

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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».

Одной из актуальных задач современного материаловедения и физики магнитных явлений является разработка, изучение и практическое применение новых материалов с необычными физическими свойствами. К такому классу материалов относятся твердые тела, имеющие разнообразные нарушения дальнего порядка и обладающие уникальным сочетанием механических, электрических и магнитных свойств. Интерес к такого рода системам остается на высоком уровне много лет, однако ясного понимания зависимости физических свойств от атомной и доменной структуры у таких твердых тел пока нет. Особую актуальность проведенным исследованиям придает то, что они развивают представления об особенностях магнитной анизотропии, возникающей в аморфных и нанокристаллических магнитомягких материалах, процессах их перемагничивания, взаимосвязи изменений высокочастотных электрических свойств и магнитной проницаемости, процессах структурной релаксации аморфных сплавов. Помимо этого, исследуемые автором работы объекты являются перспективными с точки зрения их практического применения в качестве чувствительных элементов различного рода датчиков. Поэтому тема диссертации, посвященная исследованию влияния на магнитные свойства и импеданс аморфных и нанокристаллических ферромагнитных проводников воздействия магнитных полей и механических деформаций в широком температурном диапазоне, а также прикладному использованию полученных данных, представляется весьма актуальной.

Автор работы не задается целью поиска новых экзотических материалов с рекордными значениями магнитоимпеданса, а акцентирует внимание на выявленных особенностях магнитополевых, частотных, температурных и деформационных зависимостей импеданса и на общности подходов к их объяснению.

К основным результатам работы, представляющим несомненную научную ценность, следует отнести следующие:

1. На основе анализа данных магнитоимпедансной спектроскопии и магнитных гистерезисных свойств магнитомягкого цилиндрического провода с низким положительным значением константы магнитострикции автором впервые показана возможность реализации магнитной доменной структуры, отличающейся от известных вариантов наличием трех коаксиальных

цилиндрических областей с различным типом магнитной анизотропии: в центре провода циркулярный керн и следующие за ним аксиальный и тонкий геликоидальный слой. Дана оценка размеров этих областей.

2. На основании частотных особенностей изменения действительной и мнимой компонент импеданса под влиянием растягивающих и магнитно-полевых воздействий на провод аморфного сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ , а также его отжига электрическим током, автор сделал вывод 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 или геликоидальным типом магнитной анизотропии приводит к появлению узкого частотного интервала, в котором влияние деформации растяжения на импеданс минимально.

3. Исследовано влияние различных видов термообработок аморфных магнитомягких проводников на их высокочастотные электрические свойства. Установлено, что воздействие внешнего магнитного поля в ходе кристаллизации ряда аморфных магнитомягких сплавов и перехода в наноструктурное состояние, а также их длительная изотермическая обработка при температуре ниже температуры Кюри и начала кристаллизации, слабо влияют на структуру и квазистатические магнитные свойства, однако значительно изменяет высокочастотные электрические свойства, что позволяет успешно использовать магнитоимпедансную спектроскопию для детального изучения процесса структурной релаксации включая ее начальные стадии.

4. Изучено влияние температуры на магнитоимпеданс, стрессимпеданс, магнитные свойства аморфных лент и проводов. 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. 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.

5. Изучено влияние термического, деформационного и магнитополевого воздействий на магнитомягкие композиты в виде трехслойного узкого сэндвича пермалой  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$  – аморфная лента  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  – пермалой  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$  и аморфной проводящей магнитомягкой ленты  $\text{Co}_{75}\text{Fe}_5\text{Si}_4\text{B}_{16}$ , полностью покрытой полимерным покрытием различных составов. Показано, что нанесение на магнитомягкую ленту магнитного проводящего покрытия с отличающимися магнитными и электрическими характеристиками позволяет целенаправленно изменять магнитополевые диапазоны с максимальной

чувствительностью магнитоимпеданса к магнитному полю, а так же его температурную чувствительность в области ферромагнитных фазовых переходов, а используемые полимерные покрытия выполняют не только защитную функцию магнитомягких проводников, но обладают еще и значительным потенциалом активного воздействия на их функциональные свойства.

Практическая значимость результатов и выводов, полученных в работе, заключается в возможности их применения для анализа экспериментальных результатов, закономерностей и теорий, полученных на основе исследований других исследуемых систем. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований в области высокочастотного импеданса и магнитных свойств как однородных, так и гетерогенных систем.

Следует отметить большую работу автора по разработке и применению инструментальных комплексов и методологических приемов для применения импедансной спектроскопии в широчайшем интервале температур, что обеспечивает достоверность результатов, а также убедительность заключений и выводов. Эксперименты проводились автором многократно, поэтому сформулированные выводы являются следствием анализа большого числа полученных аналогичных результатов. Некоторые результаты и выводы согласуются с уже опубликованными в научной литературе результатами, полученными для других аналогичных сплавов. Результаты исследований и положения, сформулированные в диссертации, получены с применением современных методов исследования (импедансной спектроскопии, просвечивающей микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа и др.). Использование современного измерительного оборудования, программных средств численного моделирования и обработки баз данных экспериментов, его тщательное планирование – все это в совокупности подтверждает высокую степень достоверности представленных в диссертационной работе и выносимых на защиту результатов. Дополнительную достоверность полученным результатам придает их непротиворечивость и возможность согласования с системой наиболее общих закономерностей и известных теорий физики магнитных явлений. В целом это обеспечивает достоверность полученных результатов и выводов.

Вместе с тем в работе обнаружены некоторые упущения и недостатки, по которым можно сделать следующие замечания:

1. В работе автор установил аналитические зависимости изменения магнитной индукции от температуры, электрического сопротивления и импеданса от температуры, но не говорит об аналитической зависимости магнитного импеданса от частоты электрического тока, что важно для установления доминирующего механизма. Так, если определяющий вклад в магнитный импеданс вносит мнимая компонента, то в случае потерь от вихревых токов на низких частотах следует ожидать  $\Delta Z/Z \sim f$ , а на высоких частотах, вследствие скин-эффекта, -  $\Delta Z/Z \sim f^{1/2}$ .

2. Наряду с приведенным полным анализом импеданса для большинства объектов исследования, в третьей главе автором не аргументировано отсутствие экспериментальных зависимостей действительной и мнимой компонент для аморфных лент сплава  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1,5}\text{Si}_{16,5}\text{B}_{11}$ .

3. Для образцов, отожженных электрическим током, присутствует только текстовое описание результатов рентгеноструктурного анализа методом Дебая-Шерера, неподкрепленное картинками дифрактограмм исходных и обработанных проводов (пункт 3.2.2).

4. В тексте диссертации имеются отступления от общепринятых правил оформления (в списке литературы диссертации в некоторых работах отсутствует названия статей (№ 80, 166, 170) и отдельные опечатки (например, с. 7, 24, 103, 146). В работе встречаются разносистемные единицы измерения напряженности магнитного поля, температуры.

Однако вышеперечисленные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертации и не снижают высокого научного уровня оппонируемой работы.

По направлению исследований в рецензируемых научных изданиях Семировым А.В. опубликовано 29 статей, материалы исследований были представлены на более чем 30 Международных и всероссийских научных мероприятиях. Под руководством Семирова А.В. защищены 3 диссертации на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Содержание автореферата и публикаций в полной мере отражают итоги исследований и выводы, представленные в диссертации.

Автору удалось не только достигнуть обозначенной им цели работы – выявить новые механизмы влияния на высокочастотный электрический импеданс и магнитные свойства магнитомягких проводников термического, деформационного, магнитополевого и их комплексного воздействий, но и в итоге впервые обнаружить целый ряд явлений, обладающих высокой практической ценностью. В связи с этим результаты работы целесообразно рекомендовать для учета и использования научными организациями, занимающимися как фундаментальными, так и прикладными вопросами физики магнитных явлений и материаловедения: МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва); Воронежском государственном техническом университете (г. Воронеж); Уральском федеральном университете имени первого президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург); Институте физики металлов Уральского отделения РАН (г. Екатеринбург); Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН (Москва); Институте физики им Л.В. Киренского СО РАН (г. Красноярск); Институте физики твердого тела РАН (г. Москва); Крымском федеральном университете имени В.И. Вернадского (г. Симферополь); Тверском государственном университете (г.Тверь), Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург) и др.

Обобщая вышеизложенное, считаю, что работа «Высокочастотный импеданс и магнитные свойства аморфных и нанокристаллических ферромагнитных проводников при термическом, деформационном и магнитополемом воздействиях» полностью отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук (п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней»), а ее автор Семиров Александр Владимирович - заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
физики твердого тела ВГТУ

Юрий Егорович Калинин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Воронежский государственный технический университет" 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, тел.: +7(473)246-66-47, e-mail: Kalinin48@mail.ru

Подпись заведующего кафедрой физики твердого тела ВГТУ  
д.ф.-м.н., проф. Калинина Ю.Е. удостоверяю



Личную подпись
<i>Ю. Е. Калинин</i>
<b>УДОСТОВЕРЯЮ</b>
г. _____ 20__ г.
Исполнитель: <i>Е. А. Лещенко</i>

*Ю. Е. Калинин*

25.08.2015 г.