

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию Кулеш Никиты Александровича «Магнитная анизотропия и магнитоупругие эффекты аморфных пленок с редкоземельными компонентами и пленочных структурна их основе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

Актуальность темы. Создание новых функциональных магнитных материалов в виде планарных структур, включающих тонкие слои ферромагнитных металлов различной природы, и определение влияния композиции и морфологии составляющих слоёв, упругих напряжений, термообработок на структуру и магнитные свойства таких структур являются одним из важных научных направлений физики магнитных явлений, физики конденсированного состояния и материаловедения. Сплавы редкоземельных и переходных 3d металлов (РЗМ-ПМ) занимают достойное место в общем объеме физических исследований и технических разработок в области магнитных материалов. Особое место занимают аморфные пленки сплавов РЗМ-ПМ и планарные структуры магнитотвердый – магнитомягкий металл. Установление характера обмена внутри и между слоями в таких структурах, безусловно, также входит в ряд наиболее актуальных задач физики магнитных явлений. Вместе с тем, интерес к таким структурам обусловлен и огромным их прикладным потенциалом. Анализ мировой литературы показывает, что в настоящее время большое внимание уделяется проблемам, связанным с формированием интерфейса между слоями и влиянием интерфейса на физические и функциональные свойства структуры. С этой точки зрения проведенное в диссертации исследование влияния термообработок на формирование межслоевого интерфейса и однонаправленную анизотропию представляет особый интерес. В отличие от многочисленных работ по этой проблематике, выполненных ранее, в которых слои сплавов РЗМ-ПМ характеризовались анизотропией с легкой осью, перпендикулярной плоскости пленки, в рецензируемой диссертации рассматриваются условия формирования плоскостной анизотропии в таких пленках и выявлен целый ряд особенностей магнитных свойств, как однослойных пленок РЗМ-ПМ, так и включающих их слоистых структур. С этой точки зрения работу Н.А. Кулеш можно назвать пионерской работой в этом направлении.

Все исследования, представленные в диссертации, проводились в рамках государственных программ и при поддержке грантов, что также свидетельствует об актуальности темы диссертации.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования сомнений не вызывает.

Цель работы. Цель данной работы состоит в установлении особенностей магнитной структуры, условий образования и характеристик магнитной анизотропии, наведенной в аморфных плёнках с редкоземельными компонентами в результате наложения при их синтезе внешнего магнитного поля, и влияния этих свойств на закономерности перемагничивания плёночных структур, содержащих аморфные слои типа TbCo и слои 3d-металлов.

Научная новизна. Научная новизна работы Кулеш Никиты Александровича заключается в разработке методик прецизионного анализа химического состава пленок и технологии создания пленок РЗМ-ПМ с наведенной плоскостной анизотропией; в сочетании экспериментальных, методических и аналитических методик, позволяющих успешно проводить изучение фундаментальных закономерностей процессов формирования пленок и пленочных структур с заданными магнитными свойствами. При нижеследующем подробном анализе работы будут перечислены новые результаты.

Научная и практическая ценность. Проведённые в рамках диссертации исследования существенно расширили технические и технологические возможности создания функциональных магнитных материалов, заложили основы для разработки элементов с однонаправленной анизотропией на основе структур РЗМ-ПМ с наведенной плоскостной анизотропией в слоях РЗМ. Перспективны предложения по созданию новых функциональных магнитных материалов, свойствами которых можно целенаправленно управлять путём изменения магнитных свойств интерфейсов под влиянием термообработок.

Апробация результатов. Приоритет автора в данной области науки подтверждается публикациями в ведущих Российских и международных журналах. Всего по материалам диссертации опубликовано 11 статей в рецензируемых международных журналах и журналах, определенных перечнем ВАК Министерства образования и науки РФ. Результаты работы были представлены на 19 научных форумах различного уровня, в том числе, на 9 Международных конференциях.

Степень достоверности результатов и выводов диссертации обеспечивается использованием как оригинальных, так и хорошо апробированных экспериментальных методик, теоретических моделей и современных подходов, развитых в физике магнитных явлений, а также воспроизводимостью результатов, полученных на различных образцах, ясным физическим смыслом установленных закономерностей, тщательным сравнительным анализом полученных результатов исследования с большим объёмом литературных данных.

Диссертационная работа Н.А. Кулеш включает введение, обзор литературы, описание методик эксперимента, две оригинальных главы и список использованной литературы. Ее чтение показывает, что автор в достаточной мере владеет современным языком, научным материалом и стилем его представления.

Анализ содержания оригинальных глав позволяет выделить ряд новых научных результатов, полученных диссертантом. Здесь следует отметить, что и вторая глава, посвященная методическим аспектам работы, содержит существенный оригинальный материал, о чем будет сказано ниже.

Рассмотрим результаты в том порядке, в котором они представлены автором.

Первая глава содержит обзор литературы по проблемам, решаемым в диссертации. Достаточно полный обзор хорошо написан. В нем выделены вопросы, не нашедшие решения к началу работ автора, что является убедительным обоснованием цели и задач диссертации.

Во второй главе представлены технология изготовления образцов и методы их исследования. Помимо краткого описания известных использованных структурных и магнитных методик, большое внимание уделено развитию метода неразрушающего контроля химического состава пленок, включая исследование распределения компонентов по глубине, на основе прецизионного рентгено-флуоресцентного анализа. Конденсаты сплавов РЗМ-ПМ являются весьма непростыми объектами исследований, в том числе и из-за трудностей установления точного химического состава и связи между распределением компонент по глубине пленки и ее магнитными свойствами. Автор провел скрупулезные исследования по определению состава однослойных пленок сплавов кобальта с лантаном, гадолинием и тербием с помощью рентгено-флуоресцентного анализа в сопоставлении с результатами разрушающего метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индукционно-связанной плазмой и показал достаточно хорошую точность и воспроизводимость неразрушающего метода. Были определены оптимальные условия измерений, проводимых на пленочных образцах неразрушающим методом. Следующим шагом было изучение химического состава пленок сплавов с различным соотношением компонент и, что наиболее сложно, двухслойных пленок, включающих слои РЗМ-ПМ и ферромагнитные слои Co и FeNi . В последнем случае автор столкнулся с существенными трудностями, обусловленными перекрыванием основных линий флуоресценции железа и тербия, которые ему удалось остроумно разрешить. Таким образом, вторая глава содержит набор оригинальных результатов, важных для интерпретации данных магнитных измерений, представленных в последующих главах. Кроме

того, предложенные автором методические приемы могут быть использованы другими исследователями при изучении таких сложных структур, которыми являются многокомпонентные пленки.

Третья глава посвящена исследованию магнитных и магнитоупругих свойств однослойных пленок соединений Co с La и редкоземельными металлами Gd и Tb. Такой выбор материалов представляется весьма разумным. Сравнительное исследование магнитных свойств цепочки образцов, включающих La–немагнитный элемент, Gd- магнитный элемент с нулевым орбитальным моментом и Tb–анизотропный магнитный элемент, позволяет разделить вклады различной природы в магнитные и магнитоупругие свойства пленок CoTb - основного исследуемого соединения. Знакомство с материалом этой главы поражает объемом и тщательностью проделанной работы, обеспечившей получение значительных результатов. Отметим некоторые из них.

Автором отработана оригинальная методика определения атомных магнитных моментов РЗ металлов в составе бинарных аморфных сплавов с кобальтом и показано, что в коллинеарной ферромагнитной системе Gd-Co магнитный момент РЗ компоненты не зависит от концентрации компонент и близок к теоретическому значению для свободного атома Gd в то время, как в системе Tb-Co эффективное значение атомного магнитного момента Tb уменьшается по мере увеличения содержания редкоземельного компонента. Последнее согласуется с представлениями о сперимагнитном упорядочении в аморфных плёнках Tb-Co и объяснено возрастанием разориентации локальных магнитных моментов в редкоземельной подрешётке.

На основе изучения кривых намагничивания пленок Tb-Co в высоких полях предложена оригинальная концепция стохастической магнитной структуры со средним размером магнитных элементов ~ 1 мкм, обусловленная конкуренцией упорядочивающего действия обмена и разупорядочивающего действия флуктуирующей локальной анизотропии в системе магнитных моментов редкоземельных ионов. Показано, что процесс высоко полевого намагничивания в этих плёнках имеет двух стадийный характер и описаны процессы, происходящие на обеих стадиях намагничивания.

Важнейшими, на наш взгляд, являются результаты по формированию в пленках Tb-Co наведенной одноосной анизотропии в плоскости. В результате физико-технологического поиска, автору удалось создавать и варьировать по величине и направлению наведённую магнитную анизотропию в плоскости аморфных плёнок Tb-Co. Показано, что критическую роль в формировании

такой анизотропии играет магнитное поле, ориентированное в плоскости подложки в процессе осаждения пленки. Установлено, что возникающая таким образом анизотропия имеет не магнитострикционное происхождение. Наиболее вероятной причиной возникновения наведенной анизотропии автор предлагает одно-ионную анизотропию Tb, предполагая тем самым наличие некоторого атомного упорядочения в аморфных плёнках.

В четвертой главе исследуются межслоевые взаимодействия в слоистых пленочных структурах Co/Tb-Co и Fe₂₀Ni₈₀/Tb-Co. Как отмечалось выше, Кулешу удалось найти свою нишу в этой проблематике и одному из первых (возможно, первому) провести изучение взаимодействия слоев, каждый из которых обладает магнитной плоскостной анизотропией. При этом, результаты, полученные в третьей главе, послужили трамплином для успешного решения задач, поставленных в четвертой главе. Прежде всего, были получены закономерности формирования однонаправленной анизотропии магнитомягкого слоя от концентрации компонент магнитотвердого слоя. Показано, что сильное межслойное взаимодействие, приводящее к такой анизотропии, реализуется в плёнках переходный металл/TbCo при условии, что слой TbCo имеет после компенсационный состав. Найдено, что плёнки Co/TbCo характеризуются значительно более сильной межслойной связью по сравнению с плёнками FeNi/TbCo. Экспериментально показано наличие корреляции между величиной поля обменного смещения и магнитным моментом подрешетки тербия, что позволило автору сделать заключение о преобладающем вкладе взаимодействия тербия с материалом магнито мягкого слоя. Весьма интересны результаты исследования магнитных и немагнитных прослоек на анизотропию и процессы перемагничивания слоистых образцов, в частности, пленок Fe₂₀Ni₈₀/Co/TbCo, в которых в зависимости от температуры и толщины прослойки реализуются петли гистерезиса различной формы, более сильную на интерфейсе Co/TbCo и более слабую на интерфейсе Fe₂₀Ni₈₀/Co. Определенное значение для практических приложений имеет детальное исследование термообработок на гистерезисные свойства слоистых пленок. Многочисленные вариации сценариев температурного воздействия позволили автору установить закономерности необратимого изменения поля однонаправленной анизотропии и коэрцитивной силы двухслойных пленок и пленок с прослойками и показать, что основной причиной изменений магнитных свойств является диффузия материала контактирующих слоёв плёночных структур. Особо следует отметить доказательство того факта, что прослойка Ti толщиной всего ~ 0,7 нм является эффективным барьером для

термоиницированной межслойной диффузии и обеспечивает расширение интервала термической устойчивости свойств пленок с 200 до 300 °С.

Все полученные в диссертации результаты являются новыми, а сделанные на их основе выводы – достоверными.

В целом, диссертация написана четко, грамотно, в соответствии с ГОСТ 7.0.11-2011, иллюстративный материал достаточно нагляден. Однако автору не удалось избежать некоторых недочетов. Отметим наиболее существенные.

- В разделе «Новые научные положения» указана сильная магнитная восприимчивость плёнок RE-Co в высоких полях (пункт 2). Новизна этого пункта вызывает сомнение. Сам автор в обзорной части работы отмечает, что «...на аморфных лентах сплава Co₃₅Tb₆₅, при исследовании процесса высоко полевого намагничивания, магнитное насыщение не наблюдалось до полей порядка 150 кЭ [17]».

- Глава 3 называется «Магнитные и магнитоупругие свойства аморфных плёнок RE-Co», однако, магнитоупругие свойства, практически, не рассматриваются, если не считать параграф 3.3.2, в котором исследовано влияние упругих напряжений на формирование наведенной плоскостной анизотропии и показано на единичных примерах фактическое отсутствие такого влияния.

- В отличие от однокомпонентных пленок Co, для пленок GdCo приведены петли гистерезиса (Глава 3) только для ситуации намагничивания в плоскости образцов, кроме того, совершенно не обсуждается возможная анизотропия в плоскости. Эти обстоятельства позволяют сомневаться в полной достоверности анализа магнитного поведения этих пленок.

- Стр. 31, Рис. 1.16 – несоответствие содержания рисунка подписи и описанию в тексте.

- На стр. 42 читаем: «Осаждение пленочных образцов на установке УРМ3.279 производилось в присутствии магнитного поля напряженностью около 150 Э, направленного параллельно поверхности подложки. Помимо повышения эффективности процесса распыления оно было использовано для индицирования в плёнках одноосной магнитной анизотропии». Как магнитное поле могло влиять на процесс распыления?

- Стр. 43 «...напыление производилось в присутствии на подложке магнитного поля...»

- На стр. 42 указана толщина защитного слоя 10 нм, через несколько абзацев на стр. 43 – 15 нм.

- Стр. 43. При указанной точности измерения толщины пленок (толщина 100 нм, ошибка измерения 1 ангстрем, повторяемость 6 ангстрем), и известной высокой точности использованных приборов для магнитных измерений точность определения намагниченности (emu/cm³) не может быть столь низкой 10%.


- Стр. 52. Заголовок «Пленки типа» почему «типа», а не просто пленки?

Указанные замечания не носят принципиального характера. Они не ставят под сомнение основные положения диссертации, а лишь указывают на ряд аспектов, которые целесообразно принять во внимание в дальнейших исследованиях. В целом данную работу можно квалифицировать как законченное научное исследование, выполненное на актуальную тему. Его результаты широко представлены научной общественности на конференциях и в форме журнальных публикаций. Они могут быть использованы в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН (Москва), Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (С.-Петербург), МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва), Институте полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (Новосибирск), Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН (Красноярск), Физико-техническом институте им. Е.К. Завойского РАН (Казань) и других организациях. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Диссертация «Магнитная анизотропия и магнитоупругие эффекты аморфных пленок с редкоземельными компонентами и пленочных структур на их основе», несомненно, удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Кулеш Никита Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук,
Профессор

 Эдельман И.С.

19.11.2014

Главный научный сотрудник ФГБУН

Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Адрес: Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН,

Академгородок 50 строение 38, г. Красноярск, 660036.

Тел. +7 391 249 4556

E-mail: ise@iph.krasn.ru

Эдельман Ирина Самсоновна

Подпись профессора И.С. Эдельман удостоверяю

Ученый секретарь ФГБУН Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Кандидат физ.-мат. наук

 С.И. Попков

