



Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт теоретической и прикладной
электродинамики
Российской академии наук

125412, Москва, ул. Ижорская, 13, ИТПЭ РАН
ОКПО 29012159, ОГРН 1027739263441
ИНН/КПП 7713020549/771301001

Тел.: 7-495- 842385
Факс: 7-495-4842635
E-Mail: itae@itae.ru

№ 11406 – 05-2171/661
07.08.2015

(дата)

УТВЕРЖДАЮ

Академик РАН

А.Н. Лагарьков

Стега 2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Семирова Александра Владимировича

"Высокочастотный импеданс и магнитные свойства аморфных и
нанокристаллических ферромагнитных проводников при термическом,
деформационном и магнитополевом воздействиях",

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.11 - физика магнитных явлений

Диссертационная работа А.В. Семирова посвящена исследованию механизмов влияния термического, деформационного, магнитополевого воздействий на магнитные свойства и высокочастотный электрический импеданс

быстроокаленных металлических сплавов на основе переходных металлов в виде лент и проводов.

Актуальность диссертационной работы обусловлена тем, что широкий ряд аспектов влияния внешних факторов на высокочастотные магнитные и электрические свойства аморфных и нанокристаллических проводников слабо изучен, а также отсутствуют целостные представления о влиянии изменений магнитных характеристик, процессов перестройки доменной структуры аморфных и нанокристаллических сплавов в результате термических, деформационных и магнитопольевых воздействий на их высокочастотные свойства. Фундаментальный характер выявленных в диссертации закономерностей, их физических механизмов и универсальность рассматриваемых модельных объектов позволяет достаточно легко адаптировать развитые в работе модельные представления на широкий круг магнитных материалов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 221 наименования. Работа изложена на 266 страницах, включая 119 рисунков и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность исследований, определены их цели и задачи, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены новые научные результаты, показана практическая значимость работы и даны сведения об апробации ее результатов.

В первой главе рассмотрены различные методические аспекты измерения импеданса магнитомягких проводников в области высоких частот. Проанализированы особенности исследований импеданса при магнитопольевых, термических и деформационных воздействиях на проводник. Приведены описания разработанных измерительных установок магнитоимпедансной спектроскопии и данные о погрешности измерений. Представлены оценки уровня возникающих механических напряжений вследствие различия температурных коэффициентов расширения образца и держателя, а также проанализировано влияние собственного импеданса токоподводящей системы на измеряемые значения импеданса исследуемых материалов и частотные зависимости магнитоимпеданса.

Во второй главе приведены результаты исследований влияния доменной структуры аморфных металлических сплавов в виде лент и проводов на зависимости импеданса от внешнего магнитного поля и частоты, и проведен анализ

отклика магнитоимпеданса магнитомягких проводников на деформационные воздействия. Определены основные закономерности и механизмы влияния взаимной ориентации осей легкого намагничивания, внешнего магнитного поля, растягивающих напряжений и направления протекания высокочастотного тока на импеданс и магнитную проницаемость аморфных лент. Для магнитомягкого провода продемонстрирована принципиальная возможность применения квазистатического подхода для определения магнитной проницаемости и импеданса в частотном диапазоне до 100 МГц. Также показано, что при деформационном воздействии на аморфный провод с низким положительным значением константы магнитострикции мнимая компонента импеданса имеет более высокую чувствительность к ориентационным изменениям намагниченности в объеме провода, чем действительная составляющая. Предложена модель распределения намагниченности в аморфном металлическом проводе с малой положительной магнитострикцией, согласно которой доменная структура провода состоит из слоев с геликоидальной и аксиальной структурами, а также из ядра с циркулярной анизотропией. Также во второй главе обсуждаются причины асимметричности зависимости импеданса от внешнего поля, и дается объяснение особенностей влияния величины постоянного тока и частоты переменного тока на начальное значение импеданса магнитомягкого провода с комбинированным типом магнитной анизотропии.

В третьей главе исследовано влияние предварительной термической обработки и отжига электрическим током на структуру, магнитные свойства и импеданс быстрозакаленных металлических лент и проводов. Показано, что структурная релаксация исследованных проводников оказывает влияние на величину их импеданса в результате изменения уровня закалочных напряжений в приповерхностных областях. Установлено, что воздействие постоянного магнитного поля в ходе нанокристаллизации лент может приводить к значительным изменениям высокочастотных свойств. Установлена возможность обнаружения структурных изменений аморфных металлических сплавов при помощи анализа зависимостей их импеданса от упругих растягивающих напряжений, а также из анализа зависимостей импеданса от поля в упругодеформированных образцах. Продемонстрировано, что длительная изотермическая обработка аморфного провода на основе кобальта при

температурах значительно ниже температур начала кристаллизации и Кюри приводит к значительным изменениям его высокочастотных параметров. Данный результат объясняется изменением угловой дисперсии магнитной анизотропии в приповерхностной области и, соответственно, изменением величины циркулярной магнитной проницаемости.

В четвертой главе рассмотрен комплекс вопросов, связанных с термическим воздействием на аморфные и нанокристаллические металлические ленты и провода, а также термоиндуцированные изменения зависимостей их импеданса от внешнего поля и приложенных механических напряжений. Показано, что характер температурной зависимости высокочастотного импеданса аморфного провода CoFeNbSiB обусловлен конкурентным влиянием на магнитную проницаемость изменений намагниченности насыщения и константы магнитной анизотропии приповерхностного слоя, а также переориентацией оси легкого намагничивания, связанной с изменением уровня закалочных напряжений. Приведено объяснение экспериментально наблюдаемой тенденции смены характера температурной зависимости начального импеданса аморфного провода при увеличении постоянного подмагничивающего тока. Продемонстрировано, что причиной незначительного увеличения начального импеданса провода в начале нагрева при относительно высоких значениях постоянного тока является температурный рост угловой дисперсии анизотропии. При дальнейшем нагреве факторами, определяющими температурные изменения величины начального импеданса, становятся уменьшения намагниченности и углового отклонения линии легкого намагничивания от циркулярной ориентации. Для термически и термомагнитно обработанных лент FeSiBNbCu продемонстрировано изменение характера зависимости начального импеданса от температуры нагрева с изменением частоты переменного тока. Установлено, что значительную роль в температурных изменениях импеданса упругодеформированных нанокристаллических лент FeSiBNbCu играет их константа магнитострикции, а величину и знак константы магнитострикции можно оценить из анализа зависимостей импеданса от поля и приложенных напряжений. Установлено также, что с ростом температуры нагрева лент FeCoMoSiB до температуры Кюри в них происходит резкое немонотонное изменение импеданса, связанное с конкурирующими температурными изменениями намагниченности насыщения и

константы магнитной анизотропии. Показано, что высокая температурная чувствительность импеданса вблизи точки фазового перехода может быть использована для прецизионного определения температуры Кюри в аморфных и нанокристаллических металлических сплавах.

В пятой главе приведены результаты исследований зависимостей импеданса от поля и температуры для композитных материалов на основе аморфных магнитомягких сплавов. Установлено, что для многослойной системы $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_{15}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ характер зависимостей импеданса от внешнего поля определяется температурой нагрева. Из анализа температурных зависимостей импеданса этой многослойной системы при разных частотах сделан вывод о взаимном влиянии слоев на ориентацию намагниченности в области контакта, что приводит к образованию зоны поворота намагниченности. Исследовано также влияние полимерных покрытий на высокочастотные электрические свойства аморфных лент на основе кобальта. Показано, что полимерные покрытия не только обеспечивают хорошую обратимость импедансных характеристик композитного материала при изменении в широком интервале механических деформаций и температур нагрева, но и оказывают влияние на высокочастотные свойства магнитомягкого проводника с малой магнитострикцией.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы, которые в полной мере отражают полученные научные результаты.

Научная ценность работы заключается в развитии существующих представлений о магнитоимпедансе в магнитомягких материалах. Проведенный комплексный анализ позволил объяснить влияние термического, деформационного, магнитополевого воздействий на высокочастотный импеданс и магнитные свойства аморфных и нанокристаллических проводников с различными составами и геометрией.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные в диссертации результаты могут быть использованы для развития методик физического материаловедения и при создании прецизионных датчиков магнитного поля, деформации, температуры, а также биосенсоров, в которых чувствительными элементами являются магнитомягкие проводники.

По диссертации имеется ряд замечаний.

1. В работе практически отсутствует критический анализ современного состояния исследований эффекта гигантского магнитоимпеданса. Известно, что и в России, и за рубежом активно ведутся исследования этого явления, представляющего несомненный практический интерес. Если бы автор уделил большее внимание обзору основных направлений и результатов исследований магнитоимпеданса, обоснование цели и задач проведенного исследования выглядело бы более убедительным.

2. В диссертационной работе отмечается, что представленные результаты исследований импеданса магнитомягких проводников относятся к линейному режиму возбуждения, однако экспериментального подтверждения этого факта не приводится.

3. Исследование эффекта магнитоимпеданса проведено для магнитомягких материалов с различными магнитными и геометрическими параметрами, но в работе не представлено обоснование выбора исследуемых объектов.

4. Достаточно большой объем диссертационных исследований магнитоимпеданса был проведен на магнитомягких лентах, полученных быстрой закалкой из расплава. Хорошо известно, что для таких лент характерна шероховатая поверхность. Учитывая малые значения толщины скин-слоя в высокочастотном диапазоне, в работе следовало бы уделить внимание влиянию морфологических особенностей поверхности изучаемых лент на высокочастотный импеданс.

5. При рассмотрении изменений высокочастотных электрических свойств проводников в области ферромагнитного фазового перехода сделан вывод о возможности использования температурной зависимости импеданса для точного определения температуры Кюри, Однако в работе не приводятся сопоставления с результатами ее определения другими методами.

Сделанные замечания, однако, не влияют на общую положительную оценку диссертации А.В. Семирова и не снижают впечатления от объема проделанной работы и уровня полученных результатов.

Давая общую оценку диссертации А.В. Семирова, можно сказать, что работа представляет собой законченное, систематическое и важное научное исследование. Все полученные научные результаты являются принципиально новыми и вносят значительный вклад в развитие физики магнитных явлений и

физического материаловедения. Положения, выносимые на защиту, отражают весь комплекс проведенных исследований, по своей полноте и завершенности соответствуют уровню диссертаций на соискание ученой степени доктора наук. Проведенные А.В. Семировым исследования можно квалифицировать как научное достижение.

Согласно содержанию, диссертационная работа Семирова А.В. соответствует паспорту научной специальности 01.04.11 «Физика магнитных явлений» по формуле специальности и по области исследований в пунктах: 3. исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств; 4. разработка различных магнитных материалов, технологических приемов, направленных на улучшение их характеристик, приборов и устройств, основанных на использовании магнитных явлений и материалов.

Выбор современных методик проведения эксперимента и их хорошая апробация убеждают в достоверности полученных результатов и сформулированных на их основе научных положений и выводов.

Результаты работы рекомендуются для использования в организациях, работающих в области физики магнитных явлений, физического материаловедения и занимающихся фундаментальными и прикладными исследованиями высокочастотных электрических свойств магнитомягких проводников: Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова (г. Москва); Уральском федеральном университете имени первого президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург); Крымском федеральном университете имени В.И. Вернадского (г. Симферополь); Воронежском государственном техническом университете (г. Воронеж); Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург); Институте физики металлов Уральского отделения РАН (г. Екатеринбург); Физико-техническом институте Уральского отделения РАН (г. Ижевск); Институте физики им Л.В. Киренского СО РАН (г. Красноярск); Институте физики твердого тела РАН (г. Москва) и др.

По результатам работы опубликованы 32 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты диссертационной работы были представлены на более 30 российских и международных конференциях. Публикации полностью отражают материалы и результаты работы. Автореферат

соответствует содержанию диссертации.

Работа подробно обсуждалась на семинаре Института теоретической и прикладной электродинамики РАН 18 февраля 2015 г. и получила одобрение участников семинара. По результатам проведенного на заседании лаборатории №4 «Нанотехнологии композиционных материалов и тонкопленочных структур» ИТПЭ РАН обсуждения диссертации 17 июня 2015 рассмотрен и одобрен отзыв на диссертацию.

На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа А.В. Семирова удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук (пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Главный научный сотрудник ИТПЭ РАН,

доктор физ.-мат. наук

Антонов Анатолий Сергеевич