

ОТЗЫВ
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
кандидата физико-математических наук
Миляева Михаила Анатольевича
на диссертационную работу Кулеш 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

Актуальность темы диссертации. Магниторезистивные пленочные наноматериалы и магнитные сенсоры на их основе в настоящее время широко используются в различных устройствах считывания и хранения информации, в микроэлектронике, робототехнике и других практических приложениях. Среди таких наноматериалов значительное место занимают пленочные материалы с эффектами анизотропного, гигантского и туннельного магнитосопротивления. Для получения в магниточувствительных средах необходимых для их применения свойств создают внутреннее магнитное смещение за счет однонаправленной анизотропии, формирующейся на границе между одним из обменно-связанных ферромагнитных слоев и «закрепляющим» слоем из антиферромагнитного или ферримагнитного материалов. Такое магнитное смещение, в частности, создается в спин-вентильных наноструктурах и ячейках магнитной памяти (MRAM). При этом для улучшения температурных характеристик магниторезистивных сред важной задачей является поиск эффективных материалов с высокой температурной стабильностью свойств, пригодных для их использования в качестве закрепляющих слоев. В настоящее время в качестве таких слоев используются антиферромагнетики FeMn, IrMn, PtMn и др., причем наиболее простым в технологическом плане является только антиферромагнетик FeMn, который, однако, обладает относительно низкой температурой блокировки. Представленная диссертационная работа Кулеш Н.А. посвящена синтезу малоизученных аморфных пленок на основе сплавов Co с редкоземельными металлами La, Gd, Tb, исследованию магнитной анизотропии и гистерезисных свойств, а также выявлению технологических и физических условий, способствующих усилению однонаправленной анизотропии в пленках (Fe₂₀Ni₈₀, Co)/Tb-Co и повышению их температурной стабильности.

Указанные направления работ, несомненно, являются **актуальными**, как с точки зрения фундаментальных исследований свойств новых синтезируемых пленочных материалов, так и в прикладном аспекте.

Структура и содержание работ. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка цитируемой литературы. Отличительной чертой данной работы является четкая логическая

связанность всех частей материала. Описана методика приготовления пленочных образцов, подробно описаны способы решения частных методических и экспериментальных задач, возникающих последовательно при получении новых результатов в процессе выполнения исследований, дана интерпретация основных полученных закономерностей, проведено сравнение с результатами других авторов, указаны возможные причины обнаруженных отклонений экспериментальных данных, не укладывающихся в рамки предложенных модельных представлений, проведены дополнительные проверочные исследования, подтверждающие правильность полученных результатов и сделанных выводов.

Первая глава представляет собой краткий обзор сведений о структурных, магнитных и магнитоупругих свойствах сплавов Re-Co, имеющих в литературе. Особое внимание уделено описанию механизмов формирования магнитной анизотропии. Во второй главе описаны два метода приготовления пленочных образцов (магнетронное распыление и высокочастотное ионное распыление), в которых использовались мозаичные мишени, описаны методики аттестации структурного и магнитного состояния образцов, представлен разработанный метод определения элементного состава с использованием прибора Nanohanter (Rigaku). В третьей главе приведены результаты исследований магнитных и магнитоупругих свойств аморфных пленок La-Co, Gd-Co и Tb-Co. При этом сплавы La-Co были использованы как модельные объекты, удобные для исследования влияния редкоземельных атомов на магнетизм кобальтовой подсистемы. Для этой системы, в частности, найдено экспериментальное подтверждение известного «явления переноса заряда», заключающегося в заполнении 3-d зоны атомов Co электронами внешних оболочек La. На пленках сплава La-Co разного состава была отработана также методика определения атомного магнитного момента Co. Полученные данные и методические подходы, использованные для получения характеристик сплавов La-Co, были применены для анализа экспериментальных результатов для аморфных пленок Gd-Co и Tb-Co. Для разных концентраций этих пленок были определены атомные магнитные моменты Gd и Tb, исследованы особенности высокополевого намагничивания и получены значения констант анизотропии при различных температурах. В четвертой главе исследованы особенности однонаправленной анизотропии и гистерезисные свойства многослойных пленок, в которых сплав Tb-Co соседствует с магнитомягкими ферромагнитными слоями Co и Fe₂₀Ni₈₀. Особое внимание уделено пленкам с высоким содержанием атомов Tb, в которых преобладает намагниченность редкоземельной подрешетки. На основе измерений магнитосопротивления в пленках Fe₂₀Ni₈₀/Tb₂₄Co₇₆ исследовано влияние сжимающих упругих напряжений на поле магнитного насыщения. Также исследована роль интерфейсов в формировании магнитных свойств в пленках на основе Tb-Co, влияние температуры и термомагнитной обработки на магнитные свойства пленок с однонаправленной анизотропией. В конце каждой главы приведен

список цитируемой литературы. В конце диссертации сформулированы общие выводы по работе и приведен список работ автора.

Научная новизна полученных результатов. В работе получены следующие наиболее важные экспериментальные результаты, обладающие научной новизной.

1. На основе магнитных данных для сплавов разного состава Tb_xCo_{100-x} получены экспериментальные данные, подтверждающие монотонное снижение среднего атомного момента Tb по мере увеличения в сплаве содержания Tb, что связано со сперимагнитным характером магнитного упорядочения в аморфной системе Tb-Co. Впервые показано, что интенсивность этого изменения зависит от способа получения плёнок.

2. Для пленок Tb-Co получены магнитные данные, однозначно свидетельствующие об одноионном механизме наведённой магнитной анизотропии в плоскости слоев аморфных плёнок Tb-Co. При отсутствии внешнего магнитного поля в процессе приготовления данных пленок в них образуется магнитная структура с перпендикулярной анизотропией. Полученные результаты указывают на возможность целенаправленного изменения магнитной анизотропии подобных пленок в процессе их приготовления с помощью выбора соответствующей напряженности технологического магнитного поля.

3. Впервые получены данные о влиянии на параметры однонаправленной анизотропии дополнительного магнитного (Co) и немагнитного (Ti) слоев, расположенных в интерфейсной области между слоем ферромагнитного сплава Tb-Co и слоем пермаллоя. Определена толщина прослойки Ti (0.8 нм), при которой исчезает влияние магнитного состояния слоя Tb-Co на слой пермаллоя и поле однонаправленной анизотропии становится равным нулю.

4. Показано, что выбором режимов термомагнитной обработки и оптимальной толщины слоя Ti (0.7 нм) можно значительно увеличить температурную стабильность пленок $Fe_{20}Ni_{80}/Ti/Tb_{29}Co_{21}/Ti$, для которых поле обменного смещения практически не изменяется после часового отжига при температуре $T_a=250$ °C.

Практическая ценность результатов.

В работе имеется подробное описание технологических и методических подходов, используемых автором для приготовления и целенаправленного изменения физических свойств магниторезистивных пленок $Fe_{20}Ni_{80}/Tb-Co$ с внутренним магнитным смещением, которые представляют интерес для изготовления магниточувствительных сенсоров. Полученные данные по влиянию различных факторов на наведённую магнитную анизотропию пленок Tb-Co могут быть полезны для оптимизации процесса получения соответствующих слоев с заданными характеристиками.

Достоверность результатов обеспечивается комплексным характером выполненных исследований на большом экспериментальном материале, дополнительной проверкой независимыми методами, их многократной повторяемостью, использованием современного оборудования для получения

тонких пленок, сертифицированных материалов и аттестованных измерительных установок, приборов и методик. Основные результаты диссертации докладывались на 19 международных и всероссийских конференциях и симпозиумах, опубликованы в 9 научных статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и 29 тезисах докладов.

К замечаниям по диссертационной работе можно отнести следующее.

1. В описанной в работе разработанной автором методике определения химсостава пленок с помощью прибора Nanohanter и демонстрации возможности его успешного использования для исследования интерфейсов, осталось неясным минимальное изменение толщины интерфейсов, которое позволяет фиксировать данная методика.

2. Рентгеноструктурные данные, полученные на дифрактометре, во всей работе представлены без указания типа используемого излучения, что затрудняет однозначное понимание дифрактограмм (рисунки 3.1, 3.2, 3.8, 3.11, и другие).

3. Для плёнок типа Fe-Ni/Tb-Co установлена зависимость поля обменного смещения H_e от температуры T . Она связывается с соответствующим изменением межслойного обменного взаимодействия. При этом не обсуждается вероятность того, что при послойном перемагничивании переходный магнитный интерфейс может образовываться внутри аморфного слоя. В таком случае зависимость $H_e(T)$ будет являться индикатором не межслойного взаимодействия, а эффективности обменного взаимодействия в слое Tb-Co.

4. Несмотря на хороший стиль изложения материала, есть ряд замечаний, которые касаются оформления текста диссертации:

- в литературном обзоре отсутствует значительное количество знаков препинания;
- после выписанных формул текст в следующей строке, как правило, начинается с запятой;
- на рисунках 4.26 и 4.27 не указано стрелками отношение каждой кривой к соответствующей оси ординат.

Указанные замечания и недочеты не являются принципиальными ошибками и не снижают общий уровень диссертационной работы.

Диссертация правильно структурирована. Актуальность исследования показана. Цель работы сформулирована ясно, поставленные задачи решены. Работа содержит краткий обзор имеющихся на данный момент научных результатов по исследуемой тематике. По каждой главе сделаны выводы. Общий вывод по работе соответствует поставленной цели и сформулированным задачам. Материал изложен логично. Все выводы обоснованы. Содержание автореферата достаточно полно отражает основное содержание и результаты работы.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.11, в частности пунктам 3 (исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств) и 5 (разработка различных магнитных материалов, технологических приемов, направленных на улучшение их характеристик, приборов и устройств, основанных на использовании магнитных явлений и материалов).

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой проблема синтеза магниторезистивных пленочных материалов с внутренним магнитным смещением, решена посредством развития технологических методов и выявления физических механизмов, управляющих магнитными, гистерезисными свойствами и особенностями магнитной анизотропии пленок, а также с использованием термомагнитной обработки. Работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Кулеш Никита Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук,
руководитель сектора нанотехнологий спинтроники,
ведущий научный сотрудник
лаборатории электрических явлений
Института физики металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения РАН



Миляев Михаил Анатольевич

Адрес: 620137, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
тел. (343) 378-38-81, e-mail: milyaev@imp.uran.ru

02 декабря 2014 г.

