зигзагообразных доменных границ. // Физика металлов и металловедение, 1999, вып. 87, № 2, с. 48-53.

## ДРУГИЕ ПУБЛИКАЦИИ

24. A.V. Semirov, M.S. Derevyanko, D.A. Bukreev, A.A. Moiseev, G.V. Kurlyandskaya. Magnetoimpedance of Amorphous Ferromagnetic CoFe-SiB Ribbons in the Wide Temperature Range. // Solid State Phenomena, 2014, vol. 215, p. 337-341.
25. A.A. Moiseev, A.V. Petrov, M.S. Derevyanko, V.A. Likshina, A.P. Potapov, D.A. Bukreev, A.V. Semirov, A.P. Safronov. Magnetoimpedance of amorphous ribbons with polymer covering. // Solid State Phenomena, 2014, vol. 215, p. 325-330.
26. A.V. Semirov, D.A. Bukreev, A.A. Moiseev, S.O. Volchkov, G.V. Kurlyandskaya, V.A. Lukshina, E.G. Volkova. Temperature Dependences of Magnetoimpedance of Nanocrystalline Fe-Based Ribbons. // Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2012, vol. 12, p. 7446-7450.
27. S.O. Volchkov, D.A. Bukreev, V.N. Lepalovskij, A.V. Semirov, G.V. Kurlyandskaya. Temperature dependence of magnetoimpedance in FeNi/Cu/FeNi film structures with different geometries. // Solid State Phenomena, 2011, vol. 168-169, p. 292-295.
28. A.V. Semirov, A.A. Gavriliuk, V.O. Kudryavtsev, A.A. Moiseev, D.A. Bukreev. Temperature influence on field dependences of impedance of amorphous CoFeNbSiB wires. // Journal of Physics: Conference Series, 2008, vol. 98, p. 062005.
29. A.A. Gavriliuk, A.Ya. Mokhovikov, A.V. Semirov, A.L. Semenov, N.V. Turic, V.O. Kudrewcev. Stability of magnetic domains inside the core of amorphous wire. // Journal of Non-Crystalline Solids, 2008, vol. 354, p. 5230-5232.
30. А.А. Анашко, А.В. Семиров, А.А. Гаврилюк, К.В. Душутин. Эффект магнитоимпеданса в аморфных металлических лентах на основе кобальта. // Деп. в ВИНТИ, 1430 - В 2003, с. 7.
31. А.В. Гаврилюк, А.В. Семиров. Канал продвижения плоских магнитных доменов. Патент 2053576 от 27.01.96.

32. А.В. Семиров, А.В. Гаврилюк. Способ управления продвижением плоских доменных границ. Патент 2084971 от 20.07.97.

## ЛИТЕРАТУРА

1. T. Egami. Magnetic amorphous alloys: physics and technological applications. // Rep. Prog. Phys., 1984, vol. 47, p. 1601-1725.
2. И.Б. Кекало, В.Ю. Цветков, В.Е. Тараничев, А.Н. Жданов. Магнитные материалы. М.: Металлургия, 1985, с. 113-135.
3. К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото. Аморфные металлы. М.: Металлургия, 1987, с. 328.
4. В.В. Немошкаленко. Аморфные металлические сплавы. Киев: Наукова думка, 1987.
5. И.В. Золотухин, Ю.Е. Калинин. Аморфные металлические сплавы. // УФН, 1990, № 160, с. 75-110.
6. V.E. Makhotkin, B.P. Shurukhin, V.A. Lopatin, P. Yu. Marchukov, Yu.K. Levin. Magnetic field sensors based on amorphous ribbons. // Sensors and Actuators A., 1991, vol. 27, p. 759-762.
7. K. Mohry, T. Kohzawa, K. Kawashima, H. Yoshido, L.V. Panina. Magnetoinductive effect (MI effect) in amorphous wires. // IEEE Trans. Magn., 1992, vol. 28, p. 3150-3152.
8. R.S. Beach, A.E. Berkowitz. Sensitive field- and frequency-dependent impedance spectra of amorphous FeCoSiB wire and ribbon. // J. Appl. Phys., 1994, vol. 74, p. 6209-6213.
9. L.V. Panina, K. Mohri, K. Bushida, M. Noda. Giant magneto-impedance and magneto-inductive effects in amorphous alloys. // J. Appl. Phys., 1994, vol. 76, no. 10, p. 6198-6203.
10. F.L.A. Machado, B.L. da Silva, S.M. Rezende, C.S. Martins. Giant ac magnetoresistance in the soft ferromagnet  $Co_{70.4}Fe_{4.6}Si_{15}B_{10}$ . // J. Appl. Phys., 1994, vol. 75, p. 6204-6208.
11. L.V. Panina, K. Mohri. Magnetoimpedance effect in amorphous wires. // Appl. Phys. Lett., 1994, vol. 65, no. 9, p. 1189-1191.

12. K.V. Rao, F.B. Humphrey, J.L. Costa-Kramer. Very large magnetoimpedance in amorphous soft ferromagnetic wires (invited). // J. Appl. Phys., 1994, vol. 76, no. 10, p. 6204-6209.
13. N.A. Usov, A.S. Antonov, A.N. Lagar'kov. Theory of giant magneto-impedance effect in amorphous wires with different types of magnetic anisotropy. // JMMM, 1998, vol.185, №2, p. 159-173.
14. E.P Harrison, G.L. Turney, L.L. Rowe. Electrican properties of wires of high permeability. // Nature, 1935, vol. 135, p.961.
15. E.P Harrison, G.L. Turney, H. Rowe, H. Gollop. The electrical properties of high permeability wires carrying alternating current. // Proc. Roy. Soc., 1936, vol. 157, no. 891, p. 451-479.
16. Y.Imry, S.-K. Ma. Random field instability of ordered state of continuous symmetry. // Phys. Rev. Lett., 1975, vol.35, №21, p.1399-1401.
17. J.M.D. Coey. Amorphous magnetic order. // J. Appl. Phys., 1978, vol.49, p.1646-1652.
18. В.А. Игнатченко, Р.С. Исхаков, Г.В. Попов. Закон приближения намагниченности к насыщению в аморфных ферромагнетиках. // ЖЭТФ, 1982, т.82, №5, с. 1518-1531.
19. Р.С. Исхаков, С.И. Комогорцев, Ж.М. Мороз, Е.Е. Шалыгина. Характеристики магнитной микроструктуры аморфных и нанокристаллических ферромагнетиков со случайной анизотропией: теоретические оценки и эксперимент. // Письма в ЖЭТФ, 2000, т.72, №12, с. 872-878.
20. G.V. Kurlyandskaya, V.F. Miyar. Surface modified amorphous ribbon based magnetoimpedance biosensor. // Biosensors and Bioelectronics, 2007, vol. 22, p. 2341-2345.
21. O. Montero, V. Raposo, D. Garcia, J. Iniguez. Temperature effect in Co-based amorphous wires. // JMMM, 2006, vol. 304, p. e859-861.
22. Г.В. Курляндская, М. Баскес, Дж. Маккорд, Дж.Л. Миньез, 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, № 6, с. 27-34.
23. J. Milne, J. Gore, G. Tomka, P. Skull. Effect of stress, temperature and annealing conditions on the transport properties of amorphous wires. // JMMM, 2001, vol. 226 - 230, p. 715-717.



24. M.M. Tehrani, M. Ghanaatshoar, S.M. Mohseni, M. Coisson, M. Vazquez. Temperature dependence of magnetoimpedance in annealed Co-based ribbons. // *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2005, vol. 351, p. 2983-2986.
25. G. Chen, X.L. Yang, L. Zeng, J.X. Yang, F.F. Gong, D.P. Yang, Z.C. Wang. High-temperature giant magnetoimpedance in Fe-based nanocrystalline alloy. // *J. Appl. Phys.*, 2000, vol. 87, p. 5263-5265.
26. A. Rakhmanov, N. Perov, P. Sheverdyeva, A. Granovsky, A. Antonov. The temperature dependence of the magneto-impedance effect in the Co-based amorphous wires. // *Sensors and Actuators A.*, 2003, vol. 106, p. 240-242.
27. A. Radkovskaya, A. Rakhmanov, N. Perov, P. Sheverdyeva, A. Antonov. The thermal and stress effect on GMI in amorphous wires. // *JMMM*, 2002, vol. 249, p. 113-116.
28. C.G. Kim, Y.W. Rheem, C.O. Kim, S.S. Yoon, E.A. Ganshina, M.Yu. Kochneva, D.A. Zaichenko. High-temperature dependence of asymmetric giant magnetoimpedance and magnetostatic properties in Co-based amorphous ribbon. // *JMMM*, 2003, vol. 258 - 259, p. 170-173.
29. H. Chiriac, C.S. Marinescu, T.A. Ovari. Temperature dependence of the magneto-impedance effect in Co-rich amorphous glass covered wires. // *JMMM*, 2000, vol. 215 - 216, p. 539-541.
30. C. Gomez-Polo, M. Vazquez. Thermal dependence of magnetoimpedance in FeCrSiBCuNb nanocrystalline alloy. // *JMMM*, 2004, vol. 272 - 276, p. 1853-1854.
31. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Электродинамика сплошных сред*. М.: Наука, 1982.
32. Б.С. Бокштейн, Л.М. Капуткина, Г. Ковачев, Ю.Б. Левин, Г.С. Никольский. Кинетика выхода избыточного объема в аморфных сплавах на основе кобальта. // *ФММ*, 1991, № 12, с. 75-79.
33. Д.К. Белашенко. Механизмы диффузии в неупорядоченных средах (компьютерное моделирование). // *УФН*, 1999, вып. 169, с. 361-384.
34. C. Gomez-Polo, L.M. Socolovsky, M. Knobel, M. Vazquez. Temperature Detection Method Based on the Magnetoimpedance Effect in Soft Magnetic Nanocrystalline Alloys. // *Sensor Letters*, 2007, vol. 5, p. 196-199.
35. R.L. Sommer, A. Gundel, C.L. Chien. Magneto-impedance effects in multilayered permalloy materials. // *J. Appl. Phys.*, 1999, vol. 86, p. 1057-1061.

36. L.V. Panina, K. Mohri. Magneto-impedance in multilayer films. // *Sensors and Actuators*, 2000, vol. 81, p. 71-77.
37. M. Knobel, M. Vazquez, L. Kraus. *Handbook of Magnetic Materials*. Amsterdam: Elsevier, 2003, vol. 15, p. 497-564.
38. G.V. Kurlyandskaya. Giant magnetoimpedance for sensor applications. // *Encyclopedia Of Sensors*, 2006, vol. 4, p. 205-237.
39. А.С. Антонов, С.Н. Гадетский, А.Б. Грановский, А.Л. Дьячков, В.П. Парамонов, Н.С. Перов, А.Ф. Прокошин, Н.А. Усов, А.Н. Лагарьков. Гигантский магнетоимпеданс в аморфных и нанокристаллических мультислоях. // *ФММ*, 1997, т.83, № 6, с. 60-71.
40. Г.В. Курляндская, Н.Г. Бебенин, В.О. Васьковский. Гигантский магнитный импеданс проволок с тонким магнитным покрытием. // *ФММ*, 2011, т.111, № 2, с. 136-158.
41. V. Fal Miyar, M.A. Cerdeira, A.P. Garca, A. Potapov, R. Pierna, F.F. Marzo, J.M. Barandiaran, G.V. Kurlyandskaya. Giant magnetoimpedance of electrochemically surface modified Co-Based amorphous ribbons. // *IEEE Trans. Magn.*, 2008, vol. 44, p. 4476-4479.