

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
**ЧЛЕНОВОЙ АННЫ АЛЕКСАНДРОВНЫ «Магнитные свойства и
гигантский магнитный импеданс многослойных пленочных элементов
на основе пермаллоя»**, представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика
магнитных явлений.

Диссертационная работа А.А. Членовой посвящена экспериментальному исследованию свойств многослойных пленочных элементов на основе пермаллоя. Многослойные пленочные структуры активно используются в качестве сред для сенсорных устройств в робототехнике, навигационных устройствах, системах управления двигателей, биомедицинских приложениях. Современные вызовы, такие как совершенствование автоматических систем управления, переход к персонализированной медицине требует разработки магнитных сенсорных элементов нового поколения. Использование многослойных пленочных элементов на основе пермаллоя в новейших системах детектирования диктует необходимость фундаментального понимания взаимосвязи между особенностями структуры, статическими магнитными свойствами, особенностями магнитной анизотропии и магнитоимпедансным (МИ) эффектом. Существенный прогресс в этой области был достигнут в диссертационном исследовании А.А. Членовой, поэтому актуальность и значимость диссертационной работы не вызывает сомнения. Диссертация имеет экспериментальную направленность; некоторые обнаруженные в экспериментах эффекты сопоставляются с теоретическими исследованиями и известными из научной литературы данными.

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного материала, заключения и списка цитируемой литературы из 138 наименований. Основные научные результаты по теме диссертации представлены в научной печати в 19 публикациях, из них 15 опубликованы в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК и Аттестационным советом УрФУ и индексируются ведущими мировыми реферативными базами Scopus и/или WoS. Анализ опубликованных автором работ по теме диссертации позволяет

сделать вывод о том, что все основные результаты работы достаточно полно представлены в научной литературе.

Первая глава диссертации имеет обзорный характер. В ней рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования, ставшие основой для создания малоразмерных магнитных материалов с высоким МИ эффектом, показаны особенности синтеза тонких магнитных пленок, влияние внешних факторов на структуру и магнитные свойства этих объектов. Отдельно обсуждаются возможности использования тонких магнитных пленок в качестве чувствительного элемента детекторов слабых магнитных полей в медико-биологических приложениях. После проведенного обзора научной литературы формулируются цели и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе описаны экспериментальные методики изготовления тонких магнитных пленок, многослойных магнитных структур, феррожидкостей и феррогелей. Основные особенности разных серий исследуемых образцов, полученных для каждого направления исследования, представлены в таблицах. Приведены характеристики установок, которые использовались для измерений и исследования структурных и магнитных свойств образцов.

В третьей главе исследуются структурные и магнитные свойства многослойных пленочных элементов на основе пермаллоя при осаждении на жесткие и гибкие основы с различной толщиной и количеством магнитных слоев. При анализе экспериментальных результатов для многослойных пленок типа магнитного «сэндвича» с суммарной толщиной 1,5 – 1,6 мкм было установлено, что существует немонотонная зависимость максимального эффекта МИ отношения от числа магнитных слоев n для структуры типа $[\text{FeNi}(A)/\text{Cu}(3)]_n/\text{FeNi}(A)/\text{Cu}(500)/[\text{FeNi}(A)/\text{Cu}(3)]_n/\text{FeNi}(A)$, где A и n принимали значения из достаточно широкого диапазона. При этом максимальная величина МИ отношения составила 209% для образца с $A=100$ нм и $n=4$. Изучение МИ свойств многослойных пленочных элементов в конфигурации «сэндвича», ассиметричных относительно центрального толстого слоя медного проводника, обнаружило монотонно убывающую зависимость максимума МИ отношения полного импеданса от количества слоев при их уменьшении от симметричной структуры к наиболее ассиметричной. Близость характеристик гигантского магнитного импеданса (ГМИ) для симметричной структуры и ассиметричных образцов, количество

магнитных слоев в которых над и под проводником отличаются на единицу, позволила рекомендовать последние для исследований ГМИ-элементов с модифицированным верхним слоем, что может быть востребовано в биодетектировании с использованием магнитных меток.

Проведено систематическое исследование структурных свойств пленок пермаллоя различной толщины и многослойных пленочных структур, напыленных на стеклянные и полимерные подложки из циклоолефина. Изучено изменение магнитной структуры пленки пермаллоя для различных концентраций железа Fe_xNi_{100-x} , где $x = 20, 17, 15, 13, 12, 11$ %. Сравнение концентрационных зависимостей для статических и динамических значений намагниченности позволило выбрать состав $Fe_{15}Ni_{85}$ как перспективный для разработки специализированных датчиков давления.

В четвертой главе исследованы особенности кинетики процесса конденсации углерода на поверхности пленок Fe и FeNi при выдержке в ароматических сольвентах при комнатной температуре. Структура образующегося углеродного покрытия исследовалась с использованием различных техник: атомно-силовая и сканирующая микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, термогравиметрия. Проведена оценка времени, необходимого для создания углеродного покрытия пленок. Изучена роль кислорода в процессе формирования углеродного покрытия пленок.

Установлена возможность изменения ГМИ параметров многослойных элементов после протекания процесса низкотемпературной конденсации углерода на их поверхности.

В пятой главе исследованы особенности импедансного эффекта многослойных элементов на стеклянных и полимерных подложках при приложении внешнего давления. Показано, что наибольшая чувствительность ГМИ отношения полного импеданса к внешнему давлению достигается для структур на стеклянных подложках, однако полимерные системы являются наиболее востребованными в биомедицинских приложениях и дальнейшее исследование свойств и поведения этих систем в различных условиях представляет собой важную и перспективную задачу.

Разработан прототип МИ биосенсора с прямоугольным чувствительным элементом на основе пермаллоя. Измерен и проанализирован ГМИ отклик в присутствии полиакриламидных гидрогелей и феррогелей, имитирующих

биологическую ткань. Полученные результаты качественно соответствуют теоретическими предсказаниям.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, а также рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

В целом, диссертация оставляет приятное впечатление. В ней подробно описана техническая сторона получения образцов, используемые экспериментальные методы и измерительное оборудование. Экспериментально обнаруженные эффекты анализируются для выявления закономерностей между микроструктурой и макросвойствами исследуемых систем. В ряде случаев полученные результаты сопоставляются с теоретическими предсказаниями. Результаты диссертации являются новыми и достоверными. Автореферат полно передает содержание диссертационной работы.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания.

1. На с. 57 формула (2.7) записана неоднозначно с математической точки зрения. Для ее правильного использования требуется расстановка скобок или запись дроби в «два этажа».

2. На с. 85 на Рис. 3.7 (б) обращает на себя внимание поведение образца S7. Характерное поведение $\Delta Z/Z$ в зависимости от частоты для образцов S1-S6 можно описать как последовательное возрастание, затем достижение максимума, затем убыванием (для S5, по-видимому, максимум еще не достигнут в представленной области частот). Однако частотная зависимость образца S7 (светло-серые круги) имеет отличное от других образцов характерное поведение, а именно заметен перегиб в области частот ~ 170 МГц. Есть ли физическое обоснование такого нестандартного поведения образца S7?

3. На с. 92 на Рис. 3.11 (б) введены обозначения I и II, значение которых не приведено ни в тексте, ни в подписи к рисунку. Могу предположить, что эти обозначения есть величина максимального МИ отношения полного импеданса в нисходящих и восходящих полях соответственно. Если это так, то чем можно объяснить различия в значениях кривых I и II для образцов T3, T4 и отсутствие этого различия для всех других образцов?

4. На с. 145 при описании магнитных наночастиц (МНЧ), входящих в состав феррогеля, автор пишет «согласно данным просвечивающей электронной микроскопии (Рисунок 5.3(а)), частицы имели сферическую форму и узкое распределение по размерам (средний размер составлял около 16 нм)», однако на с. 146 при описании поведения феррогеля в магнитном поле автор констатирует «... магнитного насыщения не наблюдалось и в области 18 кЭ (Рисунок 5.4 (а)), что указывает на то, что большинство МНЧ находились в суперпарамагнитном состоянии, но и на вероятность присутствия небольшой фракции чуть более крупных наночастиц». В этот момент у читателя начинает возникать вопрос об узости распределения МНЧ по размерам в ФГ. В завершении, на с. 151, встречается такая фраза «Коэрцитивная сила для всех типов ФГ была мала (несколько Эрстед). Как и ранее ненулевое значение H_c можно объяснить наличием небольшой доли крупных частиц при широком распределении частиц по размерам». Хотелось бы более четко понимать характеристики МНЧ, входящих в состав феррогеля. Эта информация заслуживает внимания, поскольку исследования последних лет показали, что магнитная чувствительность феррогелей зависит не только от концентрации МНЧ, но и от фракционного состава МНЧ и распределения МНЧ внутри феррогеля. Все это, безусловно, должно сказываться на проводимых в диссертации измерениях.

5. В работе есть некоторое количество опечаток и неточностей, которые усложняют понимание материала. Например, на с. 83 идет отсылка к Таблице 2.2, хотя образцы, описываемые в этот момент, представлены в Таблице 2.1. Другой пример, на с. 147 идет отсылка на красную кривую Рис. 5.4, в котором представлены только черные и синие линии и др.

Несмотря на сделанные замечания, необходимо заметить, что они не снижают научной ценности результатов, а относятся, скорее, к стилистике изложения материала или носят характер рекомендаций.

Подводя итог, следует еще раз выразить мнение о том, что:

- диссертационная работа А.А. Членовой содержит новые научные материалы, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, имеющее существенное значение в физике магнитных явлений;

- диссертация удовлетворяет требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней УрФУ", и, несомненно, соответствует специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений;
- автор достоин присуждения ученой степени **кандидата физико-математических наук** по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Я, Елфимова Екатерина Александровна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,

Заведующий кафедрой теоретической и математической физики

Института естественных наук и математики

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

доктор физ.-мат. наук, доцент,

620002 Екатеринбург, ул. Мира 19,

<http://urfu.ru>, тел. (343) 389 94 77

E-mail: Ekaterina.Elfimova@urfu.ru

Елфимова Екатерина Александровна

03 декабря 2020 г.

Подпись *Елфимова Е.А.*
Заворяю: введ. документовед ОДОУ
Якушова С.Ю.

