

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Кудюкова Егора Владимировича «Магнетизм пленок типа R-T ($R=\text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}; T=\text{Co}, \text{Fe}$) 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

Магнетики со сложной спиновой структурой входят в число приоритетов современной научной повестки в области физики магнитных материалов. Их изучение расширяет круг знаний о магнетизме вообще и позволяет найти пути контролируемого изменения магнитных свойств, востребованных практикой, в частности, в таких актуальных сферах, как магнитомикроэлектроника, запись информации, спинтроника и др. Редкоземельные магнетики и сплавы на их основе в силу природных особенностей электронной структуры представляют собой благодатный объект для подобных исследований. Интерес к таким веществам, возникший во второй половине прошлого столетия, продолжает оставаться высоким, расширяясь в сторону искусственных структур с наномасштабными элементами, в том числе пригодных для использования в устройствах спинового транспорта. В этой связи диссертационная работа Е.В.Кудюкова, посвящённая изучению магнитных свойств плёнок и плёночных композитов, содержащих тяжёлые редкоземельные элементы в паре с металлами группы железа, и поиску вариантов их оптимального практического применения, представляется весьма **актуальной**.

Структура диссертационной работы является традиционной и включает введение, обзор литературы, методическую часть, три оригинальных главы и список использованных источников. Все эти составляющие работы объединены единой целью, сформулированной как «Детализация концентрационных особенностей магнетизма плёнок систем R-T ($R=\text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}; T=\text{Co}, \text{Fe}$) и на этой основе поиск новых сочетаний магнитных и сопутствующих им свойств, расширяющих потенциал применения таких плёнок в качестве функциональных сред». Таким образом, акценты делаются как на фундаментальной, так и на прикладной сторонах исследования. Для достижения поставленной цели автор решает ряд логически увязанных конкретных задач, среди которых получение объектов исследования, их структурная аттестация, прецизионное измерение и содержательный анализ магнитных свойств, сделанный, в том числе, с учётом их функциональной перспективы. При этом используются современное технологическое, аналитическое и измерительное оборудование, элементы компьютерного моделирования, привлекается большое количество специальных информационных источников. Всё это даёт уверенность в **достоверности** полученных результатов.

Содержание и результаты исследования, выполненного диссертантом, как уже отмечалось выше, отражены в трёх главах. Наиболее значимой по объёму и научной

составляющей является третья глава 3, посвящённая изучению закономерностей формирования магнитных свойств плёночных систем типа R-Co (R= Gd, Dy, Tb). В ней приводятся результаты сопоставительного изучения магнетизма двухкомпонентных систем, включающих редкоземельные ионы с разной структурой электронных орбиталей. При этом показано, что для нанокристаллических плёнок чистых R-металлов характерна асперомагнитная структура. Для ионов Tb и Dy, обладающих большим орбитальным моментом, это естественным образом связывается с дисперсией сильной магнитной анизотропии изотропного ансамбля нанокристаллов. Однако для Gd, который не несёт орбитального момента, необходима иная интерпретация явления. Версия диссертанта, связывающая впервые наблюдаемый асперомагнетизм Gd с неоднородностью межатомного s-f обменного взаимодействия, представляется вполне адекватной.

Отдельный интерес представляют результаты последовательного температурного изучения магнитных свойств плёнок $R_{100-x}Co_x$ в области $x < 50$, которые во многом являются новыми. В частности, показано, что Co в подобных объектах выступает аморфообразующим элементом. Переход в аморфное состояние сопровождается повышением структурной и фазовой однородности плёнок, усугубляющей фрустрированность магнитной структуры вплоть до того, что часть редкоземельных атомов не дают вклада в спонтанную намагниченность. Наряду с этим введение Co приводит к изменению электронной структуры и формированию гибридизированной 3d-5d подзоны, усиливающей магнетизм бинарной системы. Наличие этих противоположных тенденций ведёт к одинаковому по характеру (немонотонному с минимумом) изменению температуры Кюри для всех R, но по-разному сказывается на магнитном гистерезисе их основного состояния. На увеличение концентрации Co плёнки Gd-Co реагируют монотонным снижением коэрцитивной силы, в плёнках Dy-Co она изменяется немонотонно (с минимумом), а в плёнках Tb-Co монотонно возрастает. Такое отличие, вполне оправдано связывается со спецификой влияния ближайшего атомного окружения на магнитную анизотропию различных редкоземельных ионов.

Глава 4 содержит результаты изучения эффекта обменного смещения в слоистых плёночных структурах типа ферромагнетик/антиферромагнетик и ферромагнетик/ферримагнетик. Причём ферримагнитные слои R-Co выступают в них в двух качествах – закреплённого (Gd-Co), и закрепляющего (Tb-Co) элементов. Известно, что обменное смещение относится к числу важных свойств функциональных сред, ориентированных на техническое применение, и его изучение можно, в частности, оценить как один из аспектов практической значимости проведённого исследования. К числу новых проявлений межслойной обменной связи, установленных диссертантом, можно

отнести: инверсию полярности обменного смещения в области магнитной компенсации; пороговый характер изменения плотности энергии межслойной обменной связи на ферри/антиферромагнитном интерфейсе при переходе через температуру компенсации; возможность создания как однополярного, так и разнополярного вариантов смещения в двух закреплённых слоях трёхслойной ферри/антиферро/ферромагнитной структуры; количественную связь величины поля обменного смещения с шероховатостью ферри/ферромагнитного интерфейса.

В главе 5 представлены результаты исследования плёнок сплава Terfenol-D ($Tb_{10}Dy_{23}Fe_{67}$), который в массивном состоянии отличается уникально высокими магнитоупругими свойствами. Это исследование также имеет определённую **практическую направленность**, ориентированную в конечном счёте на композитные среды с магнитоэлектрическим эффектом. Главная задача, которую решал диссертант состояла в реализации в плёнках оптимального структурно-фазового состояния, свойственного сплаву Terfenol-D. На этом пути были сделаны определённые положительные шаги. В частности, найдено, что плёнки, полученные на ненагретые подложки и на подложки, имеющие температуру выше $300^{\circ}C$, кардинально отличаются по характеру магнитной анизотропии, что, по-видимому, восходит к разным механизмам анизотропии. Кроме того, определены условия получения композитов, содержащих слой $Tb_{10}Dy_{23}Fe_{67}$, в которых наблюдается неплохой тенземагниторезистивный эффект. Тем не менее, проблему достижения высокой магнитострикции в плёнках типа Terfenol-D нельзя считать закрытой.

Подводя итог выполненному анализу, можно констатировать, что представленные в диссертации результаты отвечают принятым критериям **научной значимости, достоверности и новизны**. Но есть и недостатки. К их числу можно отнести следующее.

1. **Фундаментальный** аспект работы в части общности полученных результатов был бы значимей при вовлечении в круг исследования плёночных систем с лёгкими редкоземельными элементами.

2. Эффект обменного смещения ферромагнитного слоя Gd-Co исследован на трёхслойной структуре, содержащей кроме прочего и ферромагнитный слой пермаллоя, Далеко не всегда ясна его опосредованная роль в формировании гистерезисных свойств редкоземельносодержащего слоя.

3. Для плёнок сплава Terfenol-D не решён вопрос о получении однофазного кристаллического состояния с высоким уровнем магнитострикции.

Указанные замечания не являются принципиальными и, скорее, указывают некоторые направления возможного развития данной тематики.

В целом, считаю, что работа Кудюкова Е.В. представляет собой самостоятельное законченное исследование, в котором содержится решение важной научной задачи, расширяющее знания о магнетизме плёнок с редкоземельными элементами и об их функциональных свойствах в составе плёночных композитов. Работа хорошо апробирована в периодической печати и на научных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и представленные в ней выводы. Профиль диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений, а сама работа по своему научному уровню, значению и достоверности результатов полностью соответствует требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор Кудюков Егор Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования физико-химических процессов в многофазных средах ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», доктор физико-математических наук, профессор _____ Зубарев Андрей Юрьевич

«14» июня 2022 г.

620002. Г.Екатеринбург, ул.Мира,19.

Подпись: *Зубарева А.Ю.*
Заверяю: вед. документовед
Зубарева А.Ю.

