

Отзыв официального оппонента
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 Семирова А.В. посвящена экспериментальному исследованию зависимостей высокочастотного импеданса магнитомягких ферромагнитных аморфных и нанокристаллических материалов в виде лент и проволок от внешнего магнитного поля, механических напряжений, температуры и корреляции этих зависимостей с поведением магнитной проницаемости. Тема работы актуальна по целому ряду причин, имеющих как научное, так и прикладное значение. Во-первых, непрерывный и все возрастающий интерес к магнитомягким аморфным и нанокристаллическим материалам обусловлен их рекордными магнитомягкими свойствами, что делает их практически единственными кандидатами на новое поколение магнитомягких материалов для электротехнических применений. Во-вторых, магнитные датчики на эффекте гигантского магнитоимпеданса (ГМИ) в этих материалах все увереннее завоевывают новые важные позиции в сфере применений для измерений слабых магнитных полей, в том числе полей биомаркеров, и по оптимистичным прогнозам могут по чувствительности приблизиться к СКВИДам. В третьих, магнитоимпедансная спектроскопия стала с успехом применяться как в материаловедении, так и в дефектоскопии. Для развития всех этих направлений необходимо детальное понимание многочисленных особенностей поведения продольной и циркулярной магнитной проницаемости, действительной и мнимой частей магнитоимпеданса под влиянием различных внешних воздействий в широком диапазоне частот, температур, механических напряжений, параметров термообработки и т.д. Из вышесказанного следует, что тема диссертации Семирова А.В. актуальна, а появление работ, на которых основана его диссертация, было весьма важным и своевременным.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 221 наименование. Общий объем диссертационной работы составляет 266 страниц, в том числе 119 рисунков и 3 таблицы.

Первая глава посвящена целиком методике измерений. Во второй главе представлен анализ магнитоимпеданса и магнитной проницаемости планарных структур и проводов при различных ориентациях магнитного поля, оси легкого намагничивания, направления переменного тока. Третья глава содержит результаты по влиянию термообработки на структуру сплавов, их магнитные и электрические характеристики. В четвертой главе рассматривается влияние температуры и механических напряжений, а также совместного действия этих факторов на магнитные и высокочастотные электрические свойства изучаемых лент и проводов. В пятой главе приводятся данные о магнитоимпедансе композитных структур. Диссертация не содержит отдельной обзорной главы, но, по-видимому, это оправдано тем, что существуют хорошо написанные обзоры как по высокочастотной магнитной проницаемости, так и по магнитоимпедансу, тем более, что автор излагает при необходимости результаты предшествующих исследований и делает все требующиеся ссылки в соответствующих главах.

Поставленные задачи являются новыми, а полученные результаты оригинальны и вносят существенный вклад в понимание особенностей магнитоимпеданса в магнитомягких материалах, особенно в материалах с низкой положительной магнитострикцией. Новизна работы определяется развитием методики измерений магнитоимпеданса при совместном действии внешнего магнитного поля, механических напряжений и тепловом воздействии, детальном сопоставлении измеренных зависимостей магнитоимпеданса с расчетами магнитной проницаемости, сравнительном анализе влияния так называемой мягкой термообработки и термоотжига током и большим фактическом материале по магнитоимпедансу лент и проволок при вариации многочисленных параметров, что можно считать в совокупности основой магнитоимпедансной спектроскопии, как нового метода исследования магнитострикции, структурной релаксации, фазовых переходов, доменной структуры, деформаций и других важных параметров.

В отзыве невозможно перечислить все многочисленные новые результаты, полученные в диссертации, поэтому приведу только несколько из них, имеющих, по моему мнению, наибольший интерес и значение:

1. Разработан измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии, обеспечивающий измерения в широком диапазоне частот (до 110 МГц), температур (100-720 К), растягивающих сил (до 10 Н). По параметрам и возможностям, оригинальности конструкций контактов, системы компенсации возможных термических искажений при

измерении импеданса, учете собственного импеданса измерительной ячейки комплекс следует считать значительным методическим достижением.

2. Показано, что мнимая часть импеданса является более чувствительной к изменению целого ряда внешних параметров (например, ориентации внешнего магнитного поля относительно оси ленты или провода, деформациям), что важно для повышения чувствительности магнитных датчиков на ГМИ.

3. На основе анализа экспериментальных данных предложена новая трехслойная модель распределения намагниченности в проводах с низкой положительной магнитострикцией (рис. 2.30): kern с циркулярным направлением намагниченности, слой с продольным направлением и поверхностный слой с геликоидальной анизотропией. Более того, определены и характерные толщины этих слоев.

4. Показано, что на начальной стадии структурной релаксации ни статические магнитные измерения, ни электрические измерения не позволяют выявить происходящие изменения в структуре, тогда как высокочастотный импеданс фиксируют их. Это яркий пример возможностей магнитоимпедансной спектроскопии.

5. Предложен и апробирован для аморфного сплава $Fe_4Co_67Mo_{1.5}Si_{16.5}B_{11}$ магнитоимпедансный метод определения константы магнитострикции насыщения.

6. Впервые исследована температурная зависимость импеданса аморфных лент вблизи температуры Кюри. Показано, что вблизи температуры Кюри имеет место резкое изменение импеданса, температурная чувствительность которого на частоте 2 МГц достигает 8%/К, что может быть использовано для определения этой температуры.

7. В диссертации композитными материалами называются структуры, представляющие магнитомягкий ферромагнетик с поверхностным слоем из другого материала, который может быть магнитным (пермаллой) или полимером, играющим роль защитного покрытия. Надо сказать, что исследований магнитоимпеданса таких композитных структур на основе магнитомягких лент раньше не проводилось. Показано, что наличие поверхностного слоя может существенно изменить магнитоимпедансные спектры, улучшить коррозионную стойкость, механическую прочность и повысить температурную стабильность.

8. Как уже отмечено рецензентом выше при обсуждении новизны работы, по-видимому, главным ее результатом является не какой-либо конкретный впервые обнаруженный факт, а именно детальный, я бы сказал даже скрупулезный, анализ всех магнитоимпедансных зависимостей, в сопоставлении с данными и модельными расчетами магнитной проницаемости, с данными о сопротивлении, доменной структуре,

морфологии, кристаллизации и др. Эту огромную работу, требующую высокой квалификации, можно считать основой магнитоимпедансной спектроскопии.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений и подтверждается использованием современных методик, большим представленным в работе фактическим материалом, тщательным анализом полученных данных и их сопоставлением с результатами независимых исследований.

По сути сделанных в работе выводов замечаний у рецензента нет. Однако, работа не свободна от недостатков:

1. Автор недостаточно внимания уделяет описанию исследованных образцов аморфных и нанокристаллических лент, проводов. Читателю трудно найти данные о том, где изготовлены образцы, почему выбраны именно эти составы, как аттестовывались образцы, толщину образцов, их магнитные параметры. По-видимому, следовало бы в первой главе привести таблицу со свойствами всех исследованных образцов.
2. Исследованные образцы достаточно толстые и вполне вероятно неоднородны по толщине. Наличие поверхностной анизотропии также может существенно влиять на магнитоимпеданс. Эти обстоятельства следовало бы упомянуть при обсуждении.
3. Хотелось бы в диссертации в обсуждении видеть сравнение с данными для материалов с отрицательной магнитострикцией.
4. Хотя работа хорошо оформлена и написана достаточно ясно, в ней встречаются опiski (например, на стр. 71 сказано, что длина образца составляет 30 мкм?), а ссылки на свои работы, на которых основаны соответствующие параграфы, не выделены.

Указанные недостатки не носят принципиального характера и не затрагивают основного содержания диссертационной работы.

Полученные в работе результаты имеют большое практическое значение как для материаловедения, так и для создания нового поколения сверхчувствительных магнитоимпедансных датчиков. Поэтому результаты работы можно рекомендовать для ознакомления и использования в организациях, занимающихся как разработкой новых магнитных материалов, так и ведущих исследования в области физики магнитных явлений, как например, МГУ им. М.В.Ломоносова (г. Москва), Санкт-Петербургский, Уральский, Новосибирский и Тверской университеты, Воронежский технический

университет, МИРЭА, Российский научный центр «Курчатовский институт» (г. Москва), Институт физики твердого тела РАН РФ (п. Черноголовка Московская обл.), ФТИ РАН РФ им. Иоффе (г. С-Петербург), РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров, Нижегородская обл), Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г. Красноярск), Институт Теоретической и Прикладной Электродинамики РАН (Москва) и др.

Результаты диссертации многократно докладывались на российских и международных конференциях и хорошо известны специалистам.

Автореферат и публикации автора в отечественных и зарубежных научных изданиях точно и полностью отражают полученные в диссертационной работе результаты.

Резюмируя сказанное, можно констатировать, что диссертация Семирова А.В. посвящена актуальной теме, содержит ряд новых, важных в научном и практическом плане результатов, которые вносят значительный вклад в понимание механизмов магнитоимпеданса магнитомягких аморфных и нанокристаллических лент и проводов. Диссертационная работа Семирова А.В. соответствует п.9. Положения о присуждении ученых степеней и является завершенным научным исследованием, которое может быть квалифицировано как новое крупное достижение в области физики магнитных явлений.

В целом диссертационная работа «Высокочастотный импеданс и магнитные свойства аморфных и нанокристаллических ферромагнитных проводников при термическом, деформационном и магнитополемом воздействиях» отвечает всем требованиям ВАК РФ предъявляемым к докторской диссертации, а ее автор, Семиров Александр Владимирович, несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11. – физика магнитных явлений.

Доктор физико-математических наук,
профессор

Грановский Александр Борисович

Московский Государственный Университет
им. М.В. Ломоносова, Физический Факультет
Ленинские Горы, дом 1, стр.2
119991 Москва
Тел. 8 495 939 47 87
Факс 8 495 939 47 87
E-mail: granov@magn.ru

Подпись профессора кафедры магнетизма физического факультета
им. М.В. Ломоносова д.ф.-м.н., проф. Грановского А.Б. удо

