

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
Макарова Андрея Владимировича
«Исследование структурных, магнитных и магнитооптических
свойств трёхслойных тонкоплёночных систем
Fe/полидифениленфталид/Fe, Co/Gd/Co и Co/Cu/Co»
по специальности 1.3.12 – Физика магнитных явлений**

Плёночные структуры, состоящие из чередующихся слоёв магнитных и немагнитных материалов, привлекают большое внимание в связи с их уникальными физическими свойствами, которые представляют несомненный интерес с фундаментальной точки зрения. Исследования многослойных плёночных структур способствуют пониманию особенностей различных типов взаимодействия между магнитными слоями и электронных спектров металлов при малых размерах слоёв. Кроме того, многослойные плёночные структуры интересны и для практических применений. В частности, при исследовании плёночных структур было обнаружен эффект гигантского магнитосопротивления, который может быть использован для разработки устройств магнитной памяти и сенсоров магнитного поля.

Несмотря на многочисленные исследования магнитных свойств многослойных плёночных структур, ряд вопросов остаётся недостаточно изученным. В частности, проблема влияния температуры на магнитные свойства трёхслойных структур, состоящих из слоёв кобальта, разделённых неферромагнитной прослойкой, до настоящего времени не была исследована. Кроме того, в последние годы возрос интерес к тонким магнитным плёнкам с прослойкой из проводящего полимера, в частности, из полидифениленфталита (ПДФ). Хотя электрофизические свойства ПДФ были исследованы в многочисленных работах, влияние слоёв полимера на магнитные свойства плёночных структур практически не изучалось.

В связи с вышеизложенным тема диссертационной работы Макарова А.В., посвящённой экспериментальному исследованию магнитных и магнитооптических свойств трёхслойных плёночных структур Fe/ПДФ/Fe, Co/Gd/Co и Co/Cu/Co, несомненно, является весьма актуальной.

Диссертация Макарова А.В. написана хорошим литературным языком, текст изложен на высоком научном уровне. Работа хорошо структурирована, материал представлен последовательно и логично. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, основных результатов и списка литературы, включающего 161 ссылку. Общий объём диссертационной работы составляет 122 страницы, включая 54 рисунка.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая значимость, обоснована достоверность полученных результатов, а также содержатся сведения об апробации результатов и личном вкладе автора.

В первой главе диссертационной работы представлен обзор литературных данных, посвящённых исследованиям свойств различных многослойных магнитных плёночных структур. Приведён подробный анализ работ по исследованиям электрофизических свойств плёночных структур с ПДФ. Большое внимание уделено теоретическим и экспериментальным исследованиям магнитных свойств и межслойного обменного взаимодействия в плёночных структурах на основе редкоземельных и переходных металлов. Также представлены результаты анализа литературных данных по свойствам многослойных магнитных плёнок с медными прослойками. На основе проведённого литературного анализа сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлено описание изготовления исследуемых образцов Fe/ПДФ/Fe, Co/Gd/Co и Co/Cu/Co. Приведено подробное описание

использованных в диссертационной работе экспериментальных методик, а также проанализированы погрешности эксперимента.

Третья глава посвящена результатам исследований морфологии, структурных, магнитных и магнитооптических свойств плёночных структур.

В разделе 3.1 приведены результаты исследований для образцов Fe/ПДФ/Fe. Установлено, что среднее значение шероховатости поверхности плёночных структур составляет 5–8 нм и уменьшается с ростом толщины слоя железа. Обнаружено также, что при увеличении толщины слоя железа происходит переход от полосовой доменной структуры к хаотической структуре. Показано, что петли гистерезиса, полученные при приложении магнитного поля вдоль длинной стороны образцов, имеют двухступенчатую форму. При этом размер ступеньки увеличивается с уменьшением толщины слоя ПДФ. Причиной возникновения двухступенчатой петли гистерезиса является магнитостатическое взаимодействие между слоями железа.

В разделе 3.2 представлены результаты, полученные при исследовании структурных, магнитных и магнитооптических свойств трёхслойных плёнок Co/Gd/Co. В результате температурных измерений обнаружено, что для исследуемых образцов коэрцитивная сила существенно уменьшается при увеличении температуры от 100 до 300 К. Полученная температурная зависимость коэрцитивной силы объясняется сильным уменьшением магнитного момента и анизотропии при увеличении температуры. Установлено, что для образцов с толщиной гадолия 3 и 9 нм возникает немонотонная температурная зависимость магнитного момента плёночной структуры, что связано с переориентацией магнитных моментов слоёв кобальта и гадолия вследствие обменного взаимодействия на границе слоёв. Установлено также, что значения экваториального эффекта Керра (ЭЭК) снижаются с увеличением толщины слоя гадолия, что объясняется уменьшением вклада нижнего слоя кобальта в магнитооптический сигнал.

В разделе 3.3 представлены результаты исследования влияния температуры на магнитные свойства и петли гистерезиса структур Co/Cu/Co. Обнаружено, что снижение температуры от 350 до 100 К приводит к существенным изменениям формы петель гистерезиса. Кроме того, снижение температуры приводит к увеличению поля насыщения и коэрцитивной силы. Эту особенность можно объяснить усилением косвенного обменного взаимодействия между слоями кобальта при уменьшении температуры.

В заключительных разделах представлены основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Все полученные автором результаты и положения, выносимые на защиту, обладают научной новизной. Из новых результатов диссертационной работы особый интерес представляют следующие.

1. Установлено, что для плёночных структур Fe/ПДФ/Fe петли гистерезиса имеют двухступенчатую форму, а размер ступеньки зависит от толщины слоя ПДФ. Показано, что причиной возникновения двухступенчатой петли гистерезиса является магнитостатическое взаимодействие между слоями кобальта, а обменное взаимодействие между слоями мало. Обнаружено также, что значения поля насыщения и коэрцитивной силы уменьшаются с увеличением толщины слоя ПДФ из-за уменьшения магнитостатического взаимодействия.

2. Впервые исследовано влияние температуры на магнитные характеристики плёночных образцов Co/Gd/Co. Установлено, что гадолиний оказывает существенное влияние на магнитные свойства плёночной структуры, которое проявляется в зависимости магнитного момента структуры Co/Gd/Co от температуры и толщины прослойки. Показано, что коэрцитивная сила всех исследованных трёхслойных образцов уменьшается с ростом температуры.

3. Установлено, что магнитооптические спектры структур Co/Gd/Co и плёнок кобальта подобны. Это позволяет сделать вывод, что слой гадолиния практически не влияет на вид спектральных зависимостей трёхслойных плёнок Co/Gd/Co. При этом интенсивность экваториального эффекта Керра снижается с увеличением толщины слоя гадолиния, что связано с уменьшением вклада нижнего слоя кобальта в магнитооптический сигнал.

4. Впервые изучено влияние температуры на магнитные характеристики трёхслойных плёночных структур Co/Cu/Co. Обнаружено, что коэрцитивная сила и поле насыщения образцов возрастают при уменьшении температуры от 350 до 100 К. Установлено, что причиной наблюдаемых изменений является усиление косвенного обменного взаимодействия между слоями кобальта при снижении температуры.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что полученные результаты исследований свойств трёхслойных структур могут быть использованы для создания новых магнитных материалов в области микро- и нанoeлектроники. Плёночные структуры на основе редкоземельных металлов могут найти применение в устройствах для магнитной записи.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, основывается на использовании современного научного оборудования и применении проверенных экспериментальных методик, которые дополняли друг друга. Полученные экспериментальные данные обрабатывались при помощи современного программного обеспечения. Кроме того, проведенные измерения показали хорошую воспроизводимость результатов.

Основные результаты работы полностью отражены в публикациях в авторитетных российских и международных журналах. Полученные результаты были представлены на восьми российских и международных конференциях, и должная апробация результатов диссертации не вызывает сомнений. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

К диссертационной работе Макарова А.В. имеются небольшие замечания.

1. Исследования с использованием магнитного силового микроскопа показали, что в структурах Fe/ПДФ/Fe при увеличении толщины слоя железа происходит переход от полосовой доменной структуры к хаотической структуре. Однако в работе не приведено значение толщины слоя железа, при которой происходит данный переход.
2. При исследовании магнитооптических спектров ЭЭК структур Fe/ПДФ/Fe было установлено, что при толщине слоёв железа 30 нм спектры подобны зависимостям ЭЭК плёнок железа. В то же время, для структур с толщиной слоёв железа 15 нм ЭЭК имеет постоянное значение в достаточно широком интервале энергии световых квантов (Рис. 32). Причина возникновения такого «плато» в магнитооптических спектрах ЭЭК для данных образцов не обсуждается.
3. В работе не приведены оценки значения энергии антиферромагнитного обменного взаимодействия между слоями кобальта и гадолиния в структурах Co/Gd/Co.
4. При проведении низкотемпературных измерений из-за особенностей криостата использовались образцы, длина и ширина которых равны 5 мм. Однако из текста диссертации неясно, были ли эти образцы специально изготовлены, или они вырезались из плёночных структур размером 10 × 10 мм?

Сделанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают основного содержания работы и не изменяют общей положительной оценки диссертации Макарова А.В.

Диссертационная работа отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту

