ОТЗЫВ

официального оппонента Столяра Сергея Викторовича на диссертационную работу Горьковенко Александра Николаевича «**Микроструктура, магнитные и магниторезистивные свойства композиционных пленок типа (3d-металл)-диэлектрик и пленочных систем с композиционными субслоями»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Актуальность темы диссертационной работы

Большинство функциональных магнитных материалов, изготовляемых в виде тонких пленок, представляют собой слоистые обменносвязанные структуры, многофазные либо композиционные структуры. Безусловный интерес вызывают гранулированные пленки, ферромагнитный металл-диэлектрик, несмотря на то, что исследования таких систем продолжается уже более двух десятилетий. Этот интерес обусловлен как прикладной, так и фундаментальной значимостью данного класса материалов, в которых физические свойства зависят не только от концентрации фаз, но и от микроструктуры системы. Под микроструктурой в первую очередь здесь понимают характер взаимного расположения фаз, разветвленность, степень связности, а во вторую – размер, форму, состояние поверхности гранул, кристаллическую структуру. В данных материалах обнаружены гигантский эффект Холла, туннельное магнетосопротивление и т.д. Последнее делает эти материалы привлекательными для применения в микроэлектронике и спинтронике, поэтому тема диссертационной работы Горьковенко А. Н., без сомнения, актуальна.

Структура и содержание диссертационной работы

Автором получен и проанализирован значительный экспериментальный материал. Рассмотрено два класса материалов. Это, прежде всего гранулированные пленки ферромагнитных сплавов (3-d металлов) в диэлектрических матрицах (Al_2O_3, SiO_2), а также многослойные обменносвязанные структуры на основе $Fe_{80}Ni_{20}/Fe_{50}Mn_{50}$, характеризующиеся однонаправленной анизотропией, в которых разнообразие эффектов достигается введением дополнительных гранулированных слоев на основе 3-d металлов в диэлектрических матрицах.

В первой главе диссертации дается обзор литературы, посвященной получению и исследованию физических свойств гранулированных материалов и систем с обменной однонаправленной анизотропией. Рассматриваются массивные гранулированные системы на примере сплава алнико, классические быстрозакаленные сплавы, представляющие собой двойные Co-Cu или тройные сплавы FeNi-Cu, в которых один из элементов имеет крайне низкую растворимость при комнатных температурах. Анализируются преимущества и недостатки вакуумных технологий получения гранулированных пленок ферромагнитный металл-металл, ферромагнитный металл - диэлектрик. Подробно анализируются кривые намагничивания и информация, которую можно из них извлечь (как в ферромагнитном состоянии, так и в суперпарамагнитном состоянии) и магниторезистивные петли гранулированных пленок ферромагнитный металл-металл, ферромагнитный металл- диэлектрик. Описываются классические пленочные системы с однонаправленной анизотропией $Fe_{20}Ni_{80}/Fe_{50}Mn_{50}$, а также обменносвязанные структуры $Fe/Fe\text{-}SiO_2/Fe$.

Во второй главе описаны технологические условия получения исследованных в диссертации систем. Перечень полученных и в дальнейшем исследованных пленок впечатляет. Пленки $Co-SiO_2$, $Co-Al_2O_3$, $Fe-SiO_2$, $Fe_{20}Ni_{80}-SiO_2$, $Ni-SiO_2$ были получены методом высокочастотного ионно-плазменного распыления, реализованного по диодной схеме, пленки $Co-SiO_2$, $Co-Al_2O_3$,$Co_{90}Fe_{10}-Al_2O_3$, $Fe-Al_2O_3$, $Fe_{20}Ni_{80}-Al_2O_3$, $Ni-Al_2O_3$, а также обменносвязанные структуры $Fe_{20}Ni_{80}/Fe_{50}Mn_{50}$, $Fe_{20}Ni_{80}/Fe_{50}Mn_{50}/Fe_{20}Ni_{80}/Co-Al_2O_3/Fe_{20}Ni_{80}$ - в варианте магнетронного распыления. Описаны методики изучения микроструктуры, магнитных и магниторезистивных свойств исследуемых в диссертации структур.

Втретей главе приведены результаты исследования композиционных пленок 3d-металл - диэлектрик. Сравниваются электрические, магниторезистивные, магнитные свойства, а также микроструктура пленок, полученных в результате распыления мозаичной мишени, а также полученных в результате магнетронного сораспыления отдельных мишеней металла и диэлектрика. Анализ электрических и магнитных свойств свидетельствует о том, что в результате сораспыленияотдельных мишеней пленки получаются более однородными, а их микроструктуры характеризуются меньшими размерами гранул. Анализ безгистерезисных кривых намагничивания и фиттирование ланжевеновских кривых позволило восстановить концентрационные зависимости среднего размера гранул от состава композиционных пленок. Размер металлических гранул в композиционных пленках также контролировался с помощью электронной микроскопии. В главе обсуждается еще один способ определения размера ферромагнитных гранул из анализа температурных зависимостей намагниченности, полученных в режимах ZFCи FC, а именно, используя связь температуры блокировки с объемом и анизотропией частицы. Для определения размера используется константа анизотропии ГПУ - Co. Картины микродифракции свежеприготовленных композиционных пленок на основе Co, приведенные в диссертации, оказались малоинформативными (наблюдалось несколько размытых дифракционных максимумов), поэтому вопрос о кристаллической структуре ферромагнитных гранул в свежеприготовленных пленках остался открытым. Продемонстрировано, что наиболее приемлемыми для использования в качестве магниторезистивной среды оказываются пленки $Co-Al_2O_3$, с концентрацией 3d-металла 40-50%. В данных структурах величина магниторезистивного эффекта составляет около 8 % при комнатной температуре. На основе данных пленок изготовлен прототип сенсора магнитного поля.

В четвертой главе изложены результаты исследования обменного взаимодействия ферромагнитных слоев сплава пермаллой, разделенных слоем гранулированного сплава $Co_x(Al_2O_3)_{1-x}$ (при x=0 включительно). Особенность исследуемых в данной главе структур заключалась в том, что один из ферромагнитных слоев характеризовался однонаправленной анизотропией за счет связи со слоем эквиатомного сплава FeMn. Установлено, что в трехслойной пленочной системе $Fe_{20}Ni_{80}/Fe_{50}Mn_{50}/Fe_{20}Ni_{80}$ величина обменной однонаправленной анизотропии в 2 раза превышает величину обменной однонаправленной анизотропии двухслойной системы $Fe_{20}Ni_{80}/Fe_{50}Mn_{50}$. Изучены кривые перемагничивания и магниторезистивные свойства структур $Fe_{20}Ni_{80}/Fe_{50}Mn_{50}/Fe_{20}Ni_{80}/Co_x(Al_2O_3)_{1-x}/Fe_{20}Ni_{80}$, а также влияние термообработки этих структур на их эксплуатационные свойства.

В **приложении** описаны прототипы сенсорных элементов на основе гранулированных пленок и особенности СВЧ поглощения гранулированными пленоками.

Достоверность представленных результатов

Достоверность полученных Горьковенко А.Н. результатов подтверждается использованием современного технологического и экспериментального оборудования при изготовлении и изучении свойств пленочных структур; использованием нескольких прямых и косвенных методик для определения физических параметров; тщательным анализом и объяснения обнаруженных эффектов, а также их сопоставлением с результатами других авторов.

Научная новизна

В диссертационной работе Горьковенко А.Н. экспериментально показано, во-первых, что в трехслойной пленочной системе $Fe_{20}Ni_{80}/Fe_{50}Mn_{50}/Fe_{20}Ni_{80}$ величина обменной однонаправленной анизотропии в 2 раза превышает величину обменной однонаправленной анизотропии двухслойной системы $Fe_{20}Ni_{80}/Fe_{50}Mn_{50}$, во - вторых, что трехслойные структуры более термически устойчивые по сравнению с двухслойными пленками; в результате термообработки трехслойной пленки $Fe_{20}Ni_{80}/Fe_{50}Mn_{50}/Fe_{20}Ni_{80}$ в течение 1 часа при$T<500^0$Селичина обменной анизотропии остается неизменной.

Практическая значимость

Результаты диссертационной работы Горьковенко А.Н. представляют несомненный научный интерес и имеют очевидное практическое значение. Отработаны технологические режимы получения гранулированных пленок$Co\text{-}Al_2O_3$ с приемлемыми электрическими, магнитными и магниторезистивными свойствами. На основе гранулированной пленки $Co_{50}(Al_2O_3)_{50}$ толщиной 100 нм создан прототип магнитного сенсора для сильных магнитных полей с чувствительностью 0,0004 Ом/Э.

Публикации и апробирование результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы Горьковенко А.Н. хорошо апробированы и опубликованы. По теме диссертации автором опубликовано 9 работ в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК Министерства образования и науки РФ (ЖТФ, ФММ, IEEETransactionsonMagnetics). Результаты проведенных исследований были представлены на 27 научных конференциях, как в России, так и за рубежом. Диссертационная работа выполнена на высоком методологическом уровне, отличается полнотой изложения и является завершенным научным исследованием. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе:

1. При оценки размера гранул в композиционных пленках на основе Co с помощью выражения 13 на стр.76 из температуры блокировки используется константа кристаллографической анизотропии ГПУ Co. Однако в работе, во- первых, отсутствуют доказательства реализации в свежеприготовленных образцах данной структуры, во-вторых, константа анизотропии в выражении 13 является эффективной. Она определяется объемной анизотропией гранулы и поверхностной анизотропией. Разделить вклады объема и поверхности в реализующихся значениях константы анизотропии на основе приведенного экспериментального материала в диссертации вполне возможно.

2. На стр. 73 в таблице 2 приведены «Значения максимального магниторезистивного отношения в образцах типа (Co, CoFe, FeNi, Fe,Ni)- Al_2O_3в зависимости от типа 3-d металла». Обсуждение полученных результатов на основе

сравнения намагниченностей насыщения, констант анизотропии используемых ферромагнитных сплавов, безусловно, украсило бы работу.

3. Петли гистерезиса пленок Ta/$Fe_{20}Ni_{80}$/$Fe_{50}Mn_{50}$, например, на рис.57(а), 57(б) “левые”. Петли гистерезиса пленок Ta/$Fe_{20}Ni_{80}$/$Fe_{50}Mn_{50}$/ $Fe_{20}Ni_{80}$, например, на рис.75, 76, 80, 86, 89 “правые”. Разъяснений этих трансформаций в тексте диссертации нет.

4. На стр. 98 подпись к рис. 69 - «Продольные (1) и поперечные (2) магнитометрические и магниторезистивные (б) петли гистерезиса пленки Ta(5)/$Fe_{20}Ni_{80}$(5)/$Fe_{50}Mn_{50}$(20)/$Fe_{20}Ni_{80}$(40)/Ta(5)». На рис. 69 (а) изображена лишь продольная кривая перемагничивания.

5. В тексте диссертации присутствуют стилевые шероховатости.

- на стр. 94 3 абзац сверху: «Нельзя исключить и термически активированное приграничное перемешивание слоев, **могущее повлиять** на эффективность межслойного обмена»;

- на стр. 100 3 абзац сверху: «**Одночасовой** отжиг в вакууме выявил …»;

- на стр. 104 «Не исключено также, что при контакте между слоем $Fe_{50}Mn_{50}$ и кислородосодержащей средой Al_2O_3 или Co-Al_2O_3 происходит приповерхностное окисление Mn, **от чего он утрачивается антиферромагнитное упорядочение»; и т.п.**

Сделанные замечания не ставят под сомнение правильность основных результатов и не влияют на общее положительное мнение о работе.

Считаю, что диссертационная работа Горьковенко Александра Николаевича «Микроструктура, магнитные и магниторезистивные свойства композиционных пленок типа (3d-металл)-диэлектрик и пленочных систем с композиционными субслоями» полностью удовлетворяет требованиям п.9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Горьковенко А.Н. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:
старший научный сотрудник научно-исследовательской части Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» (ФГАОУ ВО СФУ) , доктор физико-математических наук, доцент

10 ноября 2016 Столяр Сергей Викторович

Подпись Столяра С.В. заверяю …

Почтовый адрес:660041, г. Красноярск,пр. Свободный, 79
тел: +7(391) 243-26-35;
e-mail: stol@iph.kras.ru

ФГАОУ ВО СФУ
Подпись С.В. Столяра заверяю
Начальник общего отдела
«10» 11 2016 г.