

Кудрявцев Вячеслав Олегович

ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ИМПЕДАНС  
НИЗКОСТРИКЦИОННЫХ МАГНИТОМЯГКИХ ПРОВОЛОК  
НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре физики Иркутского государственного педагогического университета.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент  
**Семиров Александр Владимирович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
**Васьковский Владимир Олегович**  
Уральский государственный университет,  
г. Екатеринбург

кандидат физико-математических наук, доцент  
**Зубрицкий Сергей Моисеевич**  
Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Ведущая организация: **Институт физики металлов УрО РАН,**  
г. Екатеринбург

Защита состоится «7» мая 2008 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.074.04 при Иркутском государственном университете по адресу: 664003 г. Иркутск, бульвар Гагарина, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Иркутского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.074.04  
кандидат физико-математических наук,  
доцент



Мангазеев Б.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время изучение свойств ферромагнитных магнитомягких сплавов является одним из актуальных направлений в области физики магнитных явлений. К таким материалам, в частности, относятся аморфные ферромагнитные сплавы на основе кобальта и железа. Интерес к данным материалам вызван уникальными магнитными свойствами, которые в основном обусловлены особенностями магнитной структуры неупорядоченных конденсированных сред. К важным с прикладной точки зрения свойствам аморфных ферромагнитных материалов относятся высокочастотная магнитная проницаемость и связанный с ней высокочастотный импеданс. Обнаруженный относительно недавно в аморфных магнитомягких материалах эффект изменения величины полного сопротивления под действием внешнего магнитного поля – эффект гигантского магнитоимпеданса [1–3] сконцентрировал внимание ученых на данной проблеме.

В первую очередь исследователей привлекает чрезвычайная чувствительность доменной структуры магнитомягких ферромагнитных сплавов к различным внешним воздействиям, что приводит к значительным изменениям их высокочастотных свойств. Указанные особенности позволяют использовать данные сплавы в качестве материала для изготовления чувствительных элементов в датчиках различных физических величин [4–6].

С точки зрения использования в датчиках магнитного поля наиболее интересны материалы на основе кобальта с близкой к нулю константой магнитострикции насыщения  $\lambda_s$ , поскольку именно в этих материалах эффект изменения импеданса под действием внешнего магнитного поля наибольший.

Для датчиков механических напряжений традиционно предлагается использовать материалы с высокими значениями константы магнитострикции  $\lambda_s$ . Однако вследствие значительной величины  $\lambda_s$  коэрцитивная сила у этих материалов оказывается достаточно большой, что приводит к нестабильности параметров преобразователей [7]. В связи с этим, в ряде случаев использование материалов с малой величиной константы магнитострикции насыщения в качестве чувствительных элементов датчиков упругих напряжений может быть более предпочтительным.

Анализ литературы показывает, что основной объем исследований, посвященных изучению высокочастотных свойств аморфных материалов, выполнен на образцах с низкими отрицательными ( $-10^{-7}$ ) и высокими положительными ( $10^{-5}$ ) значениями константы магнитострикции. Вопросы о влиянии упругих растягивающих напряжений на высокочастотные свойства аморфных материалов с малой положительной константой магнитострикции насыщения до сих пор остаются малоизученными. Настоящая работа посвящена изучению влияния упругих растягивающих напряжений на импеданс низкострикционных магнитомягких проволок на основе кобальта.

**Цель работы:** Исследовать влияние упругих деформаций растяжения на импеданс и магнитную проницаемость низкострикционных магнитомягких

проволок на основе кобальта. Выявить основные закономерности изменений импеданса и магнитной проницаемости низкострикционных магнитомягких проволок при воздействии упругих растягивающих напряжений.

### **Задачи:**

1. Изучить влияние упругих растягивающих напряжений на полевые и частотные зависимости импеданса и продольной дифференциальной магнитной проницаемости низкострикционных аморфных ферромагнитных проволок на основе кобальта.
2. Исследовать влияние отжига постоянным электрическим током аморфных ферромагнитных проволок на их импеданс и продольную дифференциальную магнитную проницаемость, а также на характер изменения этих параметров под воздействием упругих растягивающих напряжений.
3. Установить закономерности изменений импеданса и магнитной проницаемости магнитомягких проволок под воздействием упругих растягивающих напряжений.
4. Дать объяснение изменений импеданса и магнитной проницаемости низкострикционных магнитомягких проволок под воздействием упругих растягивающих напряжений исходя из связи их высокочастотных свойств с процессами перемагничивания, а также структурными изменениями аморфных сплавов, происходящими при их отжиге.

### **Объект исследования**

Аморфные ферромагнитные проволоки на основе кобальта двух составов:  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ . Проволоки получены в ЦНИИ ЧЕРМЕТ им. Л.П. Бардина методом быстрой закалки из расплава. Диаметр образцов для состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  варьировался в диапазоне от 110 мкм до 130 мкм; для состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  – от 150 мкм до 180 мкм. Индукция насыщения образцов обоих составов составляла 0,4 Тл. Образцы имели низкую константу магнитострикции  $\lambda_s \sim 10^{-7}$ . Также, в качестве образцов использовались магнитомягкие проволоки состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  диаметром 175 мкм, отожженные постоянным электрическим током. Отжиг производился на воздухе в течение 5 минут. Плотность тока отжига  $j$  варьировалась в диапазоне от 0 до  $46 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>.

### **Научная новизна**

1. Впервые обнаружено, что влияние упругих растягивающих напряжений на начальный импеданс и продольную магнитную проницаемость аморфных низкострикционных ферромагнитных проволок составов  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ ;  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  различно на высоких и низких частотах. Основной причиной экстремальной зависимости начального импеданса от величины упругих растягивающих напряжений на частотах ВЧ тока выше 2 МГц является увеличение циркулярной

- магнитной проницаемости при повороте намагниченности в приповерхностной доменной структуре в аксиальном направлении.
2. Установлено, что величина плотности тока отжига селективно влияет на значения эффекта магнитоимпеданса в магнитомягких проволоках состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ . Показано, что увеличение значений магнитоимпедансного эффекта связано с понижением поля эффективной циркулярной анизотропии вследствие снятия закалочных напряжений при плотностях тока отжига близких к  $6,2 \times 10^6 \text{ А/м}^2$  и сменой механизма наведения анизотропии при плотностях тока отжига  $33,3 \times 10^6 \text{ А/м}^2$ .
  3. Впервые обнаружено, что для проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ , отожженных постоянным электрическим током, при величине упругих растягивающих напряжений больших 100 МПа можно выделить три диапазона плотностей тока отжига ( $I - j = (4,2 \times 10^6 \div 12,5 \times 10^6) \text{ А/м}^2$ ,  $II - j = (25 \times 10^6 \div 33,3 \times 10^6) \text{ А/м}^2$ ,  $III - j \geq 35,4 \times 10^6 \text{ А/м}^2$ ), в каждом из которых импеданс проволок имеет близкие значения.
  4. Впервые показано, что определение типа структурных изменений при отжиге аморфных проволок возможно на основе анализа зависимостей импеданса проволок от упругих растягивающих напряжений и внешних магнитных полей.

### **Практическая значимость**

Полученные результаты могут быть использованы при разработке датчиков и преобразователей различных величин на основе магнитоимпедансного эффекта. Также представляется возможным использовать обработку постоянным электрическим током как средство для целенаправленного изменения магнитных параметров аморфных сплавов, служащих материалом для построения элементов электронных устройств. Обнаруженная высокая чувствительность магнитоимпеданса к весьма незначительным структурным изменениям, происходящим при отжиге, позволяет использовать его для определения характера этих изменений.

### **Защищаемые положения**

1. Влияние упругих растягивающих напряжений на импеданс и продольную магнитную проницаемость аморфных низкострикционных ферромагнитных проволок составов  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ ;  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  различно на высоких и низких частотах. Появление экстремальной зависимости начального импеданса проволок от величины упругих растягивающих напряжений на частотах ВЧ тока выше 2 МГц связано с увеличением циркулярной магнитной проницаемости, вызванным поворотом намагниченности в приповерхностной доменной структуре в аксиальном направлении.
2. Селективное влияние плотности тока отжига на степень изменения импеданса магнитомягких проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ , выраженное в увеличении значений магнитоимпедансного эффекта при плотностях тока отжига  $6,2 \times 10^6 \text{ А/м}^2$  и  $33,3 \times 10^6 \text{ А/м}^2$ , обусловлено

понижением поля эффективной циркулярной анизотропии вследствие снятия закалочных напряжений при первом значении плотности тока отжига и сменой механизма наведения анизотропии при втором.

3. При величине упругих растягивающих напряжений, больших 100 МПа, в проволоках составов  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  можно выделить три диапазона плотностей тока отжига, в каждом из которых их импеданс будет иметь близкие значения. Причиной наличия трех диапазонов плотностей тока отжига является преимущественное протекание в этих диапазонах различных процессов структурной перестройки сплавов, вызывающих соответствующие изменения их импедансных свойств.
4. Определение типа структурных изменений, происходящих при отжиге аморфных проволок возможно на основе анализа зависимостей импеданса проволок от упругих растягивающих напряжений и внешних магнитных полей.

### **Апробация работы**

Основные результаты исследования были представлены на следующих международных и всероссийских научных конференциях и семинарах:

Moscow International Symposium on Magnetism (Москва, 2005); XX международная школа-семинар «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (Москва, 2006); V международная конференция «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов» (Воронеж, 2005); Eight International Workshop on Non-Crystalline Solids (Spain, 2006); Всероссийская научно-техническая конференция «Методы создания, исследования материалов, приборов и экономические аспекты микроэлектроники» (Пенза, 2006); Региональная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике (Владивосток, 2006); XV Республиканская научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» (Гродно, Беларусь, 2007); VII Международная конференция «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов» (Воронеж, 2007); Thirteenth international conference on liquid and amorphous metals (Екатеринбург, 2007).

### **Публикации**

По результатам исследований опубликовано 18 работ, из них 4 статьи в рецензируемых журналах.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 120 страниц, включая 29 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 126 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы. Дана краткая характеристика работы и структура изложения материала. Приведены сведения о научной новизне и практической значимости проведенных исследований.

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней отражены ключевые моменты для понимания сути магнитоимпедансного эффекта. Представлен анализ основных работ, посвященных эффекту гигантского магнитоимпеданса, а также краткий обзор работ по влиянию отжига и механических напряжений на магнитоимпедансный эффект.

**Во второй главе** описаны экспериментальные установки и методики проведения исследований импеданса, высокочастотной магнитной проницаемости, квазистатических магнитных характеристик, а также методика проведения рентгеноструктурных исследований.

Метод измерения импеданса исследованных образцов был основан на вычислении модуля полного сопротивления  $Z$  образца по величине электрического напряжения на нем при условии, что величина ВЧ тока, протекающего через образец, постоянна. Исследование магнитной проницаемости проведено радиочастотным методом. Квазистатические магнитные характеристики (остаточная индукция, коэрцитивная сила, продольная магнитная проницаемость) определялись из петель гистерезиса, снятых баллистическим методом. Рентгеноструктурные исследования образцов проводились методом Дебая-Шерера.

**В третьей главе** представлены результаты исследований влияния упругих напряжений на полевые и частотные зависимости импеданса и продольной дифференциальной магнитной проницаемости низкострикционных аморфных ферромагнитных проволок составов  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ ,  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ .

Проведенные исследования показали, что упругие растягивающие напряжения оказывают существенное влияние на импеданс и дифференциальную магнитную проницаемость исследованных образцов. Причем характер этого влияния различен на низких и высоких частотах.

На частотах ВЧ тока выше 2 МГц графики зависимостей начального импеданса  $Z_0$  проволок от упругих растягивающих напряжений  $\sigma$  имеют немонотонный вид (рис. 1).

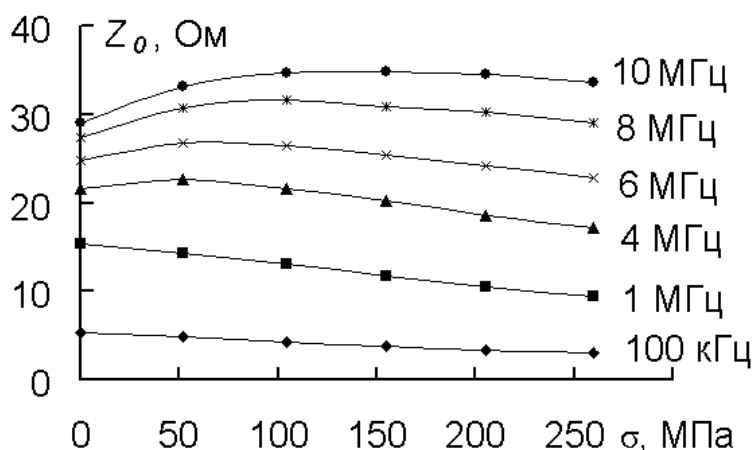


Рис. 1. Графики зависимости начального импеданса  $Z_0$  аморфных проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  диаметром 170 мкм от внешних упругих растягивающих напряжений  $\sigma$  для разных частот ВЧ тока.

С увеличением  $\sigma$  для образцов обоих составов наблюдается сначала рост начального импеданса, а затем, когда величина упругих растягивающих напряжений становится больше некоторого критического значения  $\sigma_{кр}$ , наблюдается его падение. Значение  $\sigma_{кр}$  для разных частот различно. С ростом частоты ВЧ тока максимум на зависимости  $Z_0(\sigma)$  смещается в область больших значений  $\sigma$ . При частотах ВЧ тока 2 МГц и ниже начальный импеданс образцов монотонно падает с увеличением упругих растягивающих напряжений, зависимости  $Z_0(\sigma)$  близки к линейным.

На частотах ВЧ тока 2 МГц и выше полевые зависимости импеданса  $Z(H)$  для исследованных образцов при  $\sigma = 0$  и  $H \neq 0$  имеют максимум (рис. 2).

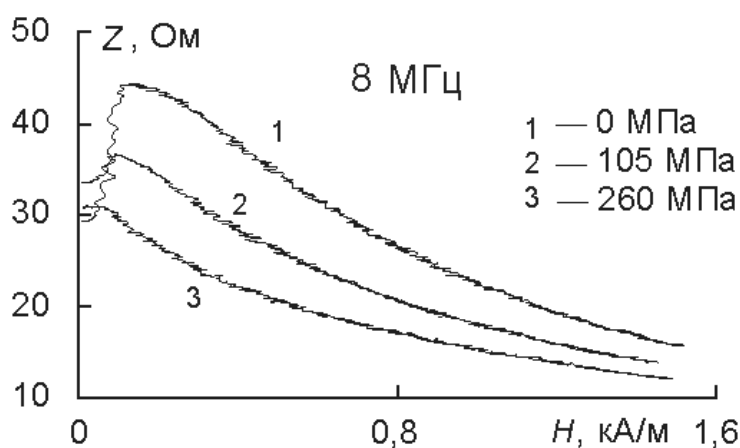


Рис. 2. Графики полевых зависимостей импеданса проволоки состава  $Co_{66}Fe_4Nb_{2.5}Si_{12.5}V_{15}$  диаметром 150 мкм на частоте 8 МГц при различных величинах упругих растягивающих напряжений.

При растяжении образца с ростом  $\sigma$  максимум на зависимостях  $Z(H)$  смещается в область меньших магнитных полей, при этом максимальное значение импеданса  $Z_m$  падает.

При некотором значении  $\sigma$ , различном для разных частот, участок начального увеличения импеданса с ростом  $H$  на зависимостях  $Z(H)$  не наблюдается, то есть импеданс принимает максимальное значение в нулевом внешнем магнитном поле.

Аналогичное поведение зависимостей  $Z_0(\sigma)$  и  $Z(H)$  в исследованном частотном диапазоне (100 кГц – 10 МГц) было также характерно и для образцов состава  $Co_{66}Fe_4Ta_{2.5}Si_{12.5}V_{15}$ .

Исследования продольной дифференциальной магнитной проницаемости показали, что степень и характер влияния упругих растягивающих напряжений различны на низких и высоких частотах пробного переменного магнитного поля. На рисунке 3 приведены графики полевых зависимостей отношения дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_{(H)}$  в магнитном поле  $H$  при различных значениях величины упругих растягивающих напряжений к максимальной дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_{m(\sigma=0)}$  при  $\sigma=0$  для двух частот пробного поля.



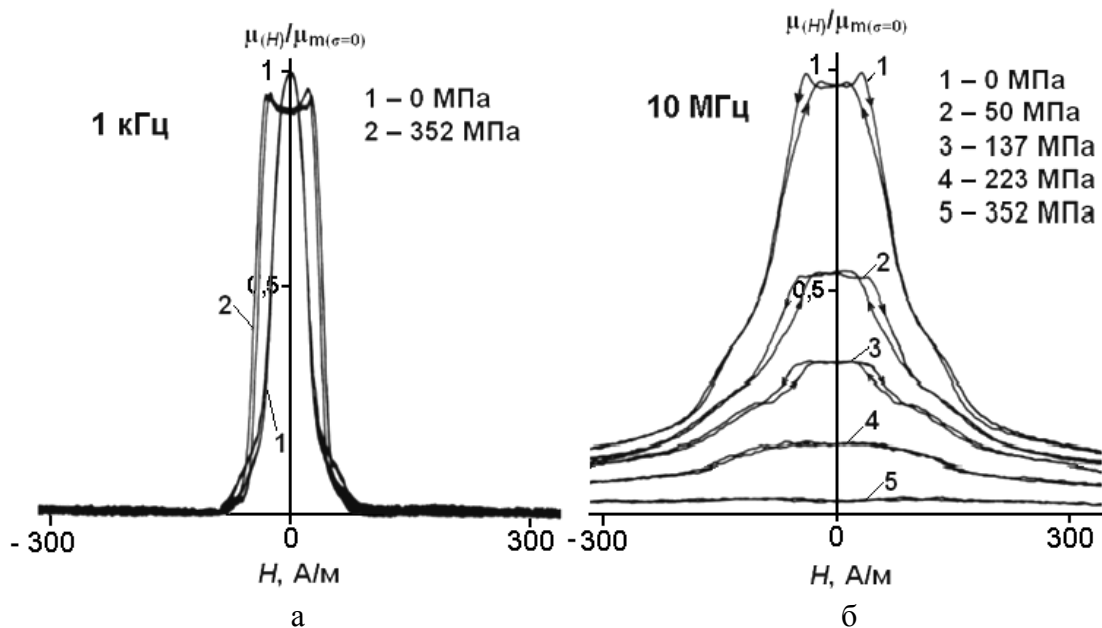


Рис. 3. Полевые зависимости отношения дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu(H)$  в магнитном поле  $H$  при различных значениях величины упругих растягивающих напряжений к максимальной дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_m(\sigma=0)$  при  $\sigma=0$  для частот пробного поля 1 кГц (а) и 10 МГц (б). Зависимости получены на аморфных проволоках состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  диаметром 170 мкм.

На относительно низких частотах менее 10 кГц изменение максимальной дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_m$  под воздействием растягивающих напряжений  $\sigma$ , изменяющихся в интервале от 0 до 350 МПа, не превышает 10 %. При  $\sigma=0$  зависимость  $\mu(H)/\mu_m(\sigma=0)=f(H)$  имеет в магнитном поле  $H=0$  четко выраженный максимум (рис. 3а). При увеличении поля  $H$ , магнитная проницаемость падает и при  $H_n=100$  А/м становится близка к проницаемости насыщения. С ростом растягивающих напряжений  $\mu_m$  уменьшается и на кривой  $\mu(H)$  появляются два пика. Соответствующие им магнитные поля  $H$  с увеличением  $\sigma$  возрастают, при этом величина поля  $H_n$  изменяется незначительно.

На частотах более 10 кГц характер влияния упругих растягивающих напряжений на зависимость  $\mu(H)/\mu_m(\sigma=0)=f(H)$  изменяется. При  $\sigma = 0$  в магнитных полях до 100 А/м наблюдается слабый гистерезис магнитной проницаемости (рис. 3б). С дальнейшим ростом магнитного поля проницаемость монотонно уменьшается. Максимум зависимости  $\mu(H)/\mu_m(\sigma=0)=f(H)$  с ростом  $\sigma$  также уменьшается и сглаживается. На частоте 10 МГц с увеличением упругих растягивающих напряжений  $\sigma$  до 352 МПа падение  $\mu_m$  достигает 93%.

Предлагаемое объяснение полученных результатов основано на представлениях, согласно которым импеданс проволок  $Z$  и характер зависимости импеданса от внешнего магнитного поля зависит от циркулярной магнитной проницаемости образца, которая определяется доменной структурой и процессами перемагничивания.

На основе традиционных модельных представлений о доменной структуре аморфных проволок с высокими положительными значениями константы

магнитострикции  $\lambda_s$  не удается объяснить следующие экспериментально наблюдаемые факты:

1. Существование максимума на полевых зависимостях импеданса  $Z(H)$  исследованных низкострикционных проволок ( $\lambda_s > 0$ ) на относительно высоких частотах ВЧ тока;

2. Смещение максимума на полевых зависимостях импеданса  $Z(H)$  в область меньших магнитных полей при воздействии упругих растягивающих напряжений;

3. Немонотонное изменение начального импеданса  $Z_0$  проволок на частотах ВЧ тока выше 2 МГц при возрастании упругих растягивающих напряжений.

На основании сказанного и учитывая, что величина магнитострикции насыщения у исследованных проволок весьма малая, порядка  $10^{-7}$ , что подтверждено исследованиями квазистатической продольной магнитной проницаемости, было предположено, что в приповерхностной области исследованных низкострикционных проволок намагниченность имеет преимущественно циркулярное направление. Во внутренней центральной области проволок намагниченность направлена аксиально.

При воздействии на образец упругими растягивающими напряжениями намагниченность приповерхностной области будет ориентироваться к продольному направлению, циркулярная анизотропия будет уменьшаться, что приведет к смещению максимума на полевой зависимости импеданса  $Z(H)$  в область меньших магнитных полей (рис. 2). При этом продольная магнитная проницаемость на высоких частотах должна уменьшаться (рис. 3б).

На частотах, больших частоты релаксации доменных границ, при  $H=0$  циркулярная магнитная проницаемость будет возрастать с приложением упругих растягивающих напряжений до тех пор, пока намагниченность в приповерхностной области не станет ориентированной аксиально при  $\sigma = \sigma_k$ . С дальнейшим увеличением упругих растягивающих напряжений циркулярная магнитная проницаемость будет уменьшаться вследствие роста магнитоупругой энергии. Такое поведение циркулярной магнитной проницаемости приведет к экстремальному изменению начального импеданса от упругих растягивающих напряжений на относительно высоких частотах с точкой максимума при  $\sigma = \sigma_{кр}$  (рис. 1). Теоретически полученные оценки величины  $\sigma_{кр}$  дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

На относительно низких частотах циркулярная магнитная проницаемость и связанный с ней импеданс будут монотонно падать с приложением упругих растягивающих напряжений, поскольку основной вклад в циркулярную проницаемость будут давать процессы смещения доменных границ приповерхностной области, а также процессы перемагничивания более глубоких областей проволоки. Последнее также является основной причиной изменения характера полевых зависимостей продольной дифференциальной магнитной проницаемости при понижении частоты высокочастотного поля (рис. 3).

**В четвертой главе** представлены результаты влияния отжига электрическим током на импеданс и магнитную проницаемость ферромагнитных проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ , а также изменение этих характеристик в зависимости от величины упругих растягивающих напряжений.

Исследования показали, что отжиг аморфных образцов постоянным электрическим током с плотностью  $j$  в диапазоне от  $4,2 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup> до  $35,4 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup> приводит к немонотонному изменению импеданса образцов, что отражается на зависимостях положительного эффекта магнитоимпеданса от плотности тока отжига (рис. 4). Величина максимального положительного эффекта магнитоимпеданса определялась по максимальному значению ГМИ-отношения:  $(\Delta Z/Z)_{\max} = (Z_m - Z_0) \times 100\% / Z_0$ , где  $Z_0$  – начальный импеданс в нулевом внешнем поле  $H=0$ ,  $Z_m$  – импеданс образца, соответствующий максимуму на полевой зависимости  $Z(H)$ .

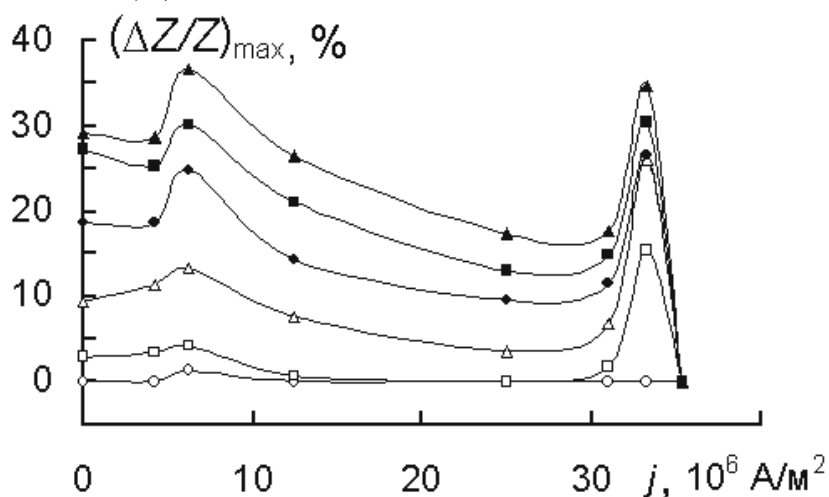


Рис. 4. Графики зависимостей максимального положительного ГМИ-эффекта  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  от величины плотности тока отжига  $j$  при различных частотах ВЧ тока: ○ – 0,5 МГц; □ – 2 МГц; △ – 4 МГц; ● – 6 МГц; ■ – 8 МГц; ▲ – 10 МГц.

На частоте 0,5 МГц для образцов, обработанных током с плотностью  $j = 6,2 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>, максимальный положительный эффект магнитоимпеданса принимает значение порядка 1 %. При других значениях плотности тока отжига на этой частоте величина ГМИ-отношения  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  близка к нулю.

Для частот 2 МГц и выше при  $j = 6,2 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup> на графиках зависимости  $(\Delta Z/Z)_{\max} = f(j)$  присутствуют два характерных пика, соответствующих двум значениям плотности тока отжига  $j$ :  $6,2 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup> и  $33,3 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>. При плотностях тока отжига  $j \geq 35,4 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup> величина положительного ГМИ-эффекта падает до нуля.

То есть плотность тока отжига селективно влияет на степень изменения импеданса исследованных магнитомягких проволок.

Отжиг постоянным электрическим током приводит не только к изменениям начального импеданса и величины эффекта магнитоимпеданса, но и к изменению других параметров, определяемых по полевым зависимостям импеданса. На рисунке 5 показана зависимость поля  $H_m$ , соответствующего

максимуму импеданса на полевой зависимости  $Z(H)$  от величины плотности тока отжига  $j$ .

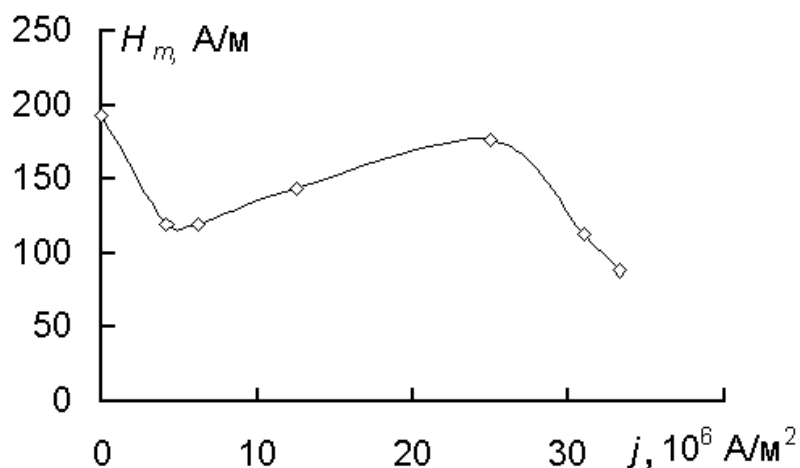


Рис. 5. График зависимости поля  $H_m$ , соответствующего максимуму импеданса на полевой зависимости  $Z(H)$  при частоте ВЧ тока 8 МГц от плотности тока отжига проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  и диаметром 175 мкм.

Поле максимума  $H_m$  близко к полю эффективной циркулярной анизотропии проволоки  $H_k$ , поэтому оно является важной характеристикой отожженных образцов. В диапазоне  $j$  от 0 до  $6,2 \times 10^6 \text{ A/м}^2$  величина  $H_m$  падает, затем при возрастании  $j$  от  $6,2 \times 10^6 \text{ A/м}^2$  до  $25 \times 10^6 \text{ A/м}^2$  наблюдается рост поля максимума.

В диапазоне  $j = (25 \times 10^6 \text{ A/м}^2 \div 33,3 \times 10^6 \text{ A/м}^2)$  поле максимума  $H_m$  уменьшается. При плотностях тока отжига  $j \geq 35,4 \times 10^6 \text{ A/м}^2$  максимум на полевых зависимостях  $Z(H)$  при  $H > 0$  не наблюдается.

Экспериментальные зависимости начального импеданса проволок на разных частотах ВЧ тока от величины упругих растягивающих напряжений  $Z_0(\sigma)$  для исходных аморфных образцов и образцов, подвергнутых обработке постоянным электрическим током, представлены на рисунке 6.

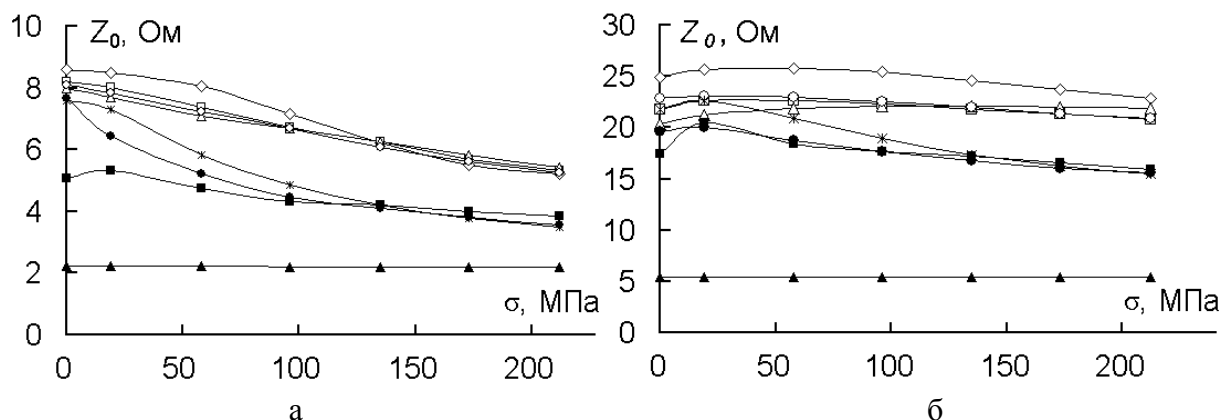


Рис. 6. Графики зависимостей начального импеданса  $Z_0$  проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  на частотах ВЧ тока 0,5 МГц (а) и 8 МГц (б) от упругих растягивающих напряжений  $\sigma$  для образцов, отожженных постоянным током:  $\diamond$  – зависимость  $Z_0(\sigma)$ , получена на исходном аморфном образце;  $\circ$  – зависимость  $Z_0(\sigma)$  – на образце, подвергнутом отжигу при плотности тока  $j = 4,2 \times 10^6 \text{ A/м}^2$ ;  $\square$  –  $j = 6,2 \times 10^6 \text{ A/м}^2$ ;  $\Delta$  –  $j = 12,5 \times 10^6 \text{ A/м}^2$ ; \* –  $j = 25 \times 10^6 \text{ A/м}^2$ ;  $\bullet$  –  $j = 31 \times 10^6 \text{ A/м}^2$ ;  $\blacksquare$  –  $j = 33,3 \times 10^6 \text{ A/м}^2$ ;  $\blacktriangle$  –  $j = 35,4 \times 10^6 \text{ A/м}^2$ .

В исследованном интервале плотностей тока отжига проволок можно выделить три диапазона, соответствующих близким значениям начального импеданса  $Z_0$  при величинах упругих напряжений  $\sigma > 100$  МПа. Первому диапазону соответствуют значения плотности тока  $j = (4,2 \times 10^6 \div 12,5 \times 10^6)$  А/м<sup>2</sup>, второму  $-j = (25 \times 10^6 \div 33,3 \times 10^6)$  А/м<sup>2</sup>, третьему  $-j \geq 35,4 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>.

Наличие данных диапазонов плотностей тока отжига характерно для всего исследованного частотного диапазона 0,5 ÷ 10 МГц. В области малых растягивающих напряжений (до 100 МПа) значения  $Z_0$  в указанных диапазонах плотностей тока отжига могут существенно различаться.

Следует отметить, что аналогичные диапазоны плотностей тока отжига можно выделить не только на зависимостях  $Z_0(\sigma)$ , но и на полевых зависимостях импеданса  $Z(H)$  при  $\sigma > 100$  МПа.

Полученные экспериментальные результаты объясняются на основе представлений о процессах структурной перестройки, протекающих при отжиге. Структурные изменения в проволоках влияют на их магнитную проницаемость и, следовательно, на импедансные свойства.

Из сравнения рисунков 4 и 5 следует, что при возрастании максимального положительного ГМИ-эффекта  $(\Delta Z/Z)_{max}$  наблюдается уменьшение величины поля максимума  $H_m$ , а, следовательно, и поля эффективной циркулярной анизотропии  $H_k$ . То есть, увеличение величины ГМИ-эффекта при отжиге постоянным электрическим током связано с уменьшением поля эффективной циркулярной анизотропии. Уменьшение поля анизотропии при плотностях тока отжига  $j \approx 6,2 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>, по-видимому, вызвано снятием внутренних закалочных напряжений в проволоке. Появление второго участка падения  $H_m$  при  $j > 25 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup> может быть связано с тем, что при указанных плотностях тока  $j$  отжиг происходит при температурах выше точки Кюри (для исследованных аморфных сплавов – 160 °С). В таких условиях действие механизмов направленного упорядочения, способствующих наведению циркулярной анизотропии и соответственно увеличению  $H_k$ , сведено к минимуму.

Вероятной причиной наличия трех диапазонов плотностей тока отжига  $j$  является преимущественное протекание в этих диапазонах различных процессов структурной перестройки исходных аморфных образцов.

Учитывая сложную магнитную доменную структуру проволок, различие ориентаций намагниченности в центральной и приповерхностной областях, можно утверждать, что происходящие изменения импеданса будут определяться не только типом и степенью структурных изменений, но и областью их преимущественного протекания.

В первом диапазоне плотностей тока отжига  $j \approx (4,2 \times 10^6 \div 12,5 \times 10^6)$  А/м<sup>2</sup> протекают процессы структурной релаксации, которые сопровождаются снятием закалочных напряжений и вытеснением свободного объема из глубинных областей проволоки в приповерхностный слой. При этом концентрация дефектов на поверхности возрастает за счет уменьшения концентрации дефектов в глубине проволоки. На частотах выше 6 МГц глубина скин-слоя составляет менее 3 мкм и изменения импеданса можно связать со

структурными изменениями в приповерхностной области глубиной соответствующего скин-слоя. На частоте ВЧ тока равной 0,5 МГц глубина скин-слоя в несколько раз выше, чем на частоте 6 МГц. Исходя из этого импедансные свойства проволок на относительно низких частотах (порядка  $10^5$  Гц) будут определяться их интегральными структурными характеристиками как приповерхностных, так и более глубоких областей. Поскольку на первой стадии отжига концентрация дефектов в проволоке изменяется незначительно, а в основном происходит только их перераспределение по объему, изменения импеданса на относительно низких частотах будут менее существенны, чем на более высоких. Таким образом, можно заключить, что причиной возрастания различий в величине импеданса с ростом частоты ВЧ тока является более высокая чувствительность циркулярной магнитной проницаемости в приповерхностной области проволок к процессам структурной релаксации, чем в среднем по объему проволок. Данный вывод согласуется с экспериментально наблюдаемой слабой зависимостью импеданса на частоте 0,5 МГц от величины плотности тока отжига в диапазоне  $4,2 \times 10^6 \leq j \leq 12,5 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>, а также его существенным изменением на частотах выше 6 МГц (рис. 6).

При воздействии на проволоку упругих растягивающих напряжений магнитная доменная структура приобретает конфигурацию, соответствующую ориентирующему действию упругих напряжений. Так как в процессе структурной релаксации значительных изменений магнитных характеристик не происходит, то при высоких значениях растягивающих напряжений (более 100 МПа) у всех проволок, подвергнутых обработке током в диапазоне плотностей тока отжига  $4,2 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>  $\leq j \leq 12,5 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>, их магнитная проницаемость имеет близкие значения, близкие значения имеет и импеданс проволок.

Второму диапазону плотностей тока отжига соответствует первая стадия кристаллизации. В исследованных проволоках процесс кристаллизации имеет определенные особенности, обусловленные введением в основной состав ферромагнитного сплава ниобия в качестве легирующей добавки. Наличие в аморфном сплаве атомов ниобия препятствует росту размеров кристаллитов и при его отжиге способствует формированию нанокристаллической структуры. Таким образом, в диапазоне  $j \approx (25 \times 10^6 \div 33,3 \times 10^6)$  А/м<sup>2</sup> идет процесс формирования нанокристаллической структуры. Наблюдаемое изменение начального импеданса  $Z_0$  (при  $\sigma = 0$  МПа) на относительно низких частотах связано с изменением объема нанокристаллической фазы при увеличении плотности тока отжига (рис. 6а). По-видимому, при отжиге током процесс образования нанокристаллитов начинается в объемной области проволок и с ростом  $j$  распространяется к их поверхности. Изменения, происходящие в объемной области проволоки, влияют на ее магнитную проницаемость. Так как при этом ориентация намагниченности ядра вдоль длины проволоки сохраняется, при высоких значениях  $\sigma$  (более 100 МПа), приводящих к повороту намагниченности вдоль растягивающих напряжений и росту ядра, значения  $Z_0$  при разных  $j$  становятся близкими. Аналогичное поведение

зависимостей  $Z_0(\sigma)$  наблюдается и в области более высоких частот ВЧ тока (рис. 6б).

Третьему диапазону плотностей тока отжига  $j$  от  $35,4 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup> и выше соответствует вторая стадия кристаллизации, связанная с ростом размеров кристаллитов. Подтверждением этого может служить наблюдаемое увеличение остаточной индукции образцов и рост коэрцитивной силы. Для проволок, обработанных электрическим током с  $j=35,4 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup> и выше, значения их импеданса при воздействии растягивающих напряжений и внешних магнитных полей во всех исследованных интервалах  $\sigma$  и  $H$  изменялись незначительно (рис. 6). Рентгеноструктурными методами установлено наличие кристаллических фаз в образцах, отожженных при плотностях тока  $j \geq 35,4 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>.

Из экспериментальных зависимостей импеданса от упругих растягивающих напряжений  $Z(\sigma)$  и от внешнего магнитного поля  $Z(H)$  следует, что зависимости импеданса проволок от величины плотности тока отжига  $j$  нелинейны. У проволок, обработанных в диапазонах  $j$ , соответствующих разным процессам структурной перестройки сплавов, значения  $Z_0$  могут лежать в близких и даже перекрывающихся диапазонах. Однако воздействие на проволоки упругих растягивающих напряжений больших 100 МПа приводит к сужению этих диапазонов и росту интервалов значений импеданса между ними (рис. 6). Этот эффект может служить основой идентификации структурных изменений аморфных проволок, происходящих при их отжиге.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые обнаружено, что влияние упругих растягивающих напряжений на импеданс и продольную дифференциальную магнитную проницаемость аморфных низкострикционных ферромагнитных проволок составов  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ ;  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  различно на высоких и низких частотах магнитного поля.
2. Выявлены закономерности изменения начального импеданса аморфных низкострикционных ферромагнитных проволок составов  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ ;  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  при увеличении внешних упругих растягивающих напряжений. Показано, что на частотах ВЧ тока выше 2 МГц появление экстремальной зависимости начального импеданса проволок от величины упругих растягивающих напряжений связано с увеличением циркулярной магнитной проницаемости вследствие поворота намагниченности в приповерхностной доменной структуре в аксиальном направлении.
3. Установлено, что величина плотности тока отжига селективно влияет на степень изменения импеданса магнитомягких проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ , что выражается в увеличении значений магнитоимпедансного эффекта при плотностях тока отжига  $6,2 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>

и  $33,3 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>. Увеличение значений магнитоимпедансного эффекта связано с понижением поля эффективной циркулярной анизотропии вследствие снятия закалочных напряжений при первом значении плотности тока отжига и сменой механизма наведения анизотропии при втором.

4. Впервые обнаружено, что для проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ , отожженных постоянным электрическим током, при величине упругих растягивающих напряжений больших 100 МПа можно выделить три диапазона плотностей тока отжига, в каждом из которых их импеданс имеет близкие значения. Первому диапазону соответствуют плотности тока отжига  $j = (4,2 \times 10^6 \div 12,5 \times 10^6)$  А/м<sup>2</sup>, второму –  $j = (25 \times 10^6 \div 33,3 \times 10^6)$  А/м<sup>2</sup>, третьему –  $j \geq 35,4 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>.
5. Впервые показано, что определение типа структурных изменений, происходящих при отжиге аморфных проволок возможно на основе анализа зависимостей их импеданса от упругих растягивающих напряжений и внешних магнитных полей.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Semirov A.V., Kudryavcev V.O., Gavriilyuk A.A., Dushutin K.V., Anashko A.A. Influence of the elastic stretch strains on impedance of amorphous  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  wires in external magnetic fields// Moscow International Symposium on Magnetism. Books of abstracts. Moscow. - 2005. - P. 391–392.
2. Semirov A.V., Dushutin K.V., Anashko A.A., Agraphonov Yu.V., Gavriilyuk A.A. and Kudryavcev V.O. Influence of the elastic bend deformations on the impedance of amorphous wires in external magnetic fields// Moscow International Symposium on Magnetism: books of abstracts. Moscow, 2005. - P. 392 – 393.
3. Семиров А.В., Кудрявцев В.О., Гаврилюк А.А., Моисеев А.А. Магнитная проницаемость аморфных ферромагнитных проволок в широком частотном диапазоне// XX Междунар. школа-семинар Новые магнитные материалы микроэлектроники. Сб. трудов. М., 2006. - С.162 – 164.
4. Гаврилюк А.А., Гаврилюк А.В., Семенов А.Л., Семиров А.В., Моховиков А.Ю., Кудрявцев В.О. Процессы намагничивания аморфных металлических проволок  $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ // XX Межд. школа-семинар Новые магнитные материалы микроэлектроники. Сб. Тр. Москва. - 2006. - С.198 – 200.
5. Семиров А.В., Кудрявцев В.О., Гаврилюк А.А., Моисеев А.А. Влияние упругих напряжений растяжения на дифференциальную магнитную проницаемость аморфных ферромагнитных проволок в широком



- частотном диапазоне// Письма ЖТФ. - 2006. - Т. 23. - Вып. 3. - С. 24 – 29.
6. Семиров А.В., Гаврилюк А.А., Кудрявцев В.О., Душутин К.В., Анашко А.А. Исследование импеданса упругодеформированных аморфных проволок во внешних магнитных полях// Материалы VI Междунар. конф. Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов. Воронеж, 2005. - С. 197 – 199.
  7. Семиров А.В., Гаврилюк Б.В., Руденко А.А., Кудрявцев В.О., Ковалева Н.П. Магнитооптическая установка для исследования динамических свойств доменных границ в тонких ферромагнитных пленках// ЖТФ. - 2005. - Т. 75 - В. 10. - С. 128 – 130.
  8. Semirov A.V., Kudryavcev V.O., Gavrilyuk A.A., Moiseev A.A. Influence of tensile stress on differential magnetic permeability of amorphous ferromagnetic wires in a wide frequency range// Eight International Workshop on Non-Crystalline Solids. Abstract booklet. Spain. 2006. - P. 40.
  9. Gavriliuk A.A., Gavliliuk A.V., Semirov A.V., Mokhovikov A.Yu., Semenov A.L., Kovaleva N.P., Kudryavcev V.O. The magnetic properties of amorphous  $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$  wires// Eight International Workshop on Non-Crystalline Solids. Abstract booklet. Spain. 2006. - P. 41.
  10. Семиров А.В., Гаврилюк А.А., Кудрявцев В.О., Семенов А.Л. Влияние отжига электрическим током на эффект гигантского магнитоимпеданса в аморфных проволоках состава  $Co_{66}Fe_4Nb_{2,5}Si_{12,5}B_{15}$ // Всероссийская научно-техническая конф. «Методы создания, исследования материалов, приборов и экономические аспекты микроэлектроники». Сборник статей. Пенза. - 2006. - С. 22 – 24.
  11. Кудрявцев В.О., Моисеев А.А. Эффект гигантского магнитоимпеданса в упругодеформированных аморфных проволоках составов  $Co_{66}Fe_4Nb_{2,5}Si_{12,5}B_{15}$  и  $Co_{66}Fe_4Ta_{2,5}Si_{12,5}B_{15}$ // Региональная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике. Тезисы докладов. Владивосток. 2006. - С. 37 – 38.
  12. Гаврилюк А.А., Семиров А.В., Семенов А.Л., Гаврилюк А.В., Прудников Д.В., Кудрявцев В.О. Влияние растягивающих напряжений на  $\Delta E$  - эффект ферромагнитных лент  $Fe_{64}Co_{21}B_{15}$ // Письма ЖТФ. - 2007. - Т. 33. - Вып. 9. - С. 79–86.
  13. Кудрявцев В.О., Моисеев А.А., Букреев Д.А. Влияние отжига на импеданс аморфных ферромагнитных проволок состава  $Co_{66}Fe_4Nb_{2,5}Si_{12,5}B_{15}$ // XV Респ. Научн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов. Физика конденсированного состояния. Тезисы докл.: В 2ч. Гродно ГрГУ. 2007. - Ч2. - С. 3–5.
  14. Моисеев А.А., Букреев Д.А., Кудрявцев В.О., Багинский В.С. Автоматизированный измерительный комплекс для температурных исследований эффекта гигантского магнитоимпеданса// XV Респ. Научн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов. Физика конденсированного состояния Тезисы докл.: В 2ч. Гродно ГрГУ. 2007. Ч2. - С. 21–24.

15. Семиров А.В., Гаврилюк А.А., Кудрявцев В.О., Моисеев А.А., Букреев Д.А., Семенов А.Л., Ущাপовская З.Ф. Влияние отжига на импедансные свойства упругодеформированных магнитомягких проволок// Дефектоскопия.-2007.- №10. - С. 3 – 7.
16. Гаврилюк А.А., Семиров А.В., Семенов А.Л., Прудников Д.В., Турик Н.В., Кудрявцев В.О. Влияние растягивающих напряжений на ΔE-эффект в аморфных лентах Fe<sub>64</sub>Co<sub>21</sub>B<sub>15</sub>, обработанных электрическим током// Материалы VII Междунар. конф. Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов. Воронеж, 2007. - С. 87 – 92.
17. Кудрявцев В.О., Семиров А.В., Гаврилюк А.А., Моисеев А.А., Букреев Д.А., Семенов А.Л. Влияние отжига электрическим током на эффект гигантского магнитоимпеданса в упругодеформированных проволоках состава Co<sub>66</sub>Fe<sub>4</sub>Nb<sub>2,5</sub>Si<sub>12,5</sub>B<sub>15</sub>//Материалы VII Междунар. конф. Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов. Воронеж, 2007. - С. 82 – 86.
18. Semirov A.V., Gavriliuk A.A., Kudryavtsev V.O., Moiseev A.A., Bukreev D.A. Temperature influence on field dependences of impedance of amorphous CoFeNbSiB wires// Thirteenth international conference on liquid and amorphous metals. Books of abstracts. Ekaterinburg. 2007. - P. 60.

### Список цитированной литературы

1. Mohry K., Kohzawa T., Kawashima K., Yoshido H., Panina L.V. Magnetoinductive effect (MI effect) in amorphous wires// IEEE Trans. Magn.-1992. - V.28. - No.5. - P. 3150 – 3152.
2. Beach R.S., Berkowitz A.E. Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire// J. Appl. Phys. Lett. - 1994. - V.64. - P. 3652 –3654.
3. Антонов А.С. Магнитоимпеданс ферромагнитных микропроводов, тонких пленок и мультислоев при высоких частотах.: дисс. ... док. физ.-мат. наук. М. 2003. - 214 с.
4. Delooze P., Panina L.V., Mapps D.J. AC Biased sub-nano-tesla magnetic field sensor for low-frequency applications utilizing magnetoimpedance in multilayer films// IEEE Trans. Magn. - 2005. - V.41. - No.10. - P. 3652–3654.
5. Kurlyandskaya G., Levit V. Magnetic Dynabeads® detection by sensitive element based on giant magnetoimpedance// Biosensors and bioelectronics. -2005. - V.20. - P.1611– 1616.
6. Shen L.P., Uchiyama T., Mohri K., Kita E., Bushida K. Sensitive stress-impedance micro sensor using amorphous magnetostrictive wire// IEEE Trans. Magn. - 1997. - V.33. - No.5. - P. 3355 – 3357.
7. Сокол-Кутыловский О.Л. Исследование магнитоупругих свойств аморфных ферромагнетиков с целью их применения в магнитных и механических датчиках.: дис. ... док. техн. наук. Екатеринбург. - 1997. - 218 с.

Работа выполнена в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований № 05-08-18063а, №07-08-05037б и при целевой финансовой поддержке развития приборной базы научных исследований Министерством образования РФ.