

ОТЗЫВ

официального оппонента, Патрина Геннадия Семёновича, на диссертационную работу Кудюкова Егора Владимировича «**Магнетизм пленок типа R-T (R=Gd, Tb, Dy; T=Co, Fe) и прикладные свойства пленочных нанокompозитов на их основе**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. *Физика магнитных явлений*.

Актуальность темы. Диссертация Е.В. Кудюкова посвящена одному из активно развивающихся направлений физики конденсированного состояния вещества, а именно, к изучению наноразмерных многослойных материалов, пригодных к применению в устройствах спинтроники. Интерес к исследованию таких искусственных материалов обусловлен как необычными магнитными и магнитотранспортными свойствами, управляемыми технологическим процессом их приготовления, так и своими функциональными возможностями, представляющими большой интерес для использования их в качестве магниточувствительных материалов в различных изделиях магнитоэлектроники и спинтроники. Многослойные наноструктуры уже нашли свое применение в различных датчиках магнитного поля, в переключающих, измерительных и управляющих устройствах, входящих в состав автомобилей и робототехники. Любые найденные новые подходы в синтезе и исследовании таких материалов, позволяющие улучшить их практически значимые свойства, представляют большой интерес. Работа Е.В. Кудюкова посвящена синтезу и исследованию наноструктур, обладающих эффектом обменного смещения и перспективных для применения в качестве тенземагниторезистивных датчиков.

Помимо вопросов, имеющих прикладную направленность, в работе также исследованы новые свойства материалов, связанные с наличием обменного смещения при различных материалах закрепляющих слоев. Все это и определяет **актуальность** настоящих исследований.

Достоверность и обоснованность результатов исследования обосновывается тем, что все проведенные исследования выполнены на современных научных установках, с использованием высокоточных приборов и апробированных экспериментальных методик. Полученные экспериментальные результаты обработаны и проанализированы в рамках современных теоретических представлений с применением хорошо развитых подходов и моделей, и подтверждаются другими независимыми исследованиями.

Оценка содержания диссертации.

Диссертационная работа Е.В. Кудюкова состоит из введения, пяти глав, заключения, списка работ автора, списка обозначений и списка использованной литературы и изложена на 188^{ми} страницах.

Первая глава диссертации является обзорной и посвящена описанию магнитных и магнитоупругих свойств редкоземельных сплавов с 3d-элементами, как в объемном, так и пленочном состояниях. Также описаны свойства композитов со слоистыми компонентами, содержащими редкоземельные элементы. На основании анализа приведенных данных автор делает вывод о пригодности подобных материалов для решения поставленных целей.

Вторая глава содержит описание методов получения пленочных систем, исследования структурных характеристик, магнитных и тензомагниторезистивных свойств. Основное внимание уделяется изучению закономерностей формирования магнитных свойств пленок в системе RE_xCo_{100-x} , где $RE = Gd, Tb, Dy$, с разным содержанием кобальта. В этом случае использовался метод высокочастотного ионно-плазменного напыления. Для смешанных систем $Tb_xDy_yFe_{100-x-y}$ со слоями пермаллоя (Py) использовалась установка магнетронного напыления Orion-8. Проведен анализ влияния отжига на магнитные свойства. Полученные системы тщательно паспортизировались на современных установках: химический состав - на установке Rigaku Nanohunter и на микроскопе Carl Zeiss NTC Merlin; структура определялась с помощью установок PANalytical Empire и Bruker D8.

Магнитные свойства изучались на высокочувствительной аппаратуре, а именно, на вибрационном магнетометре LakeShore VSM 7407, СКВИД-магнетометре MPMS-XL7 и измерительном комплексе PPMS DynaCool 9T. Обработка результатов проводилась с использованием программного пакета Comsol Multiphysics.

Полученные характеристики материалов сопоставляются с литературными данными и, в конечном итоге, создается единая система физических свойств.

Все это указывает на тщательность подхода к выбору материалов и паспортизации его свойств.

В третьей главе приведены результаты исследований взаимосвязи структурных и магнитных свойств пленок из бинарных сплавов типа RE-Co ($RE = Gd, Dy, Tb$) в зависимости от внешних условий и воздействий. Экспериментально установлено, что пленки только из редкоземельных элементов имеют нанокристаллическую структуру и значительную (до 10%) пористость. При этом происходят искажения (растяжение) кристаллической решётки, которые нарастают в ряду Tb, Dy, Gd. В случае пленок бинарных сплавов при концентрациях кобальта более 10 ат.% в пленках реализуется рентгеноаморфное состояние. По влиянию примесного кобальта на свойства область концентраций можно условно разделить на две области. В концентрационной области $x < 50$ происходит изменение коэрцитивной силы, так для системы Dy-Co она изменяется немонотонно (с минимумом), а для системы Tb-Co монотонно возрастает.

В области концентраций $x > 50$ реализуются немонотонные концентрационные и температурные зависимости спонтанной намагниченности и появление температуры магнитной компенсации. Эти результаты находят своё описание в рамках модели молекулярного поля. На этой основе была построена фазовая диаграмма в координатах x-T.

Четвертая глава посвящена изучению эффекта обменного смещения в композитах с слоями, содержащими редкоземельные элементы Gd и Tb. При этом используя полученные ранее результаты определены особенности применения этих материалов. Различия в анизотропии и гистерезисных свойствах плёнок Gd-Co и Tb-Co дали возможность использовать в одном случае как закреплённый слой, а в другом случае как закрепляющий слой в плёночных структурах с обменным смещением. Исследования, главным образом, были выполнены на трёхслойных *ферро-/антиферро-/ферромагнитных* структурах $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{FeMn}/(\text{Gd-Co})$. Было установлено, что обменное смещение имеет место в обоих слоях, прилегающих к антиферромагнитному слою, причём оно реализуется независимым образом и может быть, как одного знака, так и разных знаков. Интересным результатом для закреплённого слоя Gd-Co в области температуры магнитной компенсации является возможность управления этой температурой посредством подбора состава.

Для структур $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}/\text{M}/\text{Tb}_{27}\text{Co}_{73}/\text{Ti}$, где M – ультратонкая прослойка различного состава (Ti, Tb, Ni, Fe) установлено, что Tb является наиболее подходящим материалом прослойки. Толщина слоя тербия в этой структуре влияет на величину поля обменного смещения, а величины обменного поля, коэрцитивной силы и температуры блокировки делают такую структуру практически перспективной.

В пятой главе приводятся результаты исследований тензomagниторезистивных свойств плёнок $\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}$ и $\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$. Эти исследования носят направленный прикладной характер. Было выявлено, что для использования таких материалов в плёночном состоянии необходимо проводить дополнительную термомагнитную обработку, чтобы подавить перпендикулярную анизотропию. Все эти исследования были выполнены.

Оказалось, что для двухслойной структуры $\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ можно сформировать композитную среду с достаточно высоким тензomagниторезистивным эффектом. Это достигается при селективном отжиге слоя $\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}$ или осаждении его на нагретую подложку. Тогда возможна реализация тензomagниторезистивного эффекта такого уровня, который является пригодным для применения.

Новизна полученных результатов заключается в том, что:

- впервые показано, что основному состоянию нанокристаллических плёнок Gd, полученных методом ионного распыления, отвечает асперомагнитное упорядочение, которое, вероятно, обусловлено суперпозицией свойств ферромагнитной и сперомагнитной фаз;
- для аморфных плёнок системы Gd-Co впервые построена фазовая диаграмма в координатах x-T;

- обнаружена и изучена возможность управления величиной обменного смещения в системе $Tb_{27}Co_{73}/Fe_{10}Ni_{90}$ путем введения ультратонкой межслойной прослойки Tb, в результате чего получают предельно низкий гистерезис в функциональном слое $Fe_{10}Ni_{90}$;
- изучена двухслойная плёночная структура $Tb_{10}Dy_{23}Fe_{67}/Fe_{20}Ni_{80}$, на которой реализован тензомагниторезистивный эффект, пригодный для применения.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что получены экспериментальные результаты, расширяющие существующие представления о процессах намагничивания в плёночных структурах, содержащих редкоземельные элементы. Основным достоинством диссертации является разработка технологических методов, позволивших создать управляемые материалы, обладающие практически значимыми характеристиками обменно-смещенных слоев. Найдены эффективные варианты композиций наноструктур, обладающих высокими функциональными характеристиками. В результате проведенных исследований изготовлены тензомагниторезистивные наноструктуры с оптимизированными характеристиками, пригодные для практических применений.

Результаты исследований, представленные в диссертации Е.В. Кудюкова, широко обсуждались на Международных и Всероссийских конференциях и симпозиумах, хорошо известны в научном сообществе и цитируются в научной литературе. По теме диссертационной работы опубликовано 9 статей в ведущих российских и зарубежных журналах, которые входят в Перечень ВАК и/или индексируются в системах Web of Science и Scopus.

Работа написана лаконичным языком, все её положения логично обосновываются. Нареканий не вызывает. Наверное, мне не повезло и достался экземпляр, где имеются небрежности в оформлении. Местами компоновка текста такая, что подпись к рисунку начинается на одной странице, а заканчивается на другой (например, рис. 3.12, стр. 64, 65).

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в организациях, исследующих как фундаментальные аспекты физики наноразмерных тонкопленочных материалов, так и разрабатывающих на их основе функциональные устройства и приборы: Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Институт общей физики им. А. М. Прохорова (Москва), Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону), Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН (Красноярск), Томский государственный университет. Сибирский федеральный университет (Красноярск), Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург), Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Санкт-Петербургский государственный университет.

Общий вывод. Диссертация Е.В. Кудюкова представляет собой завершённую работу, в которой установлены новые физические закономерности, разработаны технологические подходы получения наноструктур с высокими функциональными характеристиками и созданы новые магниточувствительные материалы с тенземагниторезистивным эффектом, перспективные для практических применений.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Профиль диссертации соответствует формуле специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Диссертационная работа «*Магнетизм плёнок типа R-T (R=Gd,Tb,Dy; T=Co,Fe) и прикладные свойства плёночных нанокмозитов на их основе*», полностью соответствует всем требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор, Егор Владимирович Кудюков, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Заведующий кафедрой общей физики,
доктор физ.-мат. наук, профессор

/Г.С. Патрин/

« 7 » июня 2022 г.

660041, г. Красноярск, проспект Свободный, 79,
Сибирский федеральный университет
Тел.: 8(391)2062113
E-mail: patrin@iph.krasn.ru

ФГАБУ ВО СФУ	
Подпись	<i>Патрин</i>
Делопроизводитель	<i>Патрин</i>
« 07 »	06 20 22

