

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Кудюков Егор Владимирович

**МАГНЕТИЗМ ПЛЕНОК ТИПА R-T (R=Gd,Tb,Dy;T=Co,Fe) И ПРИКЛАДНЫЕ
СВОЙСТВА ПЛЕНОЧНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

1.3.12. Физика магнитных явлений

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена на кафедре магнетизма и магнитных наноматериалов Института естественных наук и математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Васьковский Владимир Олегович,

Официальные оппоненты: **Зубарев Андрей Юрьевич,**
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
(г. Екатеринбург), главный научный сотрудник
лаборатории математического моделирования физико-
химических процессов в многофазных средах;

Патрин Геннадий Семёнович,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (г.
Красноярск), заведующий кафедрой общей физики;

Соколовский Владимир Владимирович,
доктор физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Челябинский государственный университет»
(г. Челябинск), профессор кафедры физики
конденсированного состояния.

Защита состоится «30» июня 2022 года в 11.00 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 1.3.04.16 по адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, комн. 248 (зал заседаний диссертационного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3589>.

Автореферат разослан «27 » мая 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, доцент



Овчинников А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Сплавы редкоземельных металлов (R) с металлами группы железа (T), благодаря уникальному сочетанию локализованного и коллективизированного магнетизма компонентов, являются носителями ряда экстремальных свойств, определяющих повышенный исследовательский интерес к данным объектам. Важными составляющими этого интереса являются R-T плёнки, несущие технологическую и размерную специфику формирования магнитных свойств. Среди них плёночные структуры с неоднородным распределением намагниченности, такие как гелимагнетики, сперомагнетики и асперомагнетики. Понимание особенностей и механизмов образования подобных структур важно для развития перспективных научно-технических направлений, в частности, хиральной спинтроники [1,2].

Наряду с этим, в R-T сплавах и плёнках на их основе реализуется высокий уровень свойств, имеющих прикладное значение для традиционной магнитомикроэлектроники: магнитострикция, колоссальное магнитосопротивление, магнитокалорический эффект и др. Так, например, магнитострикционные редкоземельносодержащие плёнки интересны для разработки композитных сред, в частности, композитных мультиферроиков [3]. Важным требованием к дизайну магнитострикционных элементов таких структур является достижение минимальной коэрцитивной силы H_c при максимальной константе магнитострикции λ_s . Одним из наиболее эффективных магнитострикционных материалов является сплав Terfenol-D ($Tb_{10}Dy_{23}Fe_{67}$), обладающий гигантскими значениями магнитострикции ($\lambda_s \sim 1060$ ppm) при комнатной температуре, что почти на два порядка больше чем в широко используемом сплаве типа Finemet ($\lambda_s \sim 25$ ppm). Хотя данный сплав обладает большим значением H_c в массивном состоянии, использование тонкопленочной технологии позволяет аморфизировать его и посредством дальнейшей термомагнитной обработки контролировать микроструктуру и фазовый состав пленочных образцов, что открывает широкий потенциал для оптимизации функциональных характеристик данного сплава. Такие магнитострикционные плёнки имеют перспективы использования и в композитных структурах с тенземагниторезистивным эффектом (ТМР), в которых ТМР-чувствительность во многом зависит от величины константы магнитострикции.

Другой прикладной потенциал сплавов типа R-T в пленочном состоянии лежит в области многослойных пленок с обменным смещением, в которых редкоземельносодержащий слой может выступать в качестве «закрепляющего» слоя [4] или «закрепленного» слоя. В первом случае определенные перспективы имеют ферромагнитные пленки Tb-Co, обладающие высоким значением коэрцитивной

силы H_c (~ 2 кЭ), позволяющим реализовать однонаправленную магнитную анизотропию в функциональном слое. При этом в качестве материала такого функционального слоя целесообразно рассмотреть сплав $Fe_{10}Ni_{90}$, который обладает максимальным эффектом анизотропии магнитосопротивления в системе Fe-Ni, но имеет повышенную H_c в сравнении с традиционным сплавом $Fe_{20}Ni_{80}$. Интересно, что обменное «закрепление» на слое Tb-Co позволяет существенно снизить гистерезис функционального слоя [4]. В то же время для структур типа $Fe_{10}Ni_{90}/Tb-Co$ остро стоит задача оптимизации величины и температурной стабильности поля обменного смещения H_{eb} . Решение данной проблемы можно искать в части модификации межслойного интерфейса, например, путем введения ультратонкой прослойки с различными магнитными свойствами или селективного отжига слоя $Fe_{10}Ni_{90}$.

Иной функционал можно связывать с системой Gd-Co, которая в силу низкого магнитного гистерезиса представляет интерес как материал «закреплённого» слоя в структурах типа $FeMn/(Gd-Co)$. Можно ожидать, что специфика магнетизма аморфного слоя Gd-Co, выражающаяся, в частности, в наличии состояния магнитной компенсации и спиновой переориентации, расширит функциональность «закреплённого» слоя.

Степень разработанности темы исследований

Магнитные свойства тонких пленок типа R-T изучаются уже на протяжении более четырёх десятков лет. При этом основное внимание было уделено T-обогащенным составам, проявляющим интересные прикладные свойства при комнатной температуре [5]. Однако область R-обогащенных составов является не менее интересной с точки зрения реализации в ней неколлинеарных магнитных структур. В настоящий момент в научной литературе явно не хватает работ, на систематической основе раскрывающих фундаментальные аспекты формирования магнитных свойств в пленочных системах типа R-T, обогащенных R-элементом. Также большинство работ в данной области посвящены изучению одной бинарной композиции [6-8]. Отсюда вытекает потребность в сопоставительном изучении магнитных свойств пленок R-T, в том числе комбинаций тяжелых редкоземельных элементов с кобальтом в широких концентрационных диапазонах.

Одним из направлений практического приложения ферромагнитных R-Co плёнок являются слоистые структуры с обменным смещением. Такого рода среды активно изучаются в варианте с использованием антиферромагнитного слоя в качестве «закрепляющего». Структуры с использованием ферромагнитного слоя в качестве «закреплённого» или «закрепляющего» исследованы в гораздо меньшей степени, хотя могут иметь ряд функциональных преимуществ. В частности,

использование высокоанизотропного ферромагнитного слоя для обменного «закрепления» позволяет существенно снизить гистерезис в функциональном слое, что обуславливает интерес к дальнейшему изучению и оптимизации функциональных свойств таких структур. Еще одним вопросом, представляющим научный и практический интерес, является формирование обменного смещения в трехслойной структуре типа ферромагнетик/антиферромагнетик/ферромагнетик. В рамках такой комбинации, благодаря широкой вариативности магнитной структуры ферромагнитной составляющей можно ожидать специфические особенности эффекта смещения, которые будут иметь потенциал функционализации.

Слоистые обменно-связанные композиты, включающие редкоземельносодержащие магнитострикционные слои, могут рассматриваться как носители тензотензорезистивного эффекта – суперпозиции магнитострикции и анизотропии магнитосопротивления (АМС), являющегося функциональной основой для сенсоров деформации, способных конкурировать с известными полупроводниковыми сенсорными элементами. На данный момент в литературе имеется всего несколько работ на данную тему, в том числе выполненных с участием автора [9,10]. Так, например, показана возможность регистрации деформации с помощью плёночных элементов $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}$. Однако величина магнитострикции данного сплава невелика (~ 20 ppm) в сравнении с редкоземельными сплавами, обладающих гигантскими значениями магнитострикции (~ 1600 ppm). Редкоземельные сплавы вообще не обладают или обладают малыми значениями АМС эффекта. Таким образом, перспективным направлением исследований является комбинация двух данных эффектов в многослойных обменно-связанных структурах.

Цель диссертационного исследования

Целью работы является 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 реализаций магнитных и сопутствующих им свойств, расширяющих потенциал применения таких плёнок в качестве функциональных сред.

В соответствие с заявленной целью в работе были поставлены следующие конкретные задачи:

1. Получить объекты исследования – тонкие пленки систем R-Co в широком диапазоне концентраций R-элемента, а также многослойные пленки на их основе, обладающие эффектом обменного смещения и тензотензорезистивным эффектом.
2. Установить общие закономерности и специфику формирования магнитных свойств и структурного состояния пленок типа R-Co ($R=\text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$) разного состава в условиях широкого варьирования температуры и магнитных полей.

3. Определить особенности «обменного закрепления» слоя Gd-Co в структуре типа FeNi/FeMn/(Gd-Co) вблизи состояния магнитной компенсации и при варьировании магнитной предыстории образцов.
4. На примере плёночной структуры Fe₁₀Ni₉₀/Tb₂₇Co₇₃ определить возможности варьирования эффективности межслойной обменной связи за счёт селективного отжига слоя Fe₁₀Ni₉₀ и путём введения ультратонких прослоек различных металлов (Fe, Ni, Ti, Tb).
5. Дать сравнительную характеристику магнитных свойств и структурного состояния пленок состава Terfenol-D (Tb₁₀Dy₂₃Fe₆₇), подвергнутых термомагнитной обработке и нанесенных на нагретую подложку. Выявить условия формирования тензوماгниторезистивного эффекта в структурах типа Fe₂₀Ni₈₀/Tb₁₀Dy₂₃Fe₆₇.

Научная новизна работы

В рамках единого эксперимента дана обобщающая сопоставительная характеристика магнитных свойств нанокристаллических и аморфных пленок типа R-Co (R=Gd, Dy, Tb), охватывающая практически весь концентрационный диапазон бинарных систем.

Впервые показано, что основному состоянию нанокристаллических пленок Gd, полученных методом ионного распыления, отвечает асперомагнитное упорядочение, которое, вероятно, обусловлено суперпозицией свойств ферромагнитной и сперомагнитной фаз. Для широкой концентрационной области продемонстрирована возможность выделения в спонтанной намагниченности подрешеточных вкладов Gd и Co.

Впервые для аморфных плёнок системы Gd-Co, полученных методом ионного распыления, построена фазовая диаграмма, которая в координатах температура-состав устанавливает области существования перпендикулярной анизотропии, «закритического» и «тонкоплёночного» состояний.

Впервые показано, что в рамках трёхслойных плёночных структур ферромагнетик/антиферромагнетик/ферримагнетик возможна реализация новых особенностей эффекта обменного смещения, заключающихся в инверсии полярности обменного смещения в области магнитной компенсации и разнополярном смещении ферромагнитного и ферримагнитного слоёв.

Впервые продемонстрирована возможность эффективной оптимизации поля обменного смещения в системе Tb₂₇Co₇₃/Fe₁₀Ni₉₀ путем введения ультратонкой межслойной прослойки Tb, позволяющей добиться технически ориентированных величин поля смещения при сохранении предельно низкого гистерезиса в функциональном слое Fe₁₀Ni₉₀.

Впервые в рамках единого сопоставительно эксперимента на плёнках $\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}$ подтверждено существование двух разных структурных источников перпендикулярной магнитной анизотропии, к которым могут относиться столбчатая микроструктура в плёнках, осаждённых на ненагретую подложку, и совокупность высокоанизотропных текстурированных кластеров в плёнках, осаждённых на подложку, нагретую до температуры более 300°C .

В двухслойной плёночной структуре $\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ реализован тенземагниторезистивный эффект, величина которого свидетельствует о функциональной перспективности подобной среды.

Теоретическая и практическая значимость работы

В работе на систематической основе представлена развёрнутая характеристика магнитных свойств нанокристаллических и аморфных пленок систем R-Co ($\text{R}=\text{Gd}, \text{Dy}, \text{Tb}$), которая несёт дополнительную информацию о магнетизме подобных систем и имеет фундаментальную значимость для таких сфер применения магнитных материалов, как магнитомикроэлектроника, спинтроника, магнитокалорика, постоянные магниты, магнотрикционные материалы. Концентрационные зависимости ряда магнитных характеристик и методики их получения могут использоваться при анализе свойств других R-T систем.

Продемонстрирована возможность применения редкоземельносодержащих слоёв в обменно-связанных слоистых структурах различной функциональности. К ним, в частности, относятся среды с обменным смещением, в которых R-Co слои выступают в качестве «закреплённых» или «закрепляющих» элементов с расширенной вариативностью свойств. Кроме того, показано, что подобные структуры могут являться носителями практически значимого тенземагниторезистивного эффекта.

Положения, выносимые на защиту

1. В нанокристаллических пленках Gd возможна реализация асперомагнитного состояния, которое трактуется как суперпозиция ферромагнитной и сперомагнитной фаз.

2. Концентрационное изменение свойств систем R-Co при отсутствии магнитного момента на Co определяется двумя противоположными тенденциями, к которым относятся понижение эффективности косвенного d-f и s-f обмена при аморфизации и усиление f-d обменного взаимодействия за счет увеличения плотности носителей в гибридизированной 3d-5d подзоне.

3. Ферримагнетизм слоя Gd-Co позволяет оказывать специфическое влияние на его обменное смещение в составе структуры FeNi/FeMn/Gd-Co путём изменения

магнитной предыстории или температуры вблизи состояния магнитной компенсации.

4. Перпендикулярная анизотропия в плёнках $\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}$ может иметь два источника: столбчатую микроструктуру в плёнках, нанесённых на ненагретую подложку, или специфическую атомную текстуру в плёнках, осаждённых на подложку, нагретую до температуры 300°C и выше.

5. В плёночной структуре $\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ при условии селективного отжига редкоземельносодержащего слоя реализуется практически значимый тенземагниторезистивный эффект.

Степень достоверности и апробация результатов

Пленочные образцы, являющиеся предметом данной работы, получены при помощи современных технологий напыления. Измерение свойств плёнок, выполнено на высокоточном измерительном оборудовании ведущих мировых производителей. Составными частями оригинальных установок, используемых в данной работе, также являлись высокоточные измерительные приборы. При обсуждении и интерпретации результатов работы использовались теоретические модели, признанные научным сообществом. Компьютерное моделирование осуществлялось в широко используемом программном пакете Comsol Multiphysics.

Результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых международных изданиях и представлены на конференциях международного и всероссийского уровней: Moscow International Symposium on Magnetism MISM (2017, Москва), Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации» ФТИ (2017, 2018, 2019, Екатеринбург), Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества СПФКС (2016 – 2019, Екатеринбург), Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных (2016, Ростов-на-Дону, 2017, Екатеринбург), VII Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism» (2019, Екатеринбург), XXIII Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (2018, Москва, Россия), 8th Baikal International Conference «Magnetic materials. New technologies» (2018, Иркутск, Россия).

Личный вклад автора

Автором диссертации совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. Васьковским В.О. сформулирована тема диссертации, определены цели и задачи работы, выбраны методики исследования. Диссертантом совместно с к.ф.-м.н. Балымовым К.Г. получены пленочные структуры пленок сплавов R-Co ($\text{R}=\text{Gd}, \text{Dy}, \text{Tb}$) а также пленок $\text{Tb}_{27}\text{Co}_{73}/\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}$ с различными прослойками методом

высокочастотного ионно-плазменного напыления. Автором работы выполнены измерения магнитных свойств исследуемых объектов на вибрационном магнитометре LakeShore VSM 7407, а совместно с аспирантом Фещенко А.А. проведены измерения их тензомагниторезистивных свойств. Автором работы выполнена обработка всех экспериментальных данных и, в том числе построена компьютерная модель и проведено моделирование температурной зависимости спонтанной намагниченности в системах R-Co. Автор принимал непосредственное участие в анализе полученных результатов и подготовке всех научных публикаций по теме диссертации.

Публикации

Основное содержание диссертации изложено в 9 научных работах индексируемых в базах данных Scopus и WoS.

Благодарности Автор диссертации глубоко и искренне благодарен своему научному руководителю Васьковскому Владимиру Олеговичу. Автор признателен Балымову Константину Геннадьевичу за помощь. Автор благодарен сотрудникам КММН и ОМТТ УрФУ за поддержку и помощь в ходе работы над диссертацией.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав, заключения, списка использованных обозначений и сокращений, списков литературы и публикаций по теме диссертации, и содержит 188 страниц, 83 рисунка, 2 таблицы. Список использованных источников насчитывает 191 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и новизна диссертационной работы, определены цель и задачи работы, сформулированы основные положения выносимые на защиту, приведены методология и методы исследования, используемые в работе, отражена новизна работы и ее практическая и теоретическая значимость, приведены сведения о достоверности результатов исследований, представлена информация о публикациях по теме работы и личном вкладе автора, приведены структура и объем работы.

Первая глава содержит обзор литературы по тематике диссертационной работы. В первом параграфе данной главы представлены сведения о магнитных свойствах пленок тяжелых редкоземельных металлов и сплавов типа R-T, а также о их связях с параметрами напыления, толщиной и режимами термомагнитной обработки. Далее рассмотрены магнитоупругие свойства сплавов R-T, демонстрирующих гигантские значения магнитострикции, а также особенности этих свойств в тонкопленочном состоянии. В последнем параграфе данной главы

приведены сведения о функциональных свойствах композитных структур, содержащих R-T слои.

Во второй главе представлены сведения о методиках получения пленочных образцов, исследования их структурных характеристик, магнитных и тенземагниторезистивных свойств. Общие закономерности и специфика формирования магнитных свойств исследовались в пленках $R_x\text{Co}_{100-x}$ (110 нм)/Ta(5 нм) ($R=\text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$), полученных методом высокочастотного ионно-плазменного напыления на установке УРМЗ-014 на стеклянных подложках Corning ($22 \times 22 \times 0.2 \text{ мм}^3$) в диапазоне $0 \leq x < 100$ ат.% с шагом 10 ат.%. Особенности эффекта обменного смещения исследовались в двух типах структур: 1) Ta(5 нм)/FeNi(5 нм)/FeMn(20 нм)/ $\text{Gd}_x\text{Co}_{100-x}$ (40 нм) с $15 \leq x \leq 25$, полученных методом магнетронного напыления.; 2) $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}$ (50 нм) /M(0-3 нм)/ $\text{Tb}_{27}\text{Co}_{73}$ (110 нм) с $M=\text{Ti}, \text{Ni}, \text{Fe}, \text{Tb}$, полученных методом ионно-плазменного напыления на установке УРМЗ-014. Селективный отжиг слоя $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}$ проводился в вакууме в течение 1 ч, в диапазоне температур 100-500°C. Оба типа структур также наносились на стеклянные подложки Corning. Магнитные и тенземагниторезистивные свойства исследовались на сериях пленок Terfenol-D ($\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}$ (110 нм)) и Terfenol-D(110 нм)/ $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ (50 нм), полученных на установке магнетронного распыления Orion-8. Пленки в обеих сериях подвергались отжигу температурах от 300 до 500°C с шагом 50°C. Отжиг всех образцов производился в течение 1 ч в вакууме при давлении не более $1 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. Кроме того, получена серия пленок аналогичного состава, нанесенных на подложки нагретые до температур от 300 до 500°C с шагом 50°C.

Толщина всех пленок определялась на стилусном профилометре Veeco Dektak-150. Состав пленочных образцов контролировался при помощи рентгенофлуоресцентного анализа на установке Rigaku Nanohunter. Также для определения химического состава использовался электронный сканирующий микроскоп Carl Zeiss NTC Merlin. Для исследования структурных характеристик применялся рентгеноструктурный анализ (РСА), реализованный на установках PANalytical Empire в излучении Co- K_α и Bruker D8 в излучении Cu- K_α .

Для измерения магнитных свойств и их температурных зависимостей использовались несколько высокоточных современных установок, таких как вибрационный магнитометр LakeShore VSM 7407, СКВИД-магнитометр MPMS-XL7 и измерительный комплекс PPMS DynaCool 9T с опцией вибромагнитометра.

Тенземагниторезистивные свойства двухслойных пленок Terfenol-D/ $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ измерялись при помощи четырехзондового метода в магнитном поле до 200 Э. Исследуемые образцы имели форму полосок $14 \times 2 \text{ мм}^2$. Деформация образцов

осуществлялась методом контролируемого прогиба. Стрела прогиба измерялась с использованием микрометрического транслятора.

В рамках данной работы для модельной интерпретации экспериментальных данных использовался программный пакет мультифизического моделирования Comsol Multiphysics. Для наших задач применялся математический модуль, с помощью которого в рамках теории молекулярного поля было реализовано моделирование зависимостей $M(T)$ для пленок систем типа R-Co.

Третья глава посвящена сопоставительному систематическому изучению закономерностей формирования магнитных свойств и в первую очередь магнитной структуры пленочных систем типа R-Co, где R=Gd,Tb,Dy в широких диапазонах концентраций, температуры и магнитного поля.

Структурные особенности пленок R-Co. В работе показано, что пленкам чистых редкоземельных металлов свойственна нанокристаллическая структура с решеткой типа ГПУ, и наблюдаются её искажения (растяжение), которые нарастают в ряду Tb,Dy,Gd. Кроме того, использование модифицированной формулы Ланжевена $\frac{1}{\chi} = \frac{3k(T-T_C)}{N_{Gd} \langle \mu_{Gd} \rangle^2}$ позволило косвенным образом определить наличие в плёнках значительного свободного объёма (до 10%). Для плёнок бинарных систем $R_{100-x}Co_x$ характерно рентгеноаморфное состояние, которое возникает при концентрации Co более 10 ат.% и сохраняется вплоть до 90 ат.% Co (Рисунок 1).

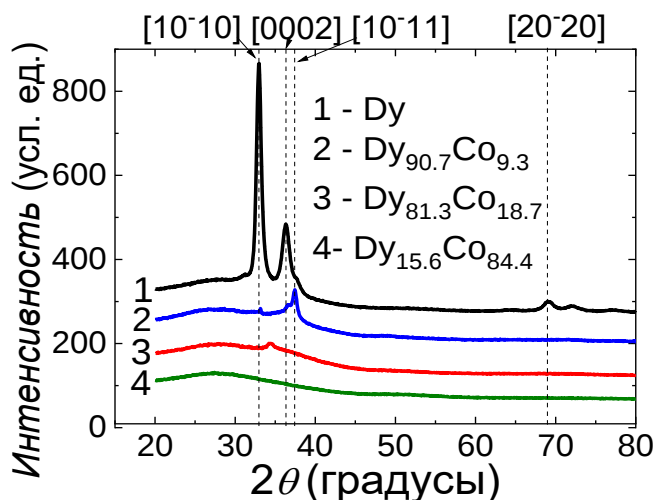


Рисунок 1. Дифрактограммы пленок Dy-Co, являющиеся типичными для систем R-T.

Магнитные свойства пленок R-Co. Система $Gd_{100-x}Co_x$. Анализ петель гистерезиса при низких температурах позволил заключить, что пленки Gd находятся в асперомагнитном состоянии (Рисунок 2а, кривая 1), о чем свидетельствуют низкое значение остаточной намагниченности M_r (~250 Гс) и наличие большой высокополевой восприимчивости. Максимальная намагниченность $M_{max} = 1300$ Гс в поле 70 кЭ также остается много меньше табличного значения спонтанной намагниченности основного состояния Gd. Высказано предположение, что формирование асперомагнитной структуры в пленках Gd связано с указанными выше особенностями структурного состояния, которые обуславливают высокую дисперсию межатомного обменного взаимодействия. В случае Gd асперомагнитная

структура может быть следствием суперпозиции магнетизма ферромагнитной и сперомагнитной фаз.

Далее в работе показано, что переход в аморфное состояние, при добавлении Co, сопровождается повышением структурной и фазовой однородности плёнок, усугубляющей фрустрированность магнитной структуры вплоть до того, что часть атомов Gd 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. В концентрационной области $x < 50$ наличие этих противоположных тенденций ведёт к немоному изменению температуры Кюри (Рисунок 2б).

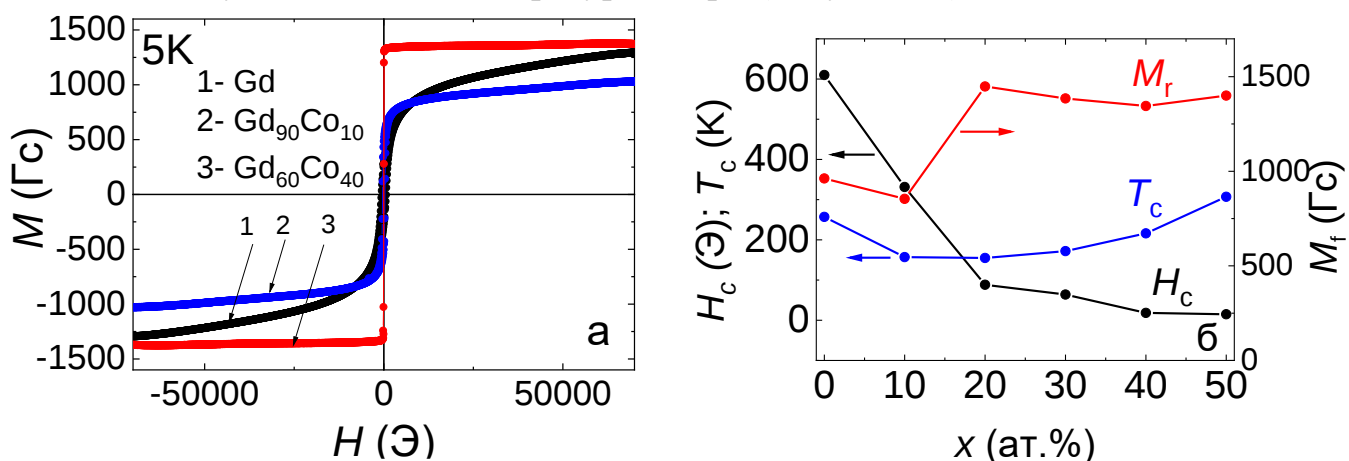


Рисунок 2. а) Примеры петель гистерезиса пленок Gd-Co, измеренных при 5K; б) концентрационные зависимости температуры Кюри T_c , остаточной намагниченности M_r и коэрцитивной силы H_c пленок Gd-Co.

В работе показано, что в области составов $x > 50$ аморфным плёнкам Gd-Co свойственно ферромагнитное упорядочение, в рамках которого реализуются немоные концентрационные (Рисунок 3) и температурные зависимости спонтанной намагниченности и, в частности, состояние магнитной компенсации. Вблизи магнитной компенсации из-за низкой спонтанной намагниченности в плёнках проявляется перпендикулярная магнитная анизотропия, источником которой, по-видимому, является столбчатая микроструктура. Особое внимание было уделено спонтанным спин-ориентационным переходам от планарной к перпендикулярной анизотропии в пленках Gd-Co. В частности, установлено, что спонтанные спин-ориентационные переходы между плоскостной и перпендикулярной ориентациями намагниченности

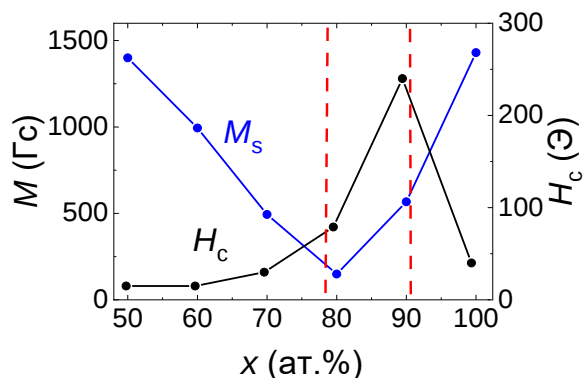


Рисунок 3. Концентрационные зависимости M_s и H_c пленок Gd-Co.

(Рисунок 4а) происходят через образование промежуточного «закритического» магнитного состояния (Рисунок 4б), которое реализуется, в том числе, в форме мелкодисперсной системы доменов с неколлинеарной взаимной ориентацией магнитных моментов, и присутствует в определённых температурных интервалах, зависящих от состава плёнок.

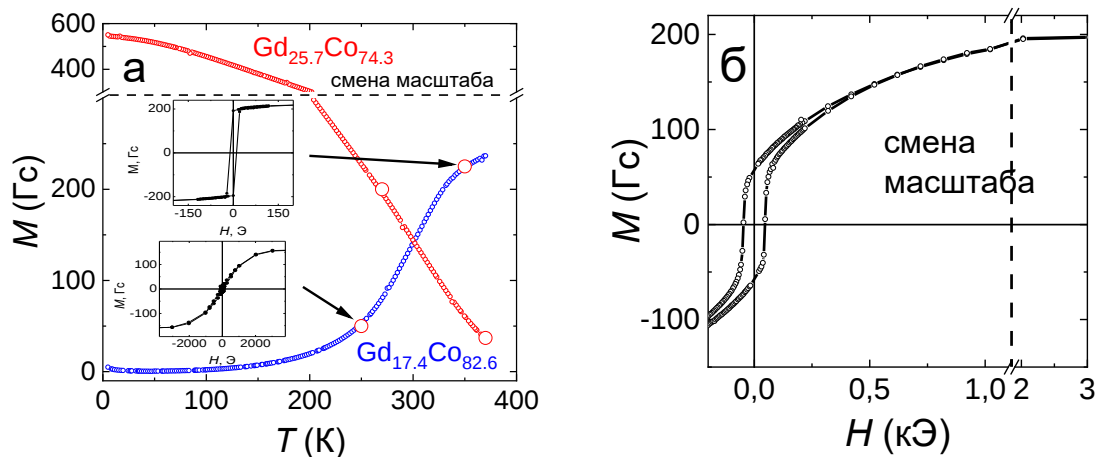


Рисунок 4. а) Температурные зависимости намагниченности, измеренные в плоскости плёнок Gd-Co разного состава, иллюстрирующие спин-ориентационные переходы; б) «закритическая» петля гистерезиса в пленке $\text{Gd}_{17.4}\text{Co}_{82.6}$.

Основываясь на полученных экспериментальных данных и модели молекулярного поля, успешно применяемой для описания спонтанной намагниченности в ферримагнитной структуре Gd-Co, нами проведена оценка концентрационных изменений температурного интервала существования «закритического состояния» в форме фазовой T - x диаграммы (рисунок 5). Основой для построения T - x диаграммы является достаточно подробный концентрационный набор зависимостей $M_s(T)$, полученный расчетным путем в программном пакете COMSOL Multiphysics. Полученная T - x диаграмма определяет условия существования четырёх различных фаз: 1 – состояние с перпендикулярной анизотропией; 2 – «закритическое состояние»; 3 – состояние со строго планарной ориентацией намагниченности, которое для краткости называют «тонкоплёночным состоянием»;

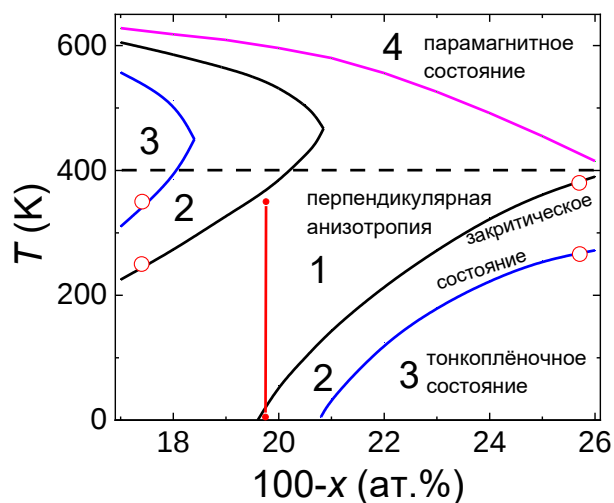


Рисунок 5. Диаграмма, определяющая условия реализации различных магнитных состояний в аморфных плёнках системы $\text{Gd}_{100-x}\text{Co}_x$. Штриховая линия показывает уровень предельных температур, использованных в эксперименте, кружки и вертикальная линия отображают экспериментальные данные.

4 – парамагнитное состояние. В целом полученная диаграмма представляется вполне адекватным описанием магнетизма системы Gd-Co, которое можно использовать при разработке сред с необходимой магнитной структурой

Системы $\text{Dy}_{100-x}\text{Co}_x$ и $\text{Tb}_{100-x}\text{Co}_x$.

Основным отличием данных систем от Gd-Co является наличие высокоанизотропных редкоземельных ионов. Установлено, что пленки Dy и Tb также имеют асперомагнитную структуру, о чем свидетельствуют петли гистерезиса при низких температурах (Рисунок 6). Однако, в данном случае асперомагнитная структура задается преимущественно сильной пространственной флуктуацией локальных осей легкого намагничивания. Добавление Co, и сопутствующая аморфизация в бинарных системах Dy-Co и Tb-Co имеет схожую специфику воздействия на изменение магнитных свойств, как и в системе Gd-Co. В то же время, в аморфном состоянии сохраняется сильная дисперсия локальных осей анизотропии, что приводит к сохранению асперомагнитного упорядочения вплоть до концентраций Co 50 ат.%, что наглядно иллюстрируется концентрационными зависимостями эффективного момента на атом редкоземельного металла (Рисунок 7). В концентрационной области $x < 50$ ат.%, схожим образом изменяются и концентрационные зависимости температуры Кюри. Однако, неодинаковым оказывается концентрационное изменение H_c основного состояния во всех трех рассмотренных системах.

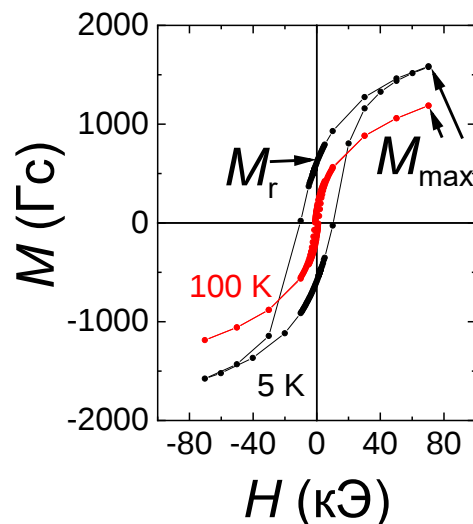


Рисунок 6. Примеры петель гистерезиса пленки Dy в асперомагнитном состоянии.

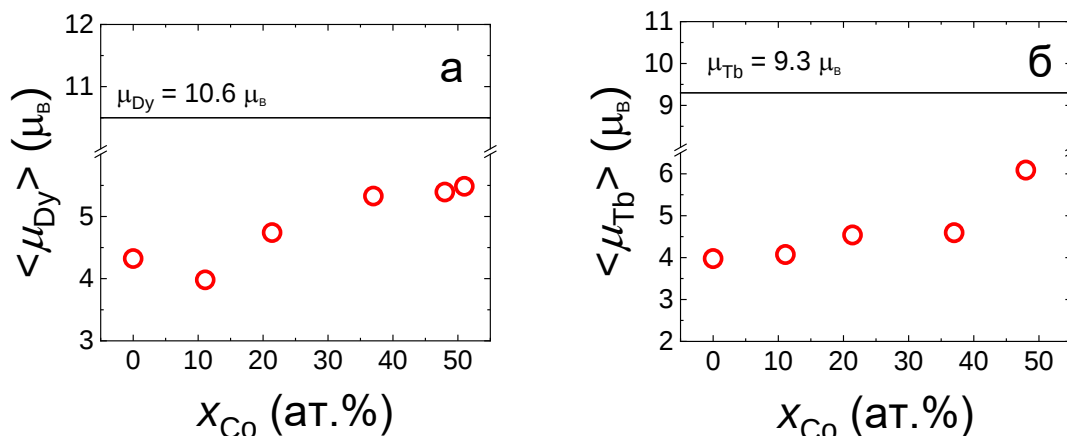


Рисунок 7. Концентрационные зависимости эффективного магнитного момента на R-атом в системе а) Dy-Co и б) Tb-Co.

На увеличение концентрации Co плёнки Gd-Co реагируют монотонным снижением коэрцитивной силы (Рисунок 2в), в плёнках Dy-Co она изменяется немонотонно (с минимумом) (Рисунок 8а), а в плёнках Tb-Co монотонно возрастает (Рисунок 8б). Такое отличие, по-видимому, является следствием специфики влияния ближайшего атомного окружения на магнитную анизотропию различных редкоземельных ионов.

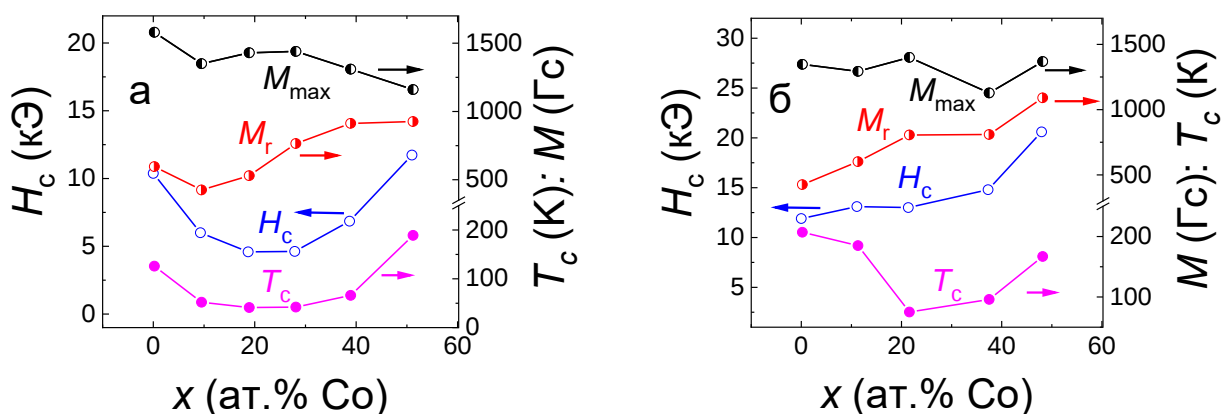


Рисунок 8. Концентрационные зависимости магнитных свойств пленок а) Dy-Co, б) Tb-Co.

При концентрациях $x > 50$, в системах Dy-Co и Tb-Co реализуется сперимагнитное упорядочение. Данным системам также характерны магнитная компенсация и перпендикулярная анизотропия. Кроме того, в работе показано, что модель молекулярного поля может быть успешно применена для описания $M_s(T)$ сперимагнитных систем.

Четвертая глава посвящена изучению особенностей обменного смещения в пленочных композитах, содержащих слои R-Co. Ферромагнетизм (сперимагнетизм) систем R-Co и кардинальные различия в анизотропии и гистерезисных свойствах плёнок Gd-Co и Tb-Co позволили рассматривать их в одном случае как

«закреплённый», а в другом случае как «закрепляющий» элементы плёночных структур с обменным смещением.

Влияние магнитной предыстории на обменное смещение в структуре FeNi/FeMn/(Gd-Co). Исследование закономерностей обменного закрепления

выполнено на трёхслойных ферро-/антиферро-/ферромагнитных плёнках типа $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{FeMn}/(\text{Gd-Co})$. При этом основное внимание было уделено роли магнитной предыстории, которая варьировалась путём низкотемпературной термической обработки (нагрев до 200°C) в магнитном поле различной ориентации и напряжённости. Среди прочего было установлено, что обменное смещение имеет место в обоих слоях, прилегающих к антиферромагнитному слою, причём формируется оно независимым образом и может быть как одинаковым, так и различным по знаку (Рисунок 9).

Специфика ферромагнитного

закреплённого слоя Gd-Co наиболее ярко выражена при магнитной компенсации, температурной локализацией которой можно управлять посредством состава. Вблизи температуры компенсации, в частности, происходит значительное увеличение поля обменного смещения H_{eb} и наблюдается инверсия его знака (Рисунок 10а). Эти закономерности связаны с уменьшением спонтанной намагниченности и перераспределением определяющего вклада в спонтанную намагниченность между гадолиниевой и кобальтовой подрешётками. Наряду с этим при температуре компенсации происходит скачкообразное изменение плотности энергии межслойной обменной связи (Рисунок 10б). Эта особенность связывается с фрустрированностью антиферромагнитного слоя, возникающей при перемагничивании всей плёночной структуры в состоянии с разной ориентацией магнитных моментов ферромагнитного и ферромагнитного слоёв.

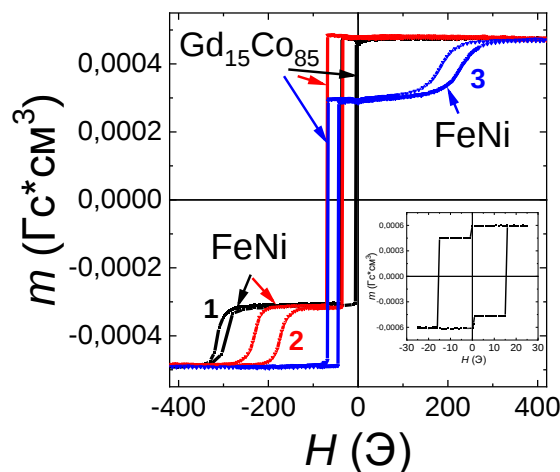


Рисунок 9. Петли гистерезиса пленки $\text{Gd}_{15}\text{Co}_{85}$, измеренные при комнатной температуре в исходном состоянии (1), после нагрева до 473 K и охлаждения в поле 500 Э (2) и -7 Э (3). На вставке изображена петля, измеренная при 473 K .

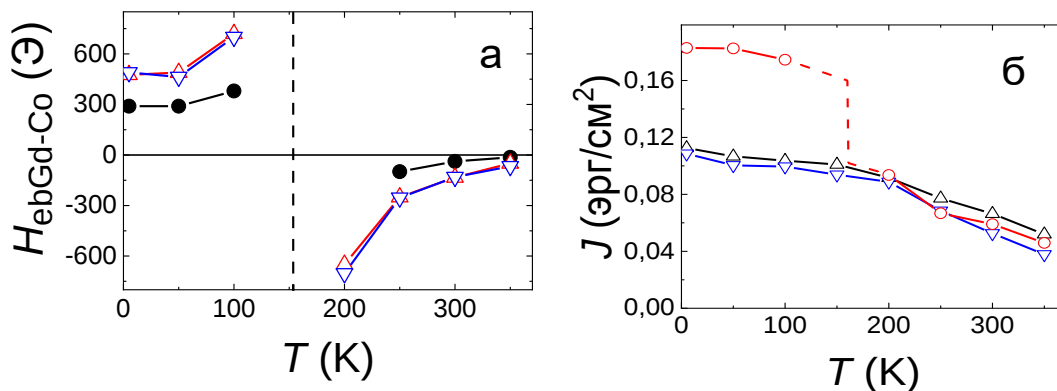


Рисунок 10. а) Температурные зависимости поля обменного смещения слоя $Gd_{18.7}Co_{81.3}$ в исходном состоянии (●); после нагрева и охлаждения при параллельной (Δ) и антипараллельной (∇) взаимных ориентациях намагниченностей слоев FeNi и GdCo; б) Температурные зависимости плотности энергии межслойного обменного взаимодействия на интерфейсе FeMn/Gd-Co для образцов с $Gd_{15}Co_{85}$ (Δ), $Gd_{25}Co_{75}$ (∇) и $Gd_{18.7}Co_{81.3}$ ($\circ$).

Особенности обменного смещения в структурах на основе закрепляющего слоя Tb-Co. Особенности обменного закрепления со стороны редкоземельносодержащего слоя исследованы на примере плёночной структуры $Fe_{10}Ni_{90}/Tb_{27}Co_{73}/Ti$. В частности, проанализировано влияние селективного отжига слоя $Fe_{10}Ni_{90}$ на эффективность межслойной обменной связи. Установлено, что термообработка приводит к немонотонному изменению поля обменного смещения, и в том числе к резкому возрастанию H_{eb} после отжига при температуре около 450°C (Рисунок 11а).

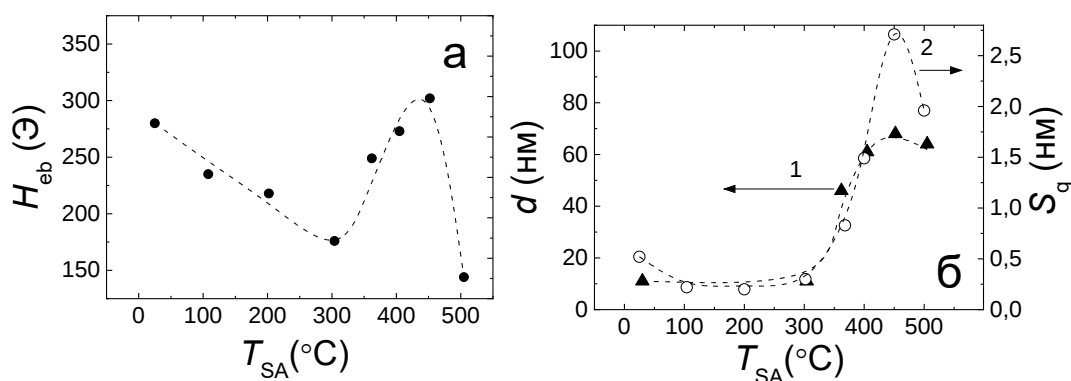


Рисунок 11. Зависимости поля H_{eb} (а), среднего размера зёрен d (б, кривая 1) и шероховатости S_q (б, кривая 2) от температуры отжига T_{SA} в пленках $Fe_{10}Ni_{90}/Tb_{27}Co_{73}$ (а) и однослойных $Fe_{10}Ni_{90}$ (б).

Представлены экспериментальные и расчётные данные, показывающие, что этот эффект связан с рекристаллизацией ферромагнитного слоя и соответственно с изменением площади реального контакта магнитных слоёв. Показано, что для количественного описания этой связи можно использовать экспериментальные данные по вариации шероховатости ферромагнитного слоя при отжиге (Рисунок 11б). Определены закономерности качественного и количественного изменения поля обменного смещения в структурах $Fe_{10}Ni_{90}/M/Tb_{27}Co_{73}/Ti$, где M – ультратонкая

прослойка различного состава (Ti, Tb, Ni, Fe). При этом показано, что Tb является наиболее подходящим материалом прослойки, обеспечивающим эффективное управление гистерезисными свойствами закреплённого слоя. Введение такой прослойки позволяет в зависимости от толщины в широких пределах и относительно плавно варьировать величину H_{eb} (Рисунок 12а). В том числе определены условия, при которых величины H_{eb} и H_c слоя $Fe_{10}Ni_{90}$ составляют около 50 Э и 1 Э соответственно (Рисунок 12б), а температура блокировки достигает 450 К. Этот уровень свойств представляет интерес в плане практического использования данных сред.

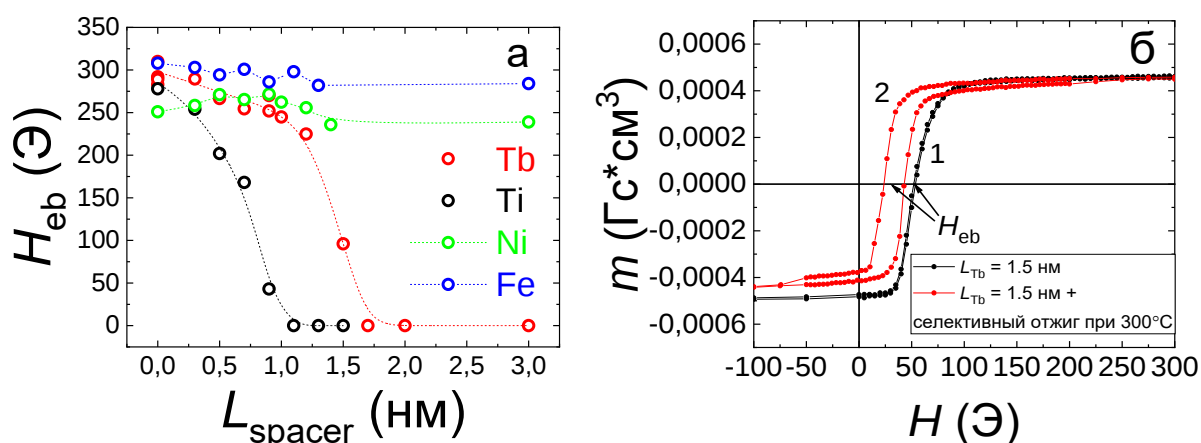


Рисунок 12. а) Зависимости поля обменного смещения слоя $Fe_{10}Ni_{90}$ от толщины прослойки в структурах типа $Tb_{27}Co_{73}/M/Fe_{10}Ni_{90}$, где $M = Tb, Ti, Ni$ и Fe . б) Частные петли гистерезиса слоя $Fe_{10}Ni_{90}$ в структуре $Fe_{10}Ni_{90}/Tb/Tb_{27}Co_{73}$ с толщиной прослойки Tb 1.5 нм 1 – без температурной обработки, 2 – с селективным отжигом слоя $Fe_{10}Ni_{90}$ при 300°C в течение 1 ч.

Пятая глава посвящена исследованию структуры, магнитных и тенземагниторезистивных свойств пленок $Tb_{10}Dy_{23}Fe_{67}$ (Terfenol-D) и $Tb_{10}Dy_{23}Fe_{67}/Fe_{20}Ni_{80}$. Сплав Terfenol-D является признанным магнитострикционным материалом. Однако реализация его функциональных возможностей в плёночном состоянии требует систематических исследований, некоторые результаты которых представлены в данной главе. При этом проводилась идея, что для получения оптимального сочетания магнитоупругих свойств и магнитного гистерезиса нужно отойти от аморфного состояния, которое свойственно R-T плёнкам, получаемым по технологии магнетронного распыления, к нанокристаллическому состоянию посредством отжига или использования нагретой подложки.

Структура и магнитные свойства пленок Terfenol-D. В ходе проведённых экспериментов показано, что отжиг при температурах вплоть до 500°C слабо влияет на структурное состояние плёнок Tb₁₀Dy₂₃Fe₆₇, оставляя его аморфным, но подавляет перпендикулярную магнитную анизотропию (Рисунок 13). Плёнки, полученные на нагретую подложку, напротив, демонстрируют наличие кристаллических фаз, которые можно идентифицировать как твёрдый раствор редкоземельных элементов с ГПУ структурой и ε-железо, также характеризующееся ГПУ кристаллической решёткой (Рисунок 14а). При этом перпендикулярная магнитная анизотропия сохраняется вплоть до температур подложки 500°C (Рисунок 14б). Это позволяет говорить о разных механизмах перпендикулярной анизотропии в плёнках, осаждённых на холодную или нагретую подложки. В первом случае — это столбчатая микроструктура, во втором — специфическая кристаллическая текстура [11].

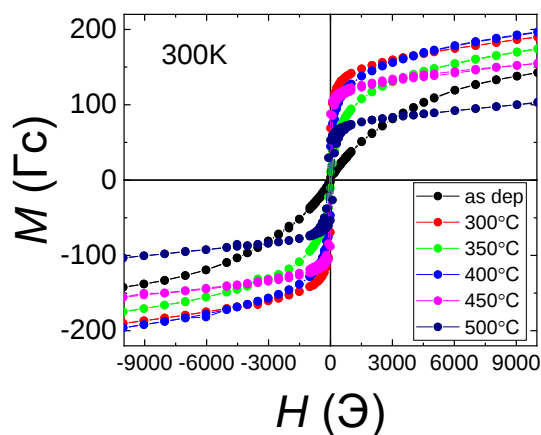


Рисунок 13. Петли гистерезиса отожженных пленок Terfenol-D измеренные в плоскости пленки.

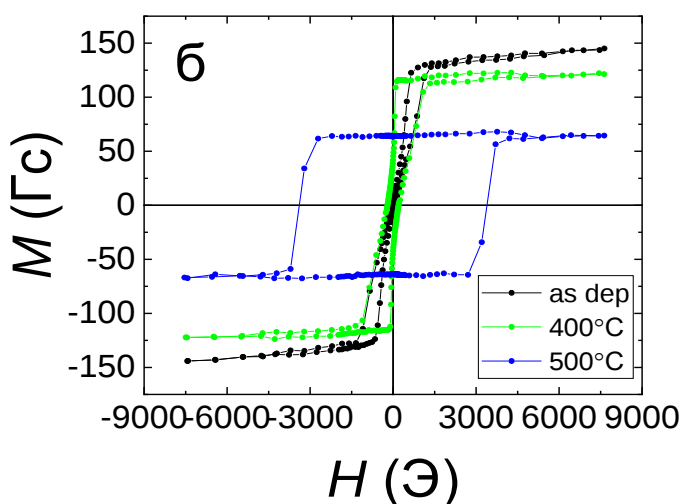
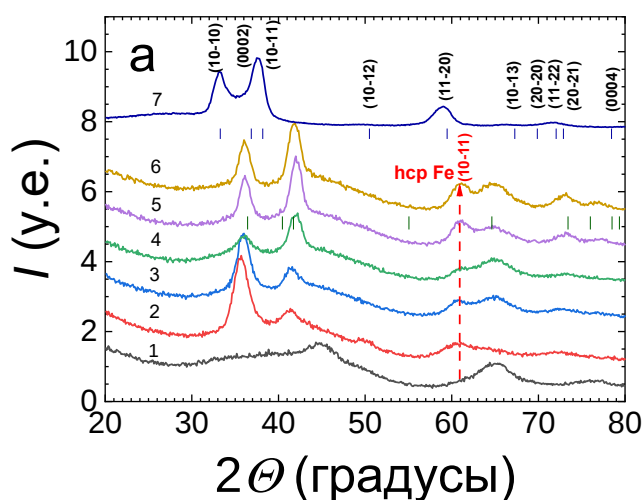


Рисунок 14. а) GIXRD рентгенограммы пленок Tb₁₀Dy₂₃Fe₆₇, нанесенных на подложки, нагретые до температур: 1 – 30°C, 2 - 300°C, 3 - 350°C, 4 - 400°C, 5 - 450°C, 6 - 500°C. Кривая 7 – GIXRD-рентгенограмма нанокристаллического Tb. б) Петли гистерезиса, измеренные при 300K перпендикулярно плоскости пленок Tb₁₀Dy₂₃Fe₆₇, нанесенных на нагретые подложки при разных T_h.

Тензomagниторезистивные свойства пленок Tb₁₀Dy₂₃Fe₆₇/Fe₂₀Ni₈₀. В рамках указанной двухслойной структуры предпринята попытка сформировать

композитную среду с достаточно высоким тензотензорезистивным эффектом. Установлено, что из двух способов получения такой среды, состоящих в селективном отжиге слоя $\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}$ или осаждении его на нагретую подложку, только первый вариант приводит к реализации тензотензорезистивного эффекта такого уровня, который представляет интерес для практических приложений (Рисунок 15). Высказано предположение, что среди прочего этому способствует отсутствие перпендикулярной магнитной анизотропии в редкоземельносодержащем слое.

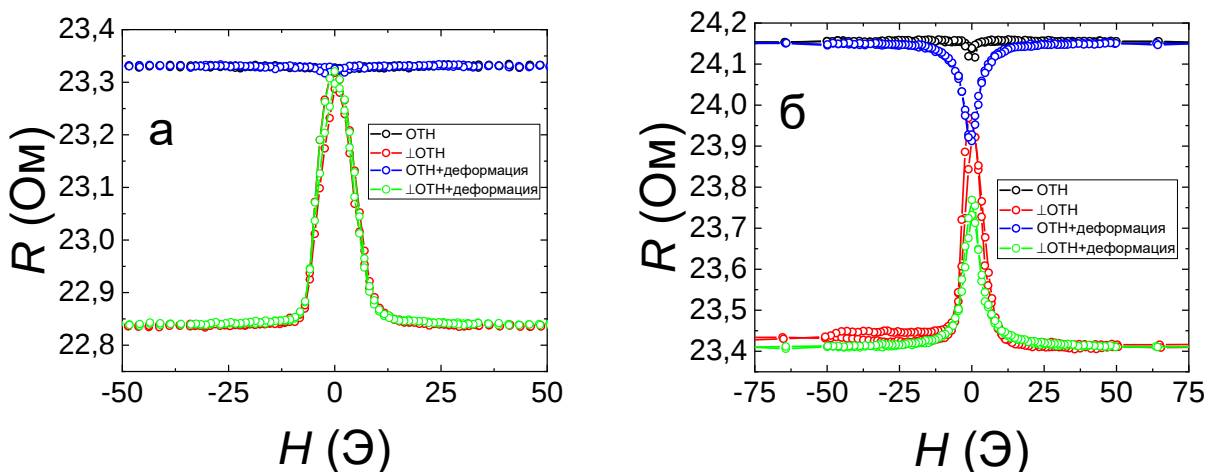


Рисунок 15. Магниторезистивные петли пленок $\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}(110 \text{ нм})/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}(50 \text{ нм})$, слой $\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}$ которых был: а) нанесен на подложку, нагретую до 350°C , б) селективно отожжен при температуре 350°C . Величина деформации составляла 0.05%. ОТН – ось технологического поля при напылении.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что для пленок тяжёлых редкоземельных металлов (Gd, Dy, Tb), характерна асперомагнитная структура, которая возникает в рамках нанокристаллического состояния вследствие высокой дисперсии межатомного обменного взаимодействия и магнитной анизотропии. В случае Gd она может отражать суперпозицию магнетизма ферромагнитной и сперомагнитной фаз, а в случае Tb и Dy в основном определяется пространственной флуктуацией локальных осей лёгкого намагничивания.

2. Дана трактовка магнетизма бинарных систем $\text{R}_{100-x}\text{Co}_x$ в концентрационной области $x < 50$ как результата действия двух противоположных тенденций, задающих немономотонное концентрационное изменение температуры Кюри и специфическое для каждого R изменение гистерезисных свойств. Они могут быть обусловлены, с одной стороны, уменьшением эффективности косвенного обменного взаимодействия (по *s-f* и *f-d* моделям) при аморфизации структуры, наблюдающейся

при $x > 10$, а, с другой стороны, усилением магнетизма за счёт увеличения плотности носителей в гибридизированной 5d-3d энергетической подзоне.

3. На примере аморфных плёнок Gd-Co показано, что прямой и обратный спонтанные спин-ориентационные переходы от перпендикулярной к плоскостной анизотропии, реализующиеся в области температур магнитной компенсации ферромагнитных R-T структур, происходят через промежуточное «закритическое» магнитное состояние. Дано количественное описание таких переходов в форме фазовой диаграммы в координатах «температура – концентрация».

4. Найдены новые закономерности формирования обменного смещения в ферромагнитном слое Gd-Co, входящем в трёхслойную структуру $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{FeMn}/(\text{Gd-Co})$ с закрепляющим антиферромагнитным слоем FeMn, к которым относятся:

- 1) инверсия полярности обменного смещения в области магнитной компенсации;
- 2) пороговый характер изменения плотности энергии межслойной обменной связи на ферри/антиферромагнитном интерфейсе при переходе через температуру компенсации;
- 3) возможность независимого влияния на эффект обменного смещения в ферромагнитном и ферромагнитном слоях, включая создания в них как однополярного, так и разнополярного вариантов смещения.

5. Экспериментально и расчётным путём показано, что эффективность межслойного взаимодействия в структуре типа $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}/(\text{Tb-Co})$ с закрепляющим аморфным магнитотвёрдым слоем Tb-Co закономерным образом зависит от состояния межслойного интерфейса и может контролируемо изменяться за счёт варьирования его шероховатости путём селективного отжига слоя $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}$ или введения ультратонких прослоек Tb.

6. Установлены принципиальные различия в механизмах перпендикулярной магнитной анизотропии в плёнках состава Terfenol-D ($\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}$), полученных на ненагретую подложку и на подложку, нагретую до температуры 300°C и выше. В первом случае наиболее вероятным источником анизотропии является столбчатая микроструктура, которая разрушается в результате последующего низкотемпературного отжига. Во втором – специфическая псевдокристаллическая текстура, проявляющая высокую степень термической устойчивости. В результате сформулированы технологические условия получения плёнок с разным характером магнитной анизотропии, представляющих интерес для решения разных прикладных задач.

7. На примере плёночного композита $\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$, сформированного с использованием селективного отжига слоя $\text{Tb}_{10}\text{Dy}_{23}\text{Fe}_{67}$, продемонстрирована возможность реализации тензомагниторезистивного эффекта, уровень которого приемлем для разработки механо-электромагнитной функциональной среды.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Магнетизм и функциональные свойства сплавов редкоземельных металлов (R) и металлов группы железа (T) в плёночном состоянии были и продолжают оставаться интересным направлением фундаментальных и прикладных исследований. Выполненная диссертационная работа внесла определённый вклад в физику R-T систем и поставила ряд вопросов перспективных для дальнейшей разработки. К ним, в частности, относятся:

- 1) расширение круга редкоземельных элементов и 3d-переходных металлов, входящих в состав тонких плёнок, с целью выявления новых закономерностей формирования неоднородной магнитной структуры в широких диапазонах составов, температур и магнитных полей;
- 2) изучение особенностей обменного закрепления на R-T слоях с перпендикулярной анизотропией, в трёхслойных структурах типа (R-T)/FeNi/(R-T) с различной анизотропией R-T слоёв, а также при использовании Gd для модификации межслойного интерфейса в структурах типа (R-T)/FeNi;
- 3) оптимизация структурно-фазового состояния пленок типа Terfenol-D с целью реализации в них высоких значений магнитострикции при минимальной коэрцитивной силе и дальнейшего использования в структурах с тензомагниторезистивным эффектом и композитных мультиферроиках.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО

ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:

1. Svalov, A.V. Exchange bias in FeNi/FeMn/Gd–Co trilayers: The role of the magnetic prehistory / A.V. Svalov, **E.V. Kudyukov**, V.N. Lepalovskij, A.N. Gorkovenko, E.A. Stepanova, A. Larrañaga, G.V. Kurllyandskaya, V.O. Vas'kovskiy // Current Applied Physics. – 2021. – Vol. 23. – P. 68-75. 0.93 п.л./0.35 п.л. (Scopus, WoS).
2. Vas'kovskiy, V.O. Experimental Study and Modeling of the Magnetic Properties of Dy-Co Films / V.O. Vas'kovskiy, **E.V. Kudyukov**, E.A. Stepanova, E.A. Kravtsov, O.A.

- Adanakova, A.S. Rusalina, K.G. Balymov, A.V. Svalov // *Physics of Metals and Metallography*. – 2021. – Vol. 122(5). – P. 478-484. 0.87 п.л./0.32 п.л. (Scopus, WoS).
3. Adanakova, O.A. Influence of Ti spacer on interlayer exchange coupling in Fe₁₀Ni₉₀/(R-Co) (R = Gd, Dy) film structures / O.A. Adanakova, **E.V. Kudyukov**, A.S. Rusalina, K.G. Balymov, V.O. Vas'kovskiy // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – V.2313. – P. 030066. 0.56 п.л./0.22 п.л. (Scopus, WoS).
4. **Kudyukov, E.V.** Tensomagnetoresistive Effect in Permalloy-Based Film Composites / **E.V. Kudyukov**, A.A. Feshchenko, N.A. Kulesh, V.N. Lepalovskij, K.G. Balymov, V.O. Vas'kovskiy // *Physics of Metals and Metallography*. – 2021. – V. 122. – P. 749-754. 0.82 п.л./0.38 п.л. (Scopus, WoS).
5. Makarochkin, I.A. Features of the sperimagnetic structure of TbCo-based multilayers / I.A. Makarochkin, **E.V. Kudyukov**, E.A. Stepanova, G.V. Kurlyandskaya, V.O. Vas'kovskiy, A.V. Svalov // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2313. – P. 030057. 0.6 п.л./0.12 п.л. (Scopus, WoS).
6. Balymov, K.G. Magnetism of amorphous Dy-Tb-Co-type films / K.G. Balymov, **E.V. Kudyukov**, V.O. Vas'kovskiy, O.A. Adanakova, N.A. Kulesh, E.A. Stepanova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1389. – P. 012014. 0.5 п.л./0.2 п.л. (Scopus, WoS).
7. Vas'kovskiy, V.O. Magnetism of Dy-Co system amorphous films / V.O. Vas'kovskiy, O.A. Adanakova, **E.V. Kudyukov**, E.A. Stepanova, A.S. Rusalina, K.G. Balymov // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2174. – P. 020161. 0.58 п.л./0.23 п.л. (Scopus, WoS).
8. Vas'kovskiy, V.O. Spontaneous Spin Reorientation in Gd–Co Amorphous Films / V.O. Vas'kovskiy, A.N. Gor'kovenko, O.A. Adanakova, A.V. Svalov, N.A. Kulesh, E.A. Stepanova, **E.V. Kudyukov**, V.N. Lepalovskij // *Physics of Metals and Metallography*. – 2019. – Vol. 120. – P. 1055-1062. 0.95 п.л./0.2 п.л. (Scopus, WoS).
9. Balymov, K.G. Effect of Selective Thermomagnetic Treatment on Unidirectional Magnetic Anisotropy in FeNi/TbCo Films / K.G. Balymov, N.A. Kulesh, A.S. Bolyachkin, A.P. Turygin, V.O. Vas'kovskiy, O.A. Adanakova, **E.V. Kudyukov** // *Physics of Metals and Metallography*. – 2018. – Vol. 119. – P. 923-926. 0.58 п.л./0.19 п.л. (Scopus, WoS).

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holzmann, C. Stress-Induced Magnetic Properties of Gadolinium Iron Garnet Nanoscale-Thin Films: Implications for Spintronic Devices / C. Holzmann, A. Ullrich, O.-T. Ciubotariu, M. Albrecht // *ACS Applied Nano Materials*. – 2022. – Vol. 5. – P. 1023-1033.

2. Chen, D. Noncollinear spin state and unusual magnetoresistance in ferrimagnet Co-Gd / D. Chen, Y. Xu, S. Tong, W. Zheng, Y. Sun, J. Lu, N. Lei, D. Wei, J. Zhao // *Physical Review Materials*. – 2022. – Vol.6. – P. 014402.
3. Hu, Z.M. Nonlinear magnetoelectric effects of multiferroic composites / Z.M. Hu, Y. Su, J. Li // *International Journal of Solids and Structures*. – 2021. – Vol. 212. – P. 96-106.
4. Kulesh, N.A. Anomalies in hysteresis properties of Fe₂₀Ni₈₀/Tb-Co films with unidirectional anisotropy / N.A. Kulesh, K.G. Balymov, V.O. Vas'kovskiy, A.V. Svalov, A.N. Sorokin // *Thin Solid Films*. – 2015. – Vol. 577. – P. 1-5.
5. Wang, J. A review of preparation, properties and applications of rare earth magnetic thin films / J. Wang, J.A. Gan, Y.C. Wong, C.C. Berndt // *Magnetic Thin Films: Properties, Performance and Applications*. – 2011. – P. 1-69.
6. Rajasekhar, P. Magnetization Studies on Tb-Fe and Tb-Fe-Co Thin Films / P. Rajasekhar, G. Markandeyulu // *IEEE Transactions on magnetics*. – 2019. – Vol. 55. – P. 2500804.
7. Wang, Y. Competing ferromagnetic and antiferromagnetic interactions drive the magnetocaloric tunability in Gd₅₅Co₃₀Ni_xAl_{15-x} microwires / Y. Wang, N. Thi My Duc, T. Feng, H. Wei, F. Qin, M.H. Phan // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – Vol. 907. – P. 164328.
8. Zhang, Z. Tailorable magnetocaloric effect by Fe substitution in Gd-(Co, Fe)amorphous alloy / Z. Zhang, Q. Tang, F. Wang, H. Zhang, Y. Zhou, A. Xia, H. Li, S. Chen, W. Li // *Intermetallics*. – 2019. – Vol. 111. – P. 106500.
9. Sonehara, M. Strain sensor using stress-magnetoresistance effect of Ni-Fe/Mn-Ir exchange-coupled magnetic film / M. Sonehara, T. Shinohara, T. Sato, K. Yamasawa, Y. Miura // *Journal of Applied Physics*. – 2010. – Vol. 107. – P. 09E718.
10. Kudyukov, E.V. Tensomagnetoresistive Effect in Permalloy-Based Film Composites / E.V. Kudyukov, A.A. Feshchenko, N.A. Kulesh, V.N. Lepalovskij, K.G. Balymov, V.O. Vas'kovskiy // *Physics of Metals and Metallography*. – 2021. – Vol. 22. – P. 749-754.
11. Фролов, Г.И. Физические свойства и применение магнитопленочных наноконпозитов / Г. И. Фролов, В. С. Жигалов; Ответственный редактор академик В. Ф. Шабанов. – Издательство Сибирского отделения Российской академии наук, 2006. – С. 44-55.