

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

SIBERIAN
FEDERAL
UNIVERSITY



СИБИРСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

660041, Россия, Красноярск, проспект Свободный, 79
телефон (391) 244-82-13, факс (391) 244-86-25
http://www.sfu-kras.ru e-mail: office@sfu-kras.ru

№ _____
на № _____ от 11.11.2014

УТВЕРЖДАЮ:

ректор Федерального государственного
автономного образовательного учреждения
Высшего профессионального образования
«Сибирский федеральный университет»
академик РАН Е.А. Ваганов



ОТЗЫВ

ведущей организацию на диссертационную работу
Кулеша Никиты Александровича

«Магнитная анизотропия и магнитоупругие эффекты аморфных пленок с редкоземельными компонентами и пленочных структур на их основе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений»

Проблема создания магнитных узлов и систем стоит на одном из первых мест при конструировании устройств функциональной магнитоэлектроники. В целях миниатюризации приборов основные усилия сосредоточены в области спин-зависимого транспорта и разработки новых магнитных материалов, обладающих заданными параметрами. Сочетание комбинированных свойств, например, таких как магнитоупругие и пьезоэлектрические эффекты значительно расширяет возможности в решении инженерных задач, при этом сразу возникают новые проблемы фундаментального характера. Решение этих проблем происходит по пути создания новых искусственных материалов, в частности, синтезе многослойных пленочных структур со слоями, обладающими необходимыми свойствами. В свою очередь это ставит новые физические задачи и порождает развитие новых методов исследования.

Перспективными в прикладном плане и богатыми на физические эффекты оказались пленочные структуры в системе *редкая земля - переходной металл*. Каждый из материалов

магнитного слоя (4f- или 3d-металл) может находиться в различных кристаллических и магнитных модификациях, что подчас приводит к противоречивым требованиям, предъявляемым к свойствам индивидуальных слоев, и тогда еще приходится решать технологические задачи. При этом надо иметь в виду, чтобы по условиям эксплуатации конечный продукт был удобным в эксплуатации и экономичным (например, работал в малых магнитных полях, был термостабильным и т.п.).

Таким образом, если говорить о направленности исследований Н.А. Кулеша, то его диссертационная работа, посвященная созданию пленок с обменной анизотропией, исследованию механизмов ее образования и управления свойствами наноразмерных структур, находится в русле современного физического материаловедения и, несомненно, является весьма и весьма *актуальной*.

Тематика наноразмерных материалов и структур является предметом обсуждений и дискуссий на конференциях различного уровня. Это, конечно же, традиционная специализированная конференция по Физическим свойствам металлов и сплавов (г. Екатеринбург), а также международные конференции, где вопросу исследования многослойных пленочных структур отводится немаловажная роль, и эта тематика традиционно включается в их программу (например, MISM, EASTMAG, JEMS, HMMM и пр.). Вопросам практического применения гибридных магнитных структур посвящаются круглые столы и специальные семинары. Это все свидетельствует о важности проводимых исследований и их *практической значимости*.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, три из которых являются оригинальными, заключения, списка литературы. Диссертация изложена на 143 страницах и содержит 85 рисунков.

Обзорная часть содержит фактический материал в области физических свойств, пленочных структур в системе *редкая земля–3d-переходной металл* в кристаллическом и аморфном состояниях. Приведены данные о магнитной анизотропии, механизмах, ответственных за ее возникновения, и способах формирования однонаправленной анизотропии. Также изложены сведения о механизмах перемагничивания и температурных зависимостях технически важных магнитных параметров. Эти данные сами по себе представляют самостоятельный интерес. Собственно после прочтения этой главы видны проблемы, решению которых и посвящается настоящее исследование.

Хотя все исследования носят комплексный характер и взаимосвязаны, по направленности исследований представленный в диссертации материал можно условно

разбить на три части: технология получения материалов и экспериментальные методики; физические свойства индивидуальных аморфных слоев системы *редкая земля-кобальт*; магнитные свойства пленочных структур с однонаправленной анизотропией.

Вторая глава посвящена описанию технологии получения пленок, их паспортизации и описанию экспериментальных методик. Обращает на себя внимание высокая культура при напылении пленок. Это, как показывают результаты неразрушающего контроля, позволяет получать пленки с наперед заданной структурой (кристаллической или аморфной). Модернизация методов рентгенофлуоресцентного анализа и атомно-эмиссионной спектроскопии позволила с высокой точностью определить состав пленок и выполнить оценку средних атомных моментов. Также проведен анализ диффузии элементов на интерфейсе. На эти данные опирались при создании магнитных слоев, и уже не возникало вопросов об их качестве.

В третьей главе представлены результаты исследований магнитных и магнитоупругих свойств аморфных пленок сплава *редкая земля-кобальт*. Эти исследования направлены на установление закономерностей при изменении концентрационных соотношений элементов. Для сплава Tb-Co получены условия перехода от чисто ферромагнитной структуры к угловой структуре, причем управляемым способом. Проведено сравнение магнитных данных для редкоземельной подсистемы в зависимости от способа напыления слоев.

Из данных высокополевых исследований автор получил информацию о конкуренции обменного взаимодействия и локальной анизотропии. Эти взаимодействия определяют магнитную структуру для исследованных пленок: стохастическую для Tb-Co и коллинеарную для Gd-Co. Определена константа молекулярного поля, характеризующая обмен между гадолинием и кобальтом. Эксперименты по наведению одноосной анизотропии магнитным полем в пленках Tb-Co в процессе технологического режима и использованием подложек с полимерным покрытием и приложением деформаций позволили сделать, на мой взгляд, важный вывод о немагнострикционном происхождении наведенной анизотропии. Определяющим здесь является одноионный механизм формирования анизотропии и появление атомного упорядочения ионов Tb при их осаждения на уже сформировавшийся слой.

В какой-то мере эта глава носит предварительный характер и ее цель состоит в описании свойств слоев, используемых в дальнейшем для конструирования искусственной многослойной структуры.

Четвертая глава содержит описание магнитных свойств пленочных структур со слоями из Tb-Co, в которых наведена одноосная анизотропия. Этот раздел посвящен изучению структур, обладающих эффектом обменного смещения, где в качестве магнитомягкого слоя используется пермаллой или «чистый» кобальт. Установлено, что обменная межслоевая связь в структурах со слоем кобальта гораздо сильнее, чем со слоем пермаллоя. Отсюда автор делает вывод о главенствующей роли взаимодействия 3d-ион–Tb, по сравнению с взаимодействием 3d-ион–3d-ион. Также Н.А. Кулеш провел исследование и процессов перемагничивания в трехслойных пленках FeNi/Co/TbCo. Из формы трехступенчатой петли намагничивания делается вывод о более сильном взаимодействии на интерфейсе Co-TbCo, чем на интерфейсе FeNi-Co.

Следует отметить результат по изменению свойств двухслойных пленок FeNi/TbCo в результате термической обработки. Здесь автор «зацепил» эффект влияния взаимной термодиффузии контактирующих на границе раздела материалов на намагничивание. Также важно, что небольшой слой титана (~ 0.7 нм) работает как барьер, препятствующий процессам взаимопроникновения элементов, и обеспечивает температурную стабильность структуры.

На протяжении всей диссертации Н.А. Кулеш старался подтвердить свои экспериментальные результаты путем сравнения с существующими модельными представлениями. При рассмотрении магнитных свойств он использовал метод молекулярного поля, который позволяет феноменологическое описание магнитных структур. В большей части теоретического анализа им получены хорошо согласующиеся с экспериментом результаты.

Приведенный выше разбор некоторых положений диссертации свидетельствует о высоком профессионализме Н.А. Кулеша. Полученный им фактический экспериментальный материал имеет важное практическое значение и, по сути, большая его часть получена впервые. Более того он сумел систематизировать все экспериментальные результаты по условиям получения пленок и связать с магнитными свойствами. Так что *научная новизна* данной диссертационной работы налицо. Не вызывает сомнения и *теоретическая значимость* данной диссертации, поскольку некоторые положения теоретического анализа носят не только описательный, но предсказательный характер, также могут дать повод для дальнейших теоретических разработок.

Работы Н.А. Кулеша известны магнитологам, а полученные им результаты цитируются специалистами.

Однако, несмотря на высокий уровень проведенных исследований, сама диссертационная работа не свободна от недостатков.

- Так, наблюдается некоторая фрагментарность проведенных исследований. В главе 3 явно недостает данных о наведенной анизотропии в пленках Gd-Co, и сразу ощущается некоторая незавершенность.
- Отсутствуют данные о том, в каком состоянии находятся слои кобальта. То ли это ГПУ фаза, то ли ГЦК фаза? (Глава 4).
- Не помешало бы провести сравнение с тем, что происходит на границе раздела в пленках Fe-TbCo. Насколько известно, такая информация существует.

Обнаруженные недочеты не портят общего положительного впечатления от сути проделанной работы, поскольку выполнен огромный объем исследований, получены важные во всех отношениях результаты. Использованные методики измерений свидетельствуют о *современном уровне исследований*. И главное, созданы пленочные магнитные структуры, удовлетворяющие потребностям техники и применяемые в устройствах функциональной магнитоэлектроники. В целом диссертация Н.А. Кулеша является законченной работой, в которой решена научная проблема, а именно, отработана технология получения термостабильных магнитных пленочных структур на основе RE-Co (RE = Gd, Tb, La) и пермаллоя (FeNi), исследованы технически важные магнитные характеристики, способы управления ими и определены эксплуатационные свойства. Работа написана грамотным языком и лаконично изложена. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Кулеш Никита Александрович, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений».

Работа была заслушана на научном семинаре Института инженерной физики и радиоэлектроники (ИИФирЭ) Сибирского федерального университета (СФУ) протокол № 10 от «14» октября 2014 г.

Составитель отзыва Патрин Геннадий Семёнович
Директор ИИФирЭ СФУ
доктор физ.-мат. наук, профессор

/Г.С. Патрин/