

## ОТЗЫВ

официального оппонента 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 работы**

Сплавы редкоземельных металлов ( $R$ ) с 3d-металлами ( $T$ ) являются перспективными объектами исследований в тонкопленочном состоянии. Большой интерес к данным системам обусловлен наличием в них ряда уникальных практически ориентированных свойств таких как высокий магнитный гистерезис, магнитострикция, магнитокалорический эффект и др. Изучение тонкопленочного состояния сплавов  $R-T$  также интересно с фундаментальной точки зрения, поскольку в них имеет место суперпозиция двух видов магнетизма – локализованного и коллективизированного. Актуальным также остается вопрос о влиянии размерного фактора и технологических условий на функциональные свойства тонких пленок. Другим актуальным аспектом является использование  $R-T$  слоев в многослойных функциональных структурах. К таковым, в частности, относятся среды с обменным смещением и композитные мультиферроики. Их физика относится к кругу быстро развивающихся мировых научных тематик. Вопросы и задачи, решаемые в данном диссертационном исследовании, несомненно лежат в рамках современных задач магнетизма.

### **Оценка проведенного исследования и полученных результатов**

Диссертация Кудюкова Е.В. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и содержит 189 страницу.

**Во введении** автором обоснована актуальность работы, отмечена ее теоретическая и практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту и приведены сведения об апробации работы.

**Первая глава** диссертации посвящена обзору литературы по магнитным и магнитоупругим свойствам различных сплавов тяжелых редкоземельных элементов с 3d-металлами, дано сравнение этих свойств в массивном и пленочном состояниях. Для тонких пленок типа  $R-T$  приводятся сведения о влиянии условий получения и термообработки на указанные свойства. Далее представлена подробная информация о композитных структурах, содержащих слои  $R-T$  сплавов, которые раскрывают их потенциал в составе функциональных сред, к которым относятся композитные мультиферроики и спин-вентильные структуры. В заключении к главе автор на основе анализа литературы сформулировал цель диссертационной работе.

**Во второй главе** представлены сведения о методиках получения образцов, их аттестации, а также методах измерения магнитных и



тензомагниторезистивных свойств однослойных и многослойных плёнок. Приводятся подробные сведения о структуре, толщине и режимах термообработки образцов. Для структурной характеристики образцов использовался рентгеноструктурный анализ, реализованный на современных установках Bruker D8 и PANalytical Empire. Для исследования магнитных свойств использовались высокоточные методики, реализованные на вибромагнетометре LakeShore VSM 7407, СКВИД магнетометре MPMS-XL7 и измерительном комплексе PPMS DynaCool 9T.

**Третья глава** диссертации содержит результаты исследования магнитных свойств и структурных характеристик тонких пленок бинарных систем типа  $R$ -Co, где в качестве редкоземельного элемента выбраны Gd, Dy и Tb. Для систем типа  $R_{100-x}Co_x$  определены концентрационные зависимости основных магнитных характеристик при широком варьировании концентрации ( $0 < x < 100$  ат.%). Приводится их анализ, основанный на особенностях структурного состояния и электронной структуры бинарных соединений. Для системы Gd-Co подробно рассмотрено явление спонтанного спин-переориентационного перехода. При помощи методов компьютерного моделирования получена фазовая диаграмма магнитных состояний в бинарной системе в координатах температура-состав.

**Четвертая глава** посвящена изучению эффекта обменного смещения в многослойных пленочных структурах, в которых  $R$ - $T$  слой может нести функцию как «закрепленного» так и «закрепляющего» элементов в зависимости от состава и выбранного редкоземельного металла. Для тройной системы FeNi/FeMn/Gd-Co получен ряд новых сведений о влиянии магнитной предыстории образца на обменное смещение. Также были найдены новые особенности температурного изменения обменного смещения при использовании состава Gd-Co с температурой компенсации близкой комнатной температуре. Далее приведены сведения о использовании слоя Tb-Co в качестве источника однонаправленной анизотропии. Показано, что путем введения различных прослоек и селективного отжига можно эффективно управлять величиной поля обменного смещения в структурах  $Fe_{10}Ni_{90}/Tb-Co$ , что позволяет оптимизировать данную структуру с перспективой практического использования.

**В пятой главе** представлены результаты исследований магнитных и тензомагниторезистивных свойств плёнок и пленочных структур на основе сплава Terfenol-D ( $Tb_{10}Dy_{23}Fe_{67}$ ). Продемонстрированы особенности влияния различных режимов термообработки однослойных пленок на их магнитную анизотропию. Для двухслойных структур  $Tb_{10}Dy_{23}Fe_{67}/Fe_{20}Ni_{80}$  найдены оптимальные условия термообработки, обеспечивающие реализацию достаточно высокого уровня тензомагниторезистивного эффекта.

### **Научная новизна и практическая значимость работы**

В диссертационной работе Кудюкова Е.В. представлен ряд новых и практически значимых научных результатов. Новизна полученных результатов отражена в следующих пунктах:



1. В работе впервые показано, что нанокристаллические пленки Gd характеризуются асперомагнитной структурой, наиболее вероятной причиной образования которой является фрустрация межатомных обменных связей, вызванная структурными искажениями.
2. Впервые построена фазовая диаграмма в координатах  $T$ - $x$  для аморфных пленок бинарной системы Gd-Co, позволяющая определить области реализации перпендикулярной анизотропии, «закритического состояния» и «тонкопленочного состояния».
3. Показана возможность управления знаком и величиной поля обменного смещения в трехслойной структуре FeNi/FeMn/Gd-Co посредством изменения магнитной предыстории данных структур. Также установлены новые особенности обменного смещения, к которым относятся инверсия полярности поля обменного смещения и скачкообразное изменение эффективности обменной связи на межслойном интерфейсе при переходе через температуру компенсации.
4. Впервые показана возможность реализации оптимальной величины поля смещения при низких значениях гистерезиса в системе Fe<sub>10</sub>Ni<sub>90</sub>/Tb<sub>27</sub>Co<sub>73</sub> с использованием ультратонкой Tb.
5. Для двухслойных систем типа Terfenol-D/Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub> впервые продемонстрирована реализация практически значимой величины тенземагниторезистивного эффекта.

Содержащийся в работе большой объем новых данных по особенностям обменного смещения и тенземагниторезистивному эффекту имеет существенную практическую значимость и может быть использован для разработки новых высокотехнологических устройств.

По диссертационной работе имеются ряд **вопросов и замечаний**:

1. В работе не приводится достаточного обоснования выбора толщин как для однослойных пленок R-Co так и для многослойных структур. При этом наблюдаемое в работе асперомагнитное состояние в пленках Gd и реализация перпендикулярной анизотропии в пленках Gd-Co могут существенно зависеть от данного параметра.
2. В главе 3 автором применяется формула Ланжевена для определения плотности пленки Gd, после чего данное значение используется для нахождения плотности пленок бинарной системы в предположении линейного изменения данной характеристики от состава. Вероятно, более правильным было бы определение плотности для всех составов, для которых возможно использование указанной формулы.
3. Наличие тенземагниторезистивного эффекта в композитах Tb<sub>10</sub>Dy<sub>23</sub>Fe<sub>67</sub>/Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub> связывается с магнитострикцией слоя Tb<sub>10</sub>Dy<sub>23</sub>Fe<sub>67</sub>. Однако в работе нет данных о величине константы магнитострикции в пленочных образцах. Производилась ли оценка константы магнитострикции Tb<sub>10</sub>Dy<sub>23</sub>Fe<sub>67</sub> в тонкопленочном состоянии?

4. В работе присутствуют ошибки и опечатки, например, на рисунке 3.8 должны быть указаны формулы 3.4 и 3.1 вместо 12 и 9 соответственно.

Отмеченные замечания в целом не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Кудюкова Е.В.

### **Общее заключение**

Полученные в диссертационной работе результаты опубликованы в 9 статьях, включенных в список ВАК и индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science. Работа прошла апробацию на нескольких международных и всероссийских конференциях с личным участием автора диссертации. Диссертационная работа написана хорошим научным языком, содержит новые фундаментальные и прикладные сведения, все методы и подходы используемые в ней являются обоснованными. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертации.

Профиль диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений. Диссертационная работа Кудюкова Е.В. удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней УрФУ, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автора заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

доцент,

профессор кафедры физики

конденсированного состояния

ФБОУ ВО «Челябинский

государственный университет»

Соколовский Владимир Владимирович

«16» июня 2022 г.

Контактная информация:

Тел: +7 (351) 799-71-17, e-mail: vsokolovsky84@mail.ru

454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129.

Подпись профессора кафедры физики конденсированного состояния  
ФБОУ ВО «Челябинский государственный университет»

В.В. Соколовского удостоверяю:

Специалист по кадрам  
В.И.Акутина

