

На правах рукописи

ИВКОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ  
НАНОКОМПОЗИТОВ  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  И  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$**

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Воронеж - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет»

**Научный руководитель** Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор  
**Домашевская Эвелина Павловна**

**Официальные оппоненты:** **Яловега Галина Эдуардовна**, доктор физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», физический факультет, кафедра физики наносистем и спектроскопии, заведующий.

**Калинин Юрий Егорович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», факультет радиотехники и электроники, кафедра физики твердого тела, профессор;

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Ижевск;

Защита состоится **26 мая** 2022 г. в **15-10** на заседании диссертационного совета 24.2.288.03 при Воронежском государственном университете по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь 1, физический факультет, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного университета, с авторефератом – на сайте ВУЗа <http://www.vsu.ru> и на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ – <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.288.03

Голощاپов Дмитрий Леонидович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы:

Первоначально гранулированные металлы в диэлектрической матрице в виде керамики использовались в роли электрического сопротивления. Преимуществом данных материалов являлось высокое удельное сопротивление и низкий температурный коэффициент удельного сопротивления. Основными методами получения таких материалов были распыление металлов в кислородной среде или сораспыление несмешивающихся металлов и изоляторов.

В дальнейшем особый интерес привлекли гранулированные композиты металл-диэлектрик, в которых металлические частицы имели субмикронный размер, наноразмеры порядка 10 нм или были аморфными, из-за их уникальных нелинейных электрических и магнитных свойств. Развитие науки и технологий нанокompозитов привело к масштабным исследованиям материалов ферромагнетик-диамагнетик из-за открытия в них туннельного магнетосопротивления (ТМС), аналога гигантского магнетосопротивления (ГМС), различающихся механизмами переноса носителей заряда и спина.

Первые работы по исследованию ГМС были опубликованы после открытия в 1988 году Альбертом Фертом и Петером Грюнбергом данного эффекта, научная и практическая значимость которого была отмечена присуждением Нобелевской премии в 2007 году. Это открытие мотивировало научное сообщество к интенсивным исследованиям в данном направлении.

В результате получили развитие технологии магнито жестких и магнитомягких материалов для СВЧ-электроники, радиоэлектроники, магнитных датчиков, банковских карт и другого.

Одной из главных сфер применения эффектов ГМС на данный момент являются запоминающие устройства на жестких магнитных дисках в считывающих головках накопителей.

Можно отметить и другие применения данных эффектов. Например, мост Уистона из четырех одинаковых ГМС-устройств. Данные устройства могут использоваться в качестве выпрямителей тока с линейной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ).

При этом до сих пор не ослабевает интерес к новым комбинациям компонент в композитах типа ферромагнетик-диэлектрик и вопросам о влиянии атомного строения и на их нелинейные электрические и магнитные свойства.

Тема данной работы соответствует «Перечню приоритетных направлений фундаментальных исследований», утвержденных Президиумом РАН (раздел 1.1 – «Физика конденсированных сред и материалы нового поколения»).

## **Объекты и методы исследования.**

В процессе ионно-лучевого распыления в атмосфере аргона были получены две системы гранулированных нанокompозитов (НК) металл-диэлектрик переменного состава: в качестве металлической компоненты первая система  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  содержала ферромагнитный металлический кобальт (Co), а вторая система  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  - трехэлементный ферромагнитный сплав  $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ . Диэлектрической компонентой в обеих системах был бескислородный диэлектрик  $\text{MgF}_2$ , наименее исследованный в составе нанокompозитов по сравнению с оксидными диэлектриками. Образцы нанокompозитов были получены на оригинальной установке ионно-лучевого распыления, сконструированной на кафедре физики твердого тела ВГТУ.

Для получения данных о фазовом составе и морфологии образцов использовались различные методы и установки: рентгеновская дифрактометрия (РД), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), растровая электронная микроскопия (РЭМ), инфракрасная спектроскопия (ИК), Мессбауэровская спектроскопия.

Для получения электрических и магнитных характеристик нанокompозитов использовались магнитооптическая спектроскопия, вибрационный магнитометр (ВСМ), система измерения эффекта Холла и удельного сопротивления.

Большинство полученных результатов в области атомного строения, фазового состава, электрических и магнитных свойств исследованных НК являются новыми. До этих комплексных исследований в течение предшествующего десятилетия нашими коллегами из ВГТУ были разработаны технологии получения многочисленных систем НК разного состава и исследованы электромагнитные свойства, среди которых главное место занимает гигантское магнитное сопротивление ГМС. Результаты этих исследований были обобщены в коллективной монографии "Нелинейные явления в нано и микрогетерогенных системах" С. А. Гриднева, Ю. Е. Калинина, А. В. Ситникова, О. В. Стогняя, изданной в 2012 году, среди объектов которой отсутствуют исследуемые в настоящей диссертации системы с бескислородным диэлектриком  $\text{MgF}_2$ .

**Основной целью диссертационной работы** является установление закономерностей влияния атомного состава и фазообразования на транспортные и магнитные свойства гранулированных нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ .

Основными задачами исследования, исходя из поставленной цели, являются:

- Получить информацию об атомном и фазовом составе, о кристаллическом состоянии нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  методами рентгеновской дифракции и электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа.

- Определить характер межатомных взаимодействий и химических связей на поверхности и в глубине нанокompозитных пленок микронной толщины  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  с использованием методов РФЭС, ИК-спектроскопии и Мессбауэровской спектроскопии.
- Получить информацию о транспортных свойствах в нанокompозитах  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  с использованием универсальных лабораторных электрофизических установок.
- Получить информацию о магнитных свойствах в нанокompозитах  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  путем исследования туннельного магнитосопротивления и магнитооптических эффектов.

### **Научная новизна работы**

Большинство экспериментальных данных, представленных в диссертационной работе, были получены впервые. Наиболее важные результаты представлены ниже:

- Установлен переход из рентгеноаморфного в нанокристаллическое состояние фаз металлической и диэлектрической составляющей в зависимости от относительного процентного соотношения компонент металл-диэлектрик в нанокompозитах  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  при  $x=37$  ат.% и в  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  при  $x=30$  ат.%.
- В системе  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  обнаружен фазовый переход нанокристаллов сплава  $\text{CoFeZr}$  из гексагональной в кубическую сингонию за порогом перколяции при увеличении содержания сплава от  $x=34$  ат.% до  $x=50$  ат.%
- Впервые получены комплексные экспериментальные данные о характере межатомных взаимодействий поверхностных и глубинных нанослоев гранулированных нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ .
- Определены транспортные и магнитные характеристики путем измерения соответствующих характеристик в широком диапазоне изменения составов нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ .

### **Теоретическая и практическая значимость:**

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в расширении фундаментальных знаний о характере межатомных взаимодействий в композитных системах сложного переменного состава  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ , их атомном и электронном строении, морфологии и фазовом составе, определяющих их особенные электромагнитные свойства.

Результаты, полученные в работе, могут быть использованы для оптимизации технологических режимов получения гранулированных нанокompозитов, а также позволяют управлять электромагнитными свойствами подобных систем, используя данные о взаимосвязи атомного и фазового состава и межатомных взаимодействий в сложных композитных системах и их электрических и магнитных свойств.

### **Научные положения, выносимые на защиту:**

- В нанокompозитах  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ , полученных ионно-лучевым распылением составных мишеней, в результате самоорганизации происходит формирование нанокристаллов металлической компоненты Co/CoFeZr в области порога перколяции и антибатный переход диэлектрической матрицы  $\text{MgF}_2$  из нанокристаллического в рентгеноаморфное состояние.
- Пороги перколяции в нанокompозитах  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  при  $x=37$  ат.% и  $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  при  $x=30$  ат.% совпадают с началом образования металлических нанокристаллов и переходом нанокompозитов из суперпарамагнитного в ферромагнитное состояние.
- Фазовый переход нанокристаллов CoFeZr из гексагональной в кубическую структуру происходит за порогом перколяции нанокompозитов  $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  при увеличении содержания металлической составляющей до  $x=42$  ат.%.
- На концентрационных зависимостях экваториального эффекта Керра в нанокompозитах  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  наблюдается один максимум на пороге перколяции при  $x=37$  ат.%, совпадающий с образованием гексагональных нанокристаллов  $\alpha$ -Co.
- На концентрационных зависимостях экваториального эффекта Керра в нанокompозитах  $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  появляются два максимума, один из которых соответствует образованию гексагональных нанокристаллов CoFeZr ( $x=30$  ат. %), а второй максимум при  $x=45$  ат. % соответствует фазовому переходу гексагональной структуры в кубическую объемноцентрированную.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: Четвертая международная молодежная научная школа-семинар «Наноструктурированные оксидные пленки и покрытия» (Петрозаводск, 2017), XXIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов – 2017» (Москва, 2017), XXV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов – 2018» (Москва, 2018), XXVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов – 2019» (Москва, 2019), XXVII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов – 2020» (Москва, 2020), XXVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов – 2021» (Москва, 2021), Topical areas of fundamental and applied research XVI (North Charleston 2018), Национальный молодежный научный симпозиум «Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых в области получения композитных материалов нового поколения» (Воронеж, 2018), VII Международная конференция «Функциональные наноматериалы и

высокоочищенные вещества» (Суздаль, 2018), VIII Всероссийская конференция с международным участием «ФАГРАН -2018» (Воронеж, 2018), Национальный молодежный научный симпозиум «Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых в области получения композитных материалов нового поколения (Воронеж, 2018), XVI Российская научная студенческая конференция «Физика твердого тела» (Томск, 2018), XXIII Всероссийская конференция с международным участием «РЭСХС» (Воронеж, 2019), Первая всероссийская молодежная конференция «Высокоточная диагностика функциональных материалов лабораторные и синхротронные исследования 2021». (13-15 декабря 2021, Воронеж).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликованы 17 работ, в том числе 3 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ и рецензируемых в международных базах цитирования WoS и Scopus, 14 докладов в сборниках трудов конференций и тезисов.

### **Личный вклад автора:**

Определение направления исследования и постановка задач выполнены научным руководителем д.ф.-м.н., профессором Э.П. Домашевской.

Образцы нанокompозитов двух систем были получены на оригинальной установке ионно-лучевого напыления в ВГТУ под руководством профессора А.В. Ситникова. Дифрактометрические исследования проведены лично автором на кафедральном дифрактометре ДРОН 4-07. Данные РЭМ получены инженером Воронежского завода полупроводниковых приборов С.В. Родивиловым и научным сотрудником ЦКП НО ВГУ Б.Л. Агаповым. Спектры РФЭС получены д.ф.-м.н. А.Т. Козаковым и с.н.с. А.В. Никольским на кафедре физики твердого тела НИИ физики ЮФУ. Данные по ИК-спектроскопии получены автором совместно с доцентом А.Н. Лукиным в ЦКП НО ВГУ. Данные по Мессбауэровской спектроскопии получены на кафедре ядерной физики ВГУ м.н.с. Ю.Г. Сегалом. Данные по магнитооптической спектроскопии и электромагнитным свойствам получены профессором Е.А. Ганьшиной и аспирантом В.В. Гаршиным на кафедре магнетизма МГУ. Напыление токопроводящих контактов было выполнено автором совместно с д.ф.-м.н. С.В. Рябцевым. Вольт-амперные характеристики получены автором совместно с заведующим лабораторией К.А. Барковым на кафедре физики твердого тела и наноструктур ВГУ. Данные по определению эффекта ТМС получены автором совместно с д.ф.-м.н. П.В. Серединым на кафедральном оборудовании. Импедансная спектроскопия проведена автором совместно с к.ф.-м.н. Д.Л. Голощаповым и д.ф.-м.н. А.С. Леньшиным на кафедре физики твердого тела и наноструктур ВГУ. Обработка и анализ полученных экспериментальных данных полностью проводились лично автором.

Обсуждение результатов и написание статей проводилось совместно с научным руководителем д.ф.-м.н., профессором Э.П. Домашевской. Формулировка выводов по итогам проделанной работы, а также представление результатов на международных и всероссийских научных конференциях осуществлялись лично автором.

### Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 146 страниц, включая 117 рисунка, 16 таблиц, список литературы, который содержит 122 наименований, включая публикации по теме диссертации.

**Во введении** к диссертационной работе обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов и научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе**, на основе данных литературных источников даётся описание основных свойств наногранулированных композитов металл-диэлектрик. Излагаются известные данные о структуре исследуемых материалов и их основных электрических и магнитных свойствах. В заключении главы формулируются выводы об отсутствии исследований системы нанокompозитов  $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(MgF_2)_{100-x}$  и формулируются цели и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** особое внимание уделяется описанию объектов исследования и ионно-лучевому методу получения нанокompозитов переменного состава  $Co_x(MgF_2)_{100-x}$  и  $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(MgF_2)_{100-x}$ .

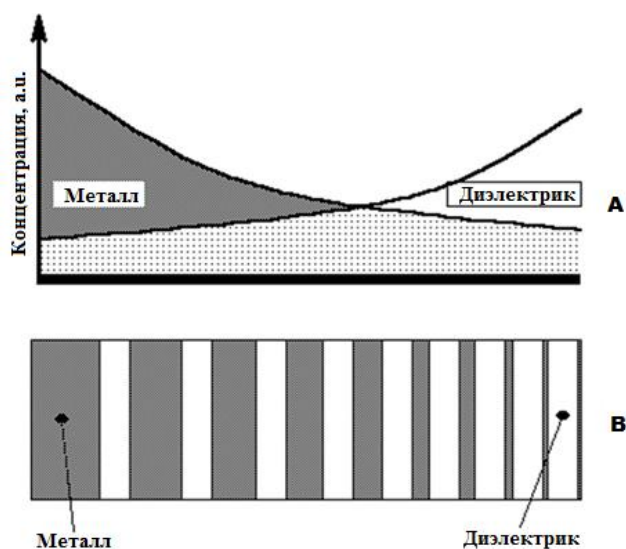


Рис.1 (А) Схема относительного распределения металлической и диэлектрической компонент составной мишени на поверхности подложки. (В) Внешний вид составной мишени для получения гранулированных композитов.



На Рис. 1 схематически представлена схема относительного распределения металлической и диэлектрической компонент составной мишени на поверхности подложки (А) и внешний вид составной мишени для получения гранулированных композитов, состоящая из литой основы ферромагнитного металла Со или сплава  $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$  и пластин из диэлектрика  $\text{MgF}_2$  (В).

Во второй части главы дается краткое описание методов и оборудования, которые использовались для исследования нанокompозитов. Приводятся основные характеристики и параметры получения экспериментальных данных по рентгеновской дифракции РД, инфракрасной спектроскопии ИК, электронно-зондовому рентгеноспектральному микроанализу на сканирующем электронном микроскопе СЭМ, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии РФЭС, методу ядерного гамма-резонанса – спектроскопии Мёссбауэра, а также методики получения магнитооптических спектров для определения магнитного состояния наноразмерных структур и основные характеристики установок для исследования транспортных свойств и эффекта туннельного магнитосопротивления.

**Третья глава** посвящена изложению экспериментальных результатов исследования структурных, электрических и магнитных свойств нанокompозитов переменного состава  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ . Методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа на приставке к сканирующему электронному микроскопу СЭМ определен атомный состав и толщины композитов (Рис.2), которые плавно варьировались в диапазоне 0,7 – 2,6 мкм в соответствии с изменением составов образцов в интервале  $x = 14\text{--}63$  ат.%.

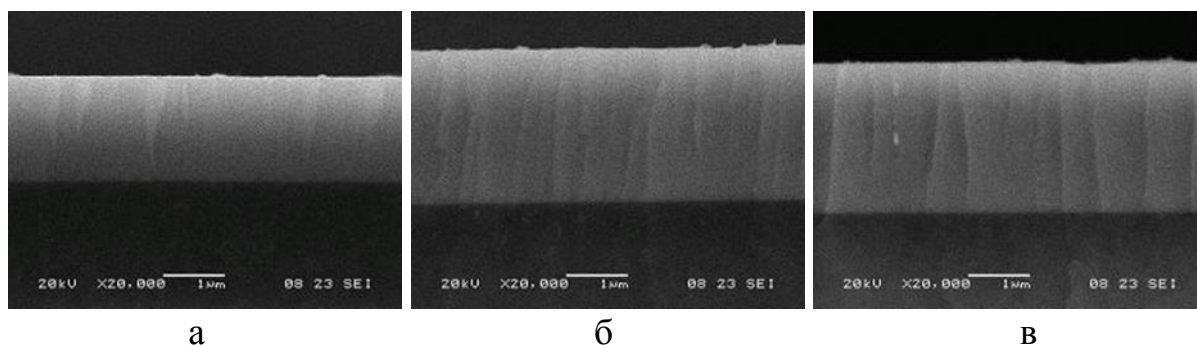


Рис. 2 Микрофотографии СЭМ сколов некоторых образцов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  на подложках из ситалла:  $x=27$  ат.% (а);  $x=41$  ат.% (б);  $x=63$  ат.% (в)

На основе данных рентгенодифрактометрического анализа был установлен переход металлического кобальта из аморфного в нанокристаллическое состояние при увеличении его концентрации  $x$  в нанокompозите  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и инверсный переход диэлектрической матрицы  $\text{MgF}_2$  из нанокристаллического в аморфное состояние (Рис. 3). При малом содержании ( $x < 27$  ат.%) кластеры аморфного кобальта распределяются в среде нанокристаллов диэлектрической компоненты  $\text{MgF}_2$ .

С ростом содержания металла в композите начинают формироваться нанокристаллы Co гексагональной сингонии при  $x=37$  ат.% на ситалловых подложках и при  $x$  42 ат.% на стеклянных подложках (Рис.3), в то время как диэлектрическая матрица  $MgF_2$  становится рентгеноаморфной. Средние размеры нанокристаллов кобальта увеличиваются от 10 нм при  $x = 42$  ат.% до 20 нм при  $x = 59$  ат.%.

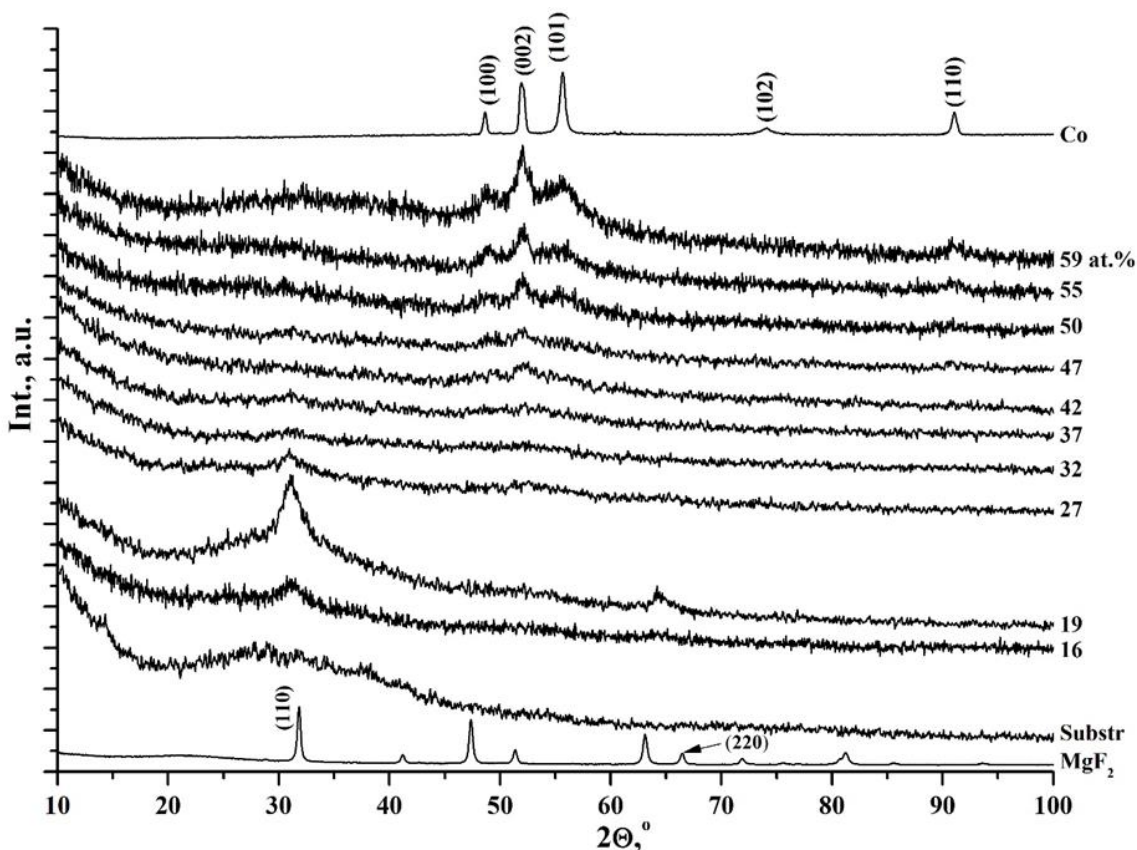


Рис. 3 Дифрактограммы от образцов гранулированных нанокompозитов  $Co_x(MgF_2)_{100-x}$  разного состава на стеклянных подложках

Анализ тонкой структуры РФЭС-спектров (Рис. 4) показал, что только на поверхности нанокompозитов кобальт сильно окислен во всех образцах, о чем свидетельствует преобладающая по интенсивности высокоэнергетическая компонента  $Co2p$  с энергией связи  $E = 781.0$  eV, соответствующая оксиду кобальта  $CoO$ . Однако в образцах с малым содержанием Co ( $x = 14$  и  $19$  ат. %) на поверхности обнаруживается компонента с энергией связи  $E = 778.0$  eV от металлического кобальта, находящегося в этих нанокompозитах в мелкодисперсном состоянии в виде малых кластеров, наряду с оксидной. При этом диэлектрическая матрица в этих композитах сформирована из нанокристаллов  $MgF_2$  с несколько увеличенными обычным межплоскостными расстояниями по сравнению с микрокристаллическим  $MgF_2$ .

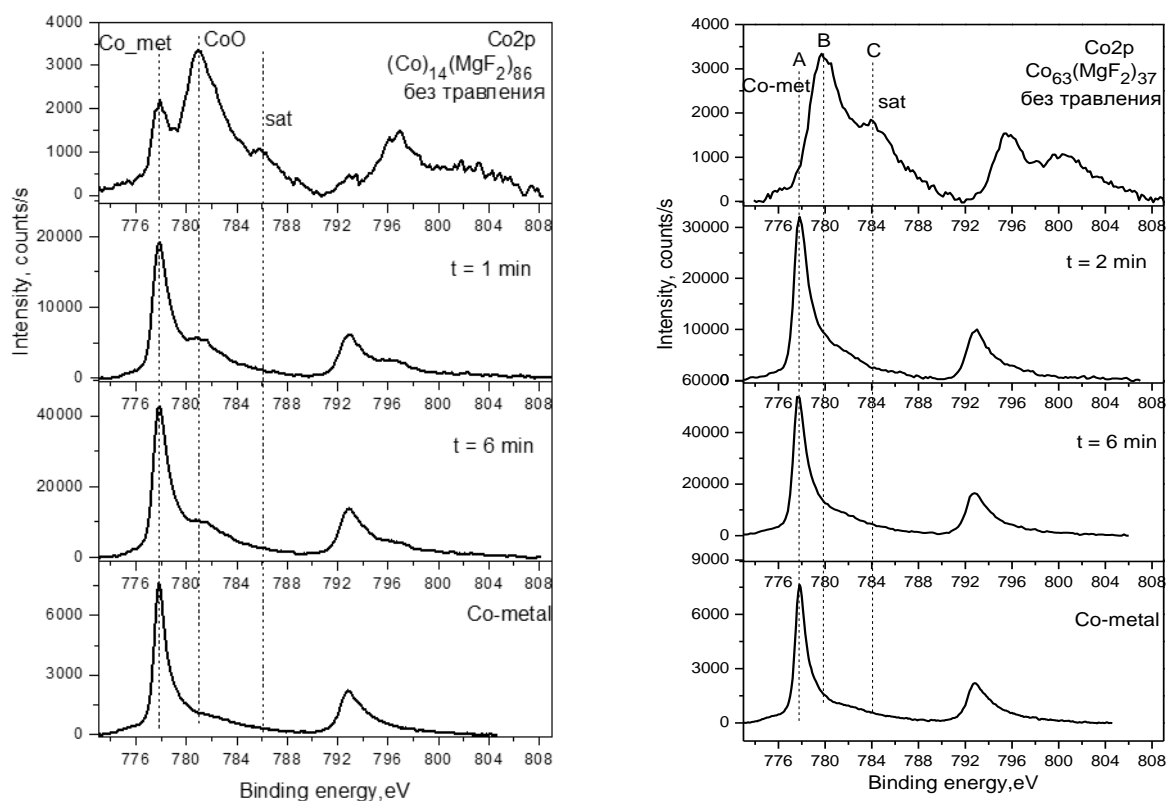


Рис. 4 Рентгеноэлектронные спектры РФЭС (XPS) Co 2p<sub>1/2,3/2</sub> в нанокompозитах Co<sub>14</sub>(MgF<sub>2</sub>)<sub>86</sub> и Co<sub>63</sub>(MgF<sub>2</sub>)<sub>37</sub> на ситалловых подложках

Концентрационная зависимость электрического сопротивления показала (Рис. 5), что при малом содержании кобальта в интервале  $x=16-27$  ат. % сопротивление нанокompозитов достигает величин  $10^7-10^6$  Ом, характерных для традиционных диэлектриков, тогда как в интервале  $x=47-59$  ат. %, сопротивление падает до величин порядка 1 Ома и менее, характерных для металлов.

В переходном интервале  $x=32-42$  ат. %, связанным с образованием нанокристаллов кобальта, происходит резкое падение сопротивления на 4-5 порядков величины, соответствующее порогу перколяции (протекания) при  $x=37$  ат. % кобальта.

Абсолютное значение туннельного магнитного сопротивления ТМС нанокompозитов определялось в соответствии с выражением:

$$\frac{\Delta R}{R(0)} = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)} * 100\% ,$$

где  $R(H)$  – сопротивление композита при наличии внешнего магнитного поля  $H$ ,  $R(0)$  – сопротивление композита в отсутствии внешнего магнитного поля.

На Рис. 6 представлена концентрационная зависимость магниторезистивного эффекта и величины ТМС образцов системы Co <sub>$x$</sub> (MgF<sub>2</sub>)<sub>100- $x$</sub> . При увеличении процентного содержания кобальта до  $x=27$  ат. % происходит резкое возрастание эффекта ТМС до максимальной величины  $\Delta R/R(0) = 5\%$  при индукции магнитного поля  $B=5,5$  кГс.

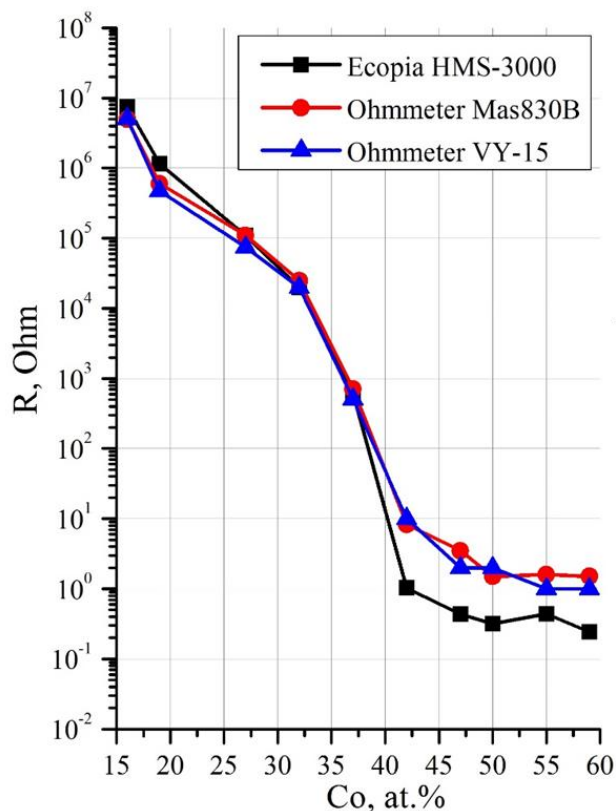


Рис. 5 Концентрационная зависимость электрического сопротивления нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$

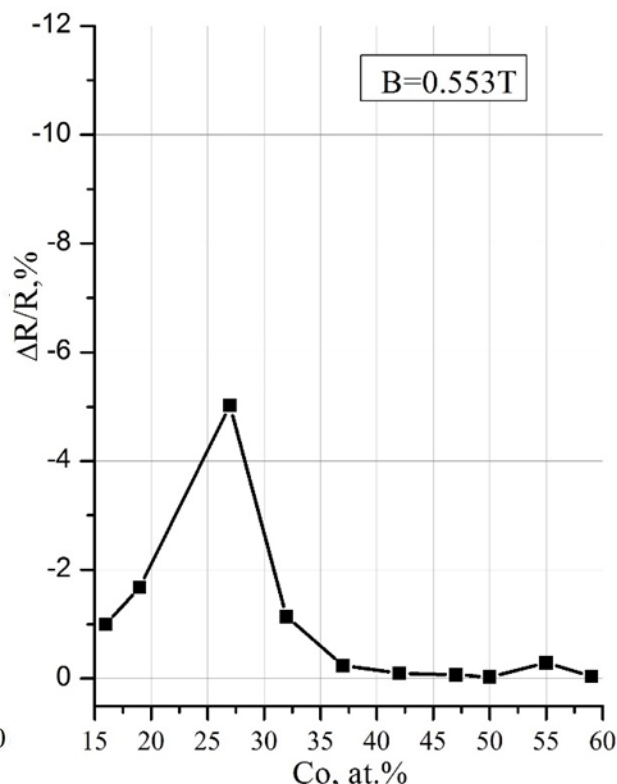


Рис. 6 Концентрационная зависимость магнитосопротивления нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$

Данные по импедансометрии для нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  согласуются с предыдущими результатами и показывают два различных типа годографов (диаграмм импеданса) до (Рис.7а) и после порога перколяции (рис.7б). Годограф импеданса  $Z$  представляет собой графическую зависимость мнимой составляющей импеданса  $Z''$  от реальной  $Z'$ .

$$\text{Импеданс } Z = R - i \frac{1}{\omega C}, \quad Z' = R, \quad Z'' = \frac{1}{\omega C},$$

где  $Z'$  – действительная составляющая сопротивления,  $Z''$  – мнимая составляющая сопротивления,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  – циклическая частота,  $C$  – общая емкость композита.

На годографе (рис.7а) для нанокompозита с содержанием кобальта до порога перколяции  $x=32$  ат.% наблюдается полуокружность, которая соответствует типичному характеру поведения  $RC$ -цепи металлических кластеров в диэлектрической матрице. После порога перколяции годограф импеданса сначала имеет вид наклонной линии (Рис.7б), а затем с ростом  $x$  годографы становятся вертикальными линиями, указывающими на металлическую природу проводимости омического характера.

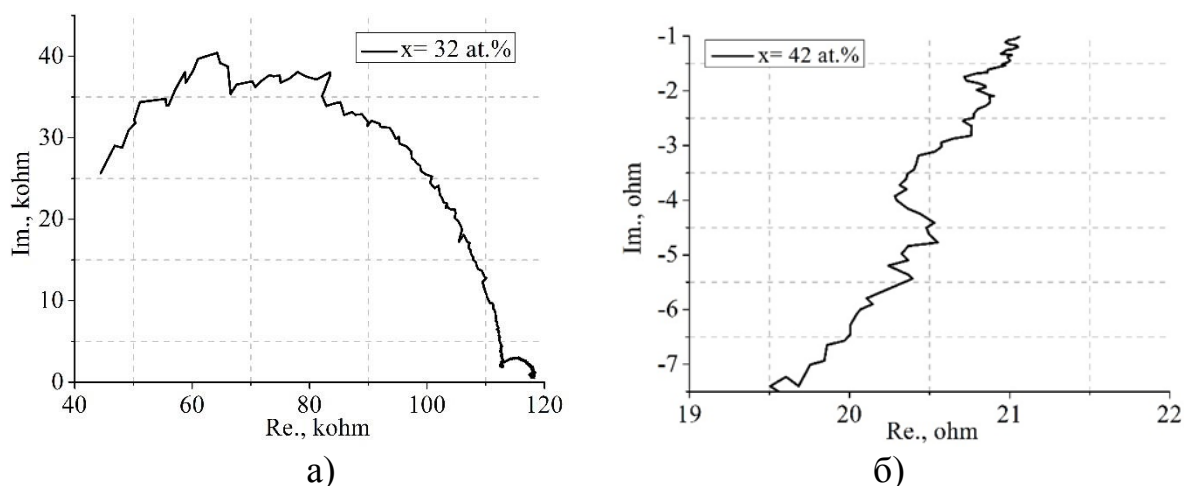


Рис. 7 Импедансная диаграмма (ногограф) для нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$   $x=32$  ат. % (а) и  $x=42$  ат. % (б)

Значения сопротивления и емкости нанокompозитов по данным импедансометрии, приведенные в Таблице 1, показывают, что емкость нанокompозитов в доперколяционной области не превышает нескольких единиц пикофарад. И только в области порога перколяции ( $x=37$  ат. %) емкость увеличивается на три порядка до двух нанофарад. Такое значение емкости обусловлено образованием металлических нанокристаллов и остающимися диэлектрическими прослойками между ними.

Таблица 1. Концентрационная зависимость полного электрического сопротивления  $R$  и емкости  $C$  образцов системы  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$

$x$ , ат. %	16	19	27	32	37	42	47	50	55	59
$R$ , Ом	$1 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^6$	$15 \cdot 10^4$	$12 \cdot 10^4$	830	20	2	2	2	2
$C$ , ф	$3 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-9}$	-	-	-	-	-

Магнитооптический эффект Керра в экваториальной геометрии-экваториальный эффект Керра ЭЭК (ТКЕ-transversal Kerr effect) заключается в изменении интенсивности линейно поляризованного света, отраженного образцом, намагниченным перпендикулярно плоскости падения света. Отношение разности интенсивностей света, отраженного образцом в намагниченном ( $I$ ) и размагниченном ( $I_0$ ) состояниях, к интенсивности света  $I_0$  определяет величину и знак ТКЕ:

$$\delta = \frac{I - I_0}{I_0} = \frac{\Delta I}{I_0}$$

Значение ТКЕ определяется долей металлической фазы в композите, и ее увеличение приводит к росту модуля ТКЕ, достигающего максимума при концентрации, соответствующей порогу перколяции.

На Рис. 8 представлены концентрационные зависимости экваториального эффекта Керра ТКЕ для нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  при значениях энергии квантов падающего света 1,14 эВ; 1,97 эВ и 3,17 эВ. Максимум абсолютного значения на концентрационных зависимостях ТКЕ,

соответствующий порогу магнитной перколяции ( $x=37$  ат.%), наблюдается при значениях энергии 1,97 эВ и 3,28 эВ. При меньшей энергии 1,14 эВ отмечается перегиб в этой области  $x$ , соответствующей фазовому переходу из аморфной фазы в нанокристаллическую фазу гексагонального  $\alpha$ -Co

Концентрационная зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  на Рис.9 показывает, что в области порога перколяции ( $x=37$  ат.%) при содержании кобальта  $x < 42$  ат.% наноконпозиты  $Co_x(MgF_2)_{100-x}$  проявляют магнитомягкий характер ( $H_c < 50$  Э), а при большем содержании кобальта ( $x > 42$  ат. %) становятся магнитотвердыми ферромагнетиками с коэрцитивной силой  $H_c \approx 95$  Э (рис.9).

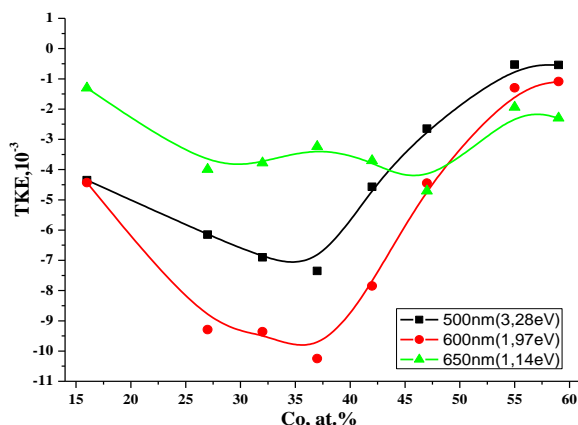


Рис. 8 Концентрационные зависимости экваториального эффекта Керра (ТКЕ) для наноконпозитов  $Co_x(MgF_2)_{100-x}$  при различных значениях энергии падающего света.

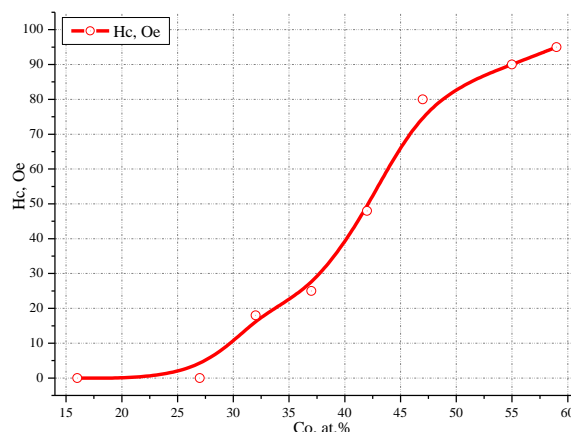


Рис. 9 Концентрационная зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  для наноконпозитов  $Co_x(MgF_2)_{100-x}$

**Четвертая глава** посвящена исследованиям структурных, электрических и магнитных свойств наноконпозитов переменного состава  $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(MgF_2)_{100-x}$  с трехэлементным магнитным сплавом CoFeZr в той же диэлектрической матрице  $MgF_2$ .

Методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа были определены атомный состав и толщины композитов, которые плавно варьировались в диапазоне 0,9–4,3 мкм в соответствии с изменением составов образцов в интервале  $x = 7–51$  ат.%.

Рентгенодифрактометрические исследования показали (Рис.10), что при малом содержании металлической компоненты ( $x < 25$  ат. %) сплав CoFeZr находится в рентгеноаморфном состоянии в виде металлических кластеров, распределенных в нанокристаллической матрице  $MgF_2$ , представленной на дифрактограмме двумя рефлексами (110) и (220). Однако с увеличением содержания сплава до  $\sim 35$  ат.% металлические кластеры CoFeZr аморфной фазы начинают объединяться в нанокристаллы сначала на основе гексагональной плотноупакованной структуры  $\alpha$ -Co (при  $x=35-45$  ат. %). При этом самая интенсивная линия нанокристаллической фазы CoFeZr имеет индексы (100) в отличие от поликристаллического  $\alpha$ -Co с главной

линией (101). Затем с ростом содержания в композите сплава до  $x \sim 43$  at.% уже за порогом перколяции, происходит перестройка кристаллической структуры CoFeZr из гексагональной плотноупакованной  $\alpha$ -Co в объемноцентрированную кубическую решетку  $\alpha$ -Fe с одной самой интенсивной линией (110) и средним размером нанокристаллов сплава 10-15 нм.

Диэлектрическая матрица  $MgF_2$  также претерпевает антибатное превращение из первоначального нанокристаллического состояния при малых содержаниях сплава, в аморфное состояние при  $x \sim 30-35$  ат. %, т.-е. по мере увеличения содержания сплава и образования нанокристаллов CoFeZr.

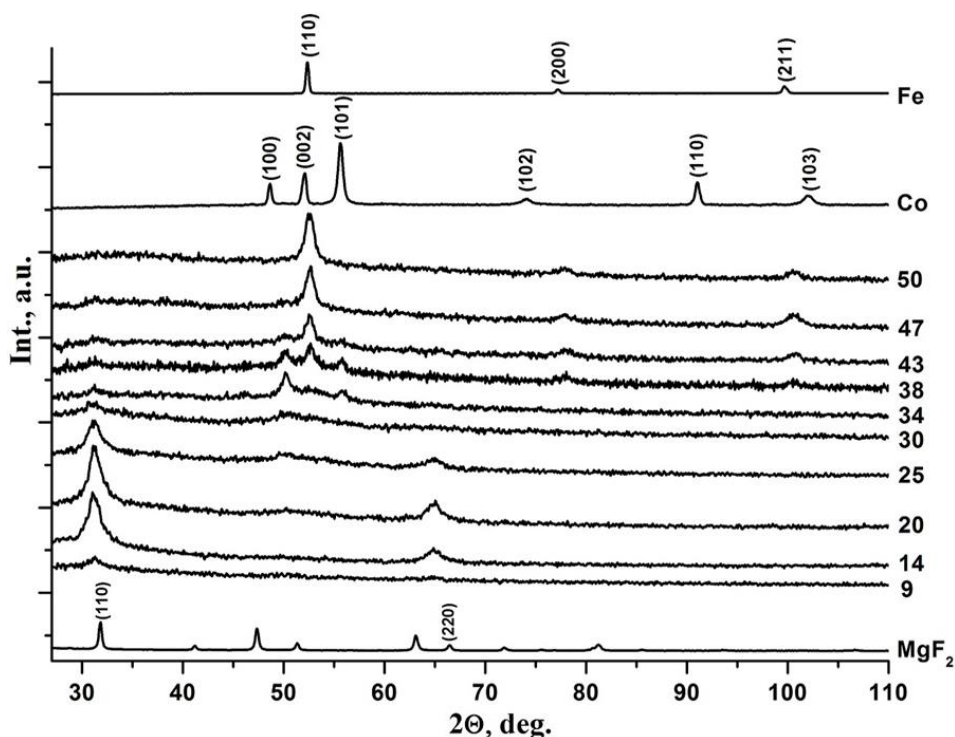


Рис. 10. Дифрактограммы нанокompозитов  $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{45})_x(MgF_2)_{100-x}$  разного состава на стеклянных подложках

Анализ тонкой структуры РФЭС-спектров металлов в сплаве (Рис. 11 и Рис.12) показал, что, в отличие от первой серии нанокompозитов с одним металлическим кобальтом в бескислородной матрице, в составе сплава CoFeZr кобальт не так сильно окислен во всех образцах даже на поверхности композитных слоев, о чем свидетельствует преобладающая по интенсивности низкоэнергетическая компонента РФЭС  $Co2p$  с энергией связи  $E_B = 777.8$  эВ, максимум А которой относится к  $Co2p_{3/2}$  спектру металла в сплаве CoFeZr, а максимум В ( $E_B = 781.0-782.5$  эВ) к спектру двухвалентного кобальта в составе оксида CoO. Особенность С относится к сателлиту переноса заряда, типичного для оксида кобальта. В области около 784 эВ имеется вклад от Fe LMM оже-линии железа, который после 20 мин травления и проявляется в виде особенности В. Таким образом, в верхних слоях пленок особенность В

относится к окислу кобальта, а в более глубоких слоях она уже принадлежит максимуму Fe LMM оже-линии железа (Рис.11).

На рис. 12 приведены РФЭС-спектры спин-дублета Fe  $2p_{3/2,1/2}$  с энергетическим расстоянием 13.5 эВ между компонентами Fe  $2p_{3/2}$  и Fe  $2p_{1/2}$  для двух образцов крайних составов из исследованного интервала со значениями  $x = 9$  ат. % и  $x=48$  ат. %. Все Fe $2p_{3/2,1/2}$  спектры также имеют три особенности тонкой структуры А, В, С. Максимум А (~706.6эВ) относится к Fe $2p_{3/2}$  спектру металла в сплаве CoFeZr, максимум В (~710.3эВ) относится к Fe $2p_{3/2}$  спектру двухвалентного железа в окисле FeO. Особенность С относится к сателлиту переноса заряда.

Анализ тонкой структуры РФЭС железа показал, что, в отличие от спектров кобальта, в спектрах атомов железа в сплаве относительная интенсивность окисленной компоненты двухвалентного железа (максимум В при ~710.3 эВ) преобладает в поверхностных слоях нанокompозитов. Следы окисления атомов железа не исчезают полностью и в более глубоких слоях нанокompозитов (Рис.12).

Однако из трех элементов исходного сплава  $Co_{45}Fe_{45}Zr_{45}$  в составе "бескислородных" нанокompозитов наиболее окисленным оказывается цирконий, полностью окисленный в поверхностных слоях, и около половины атомов которого сохраняют связи с кислородом даже после 20-ти минут ионного травления образцов.

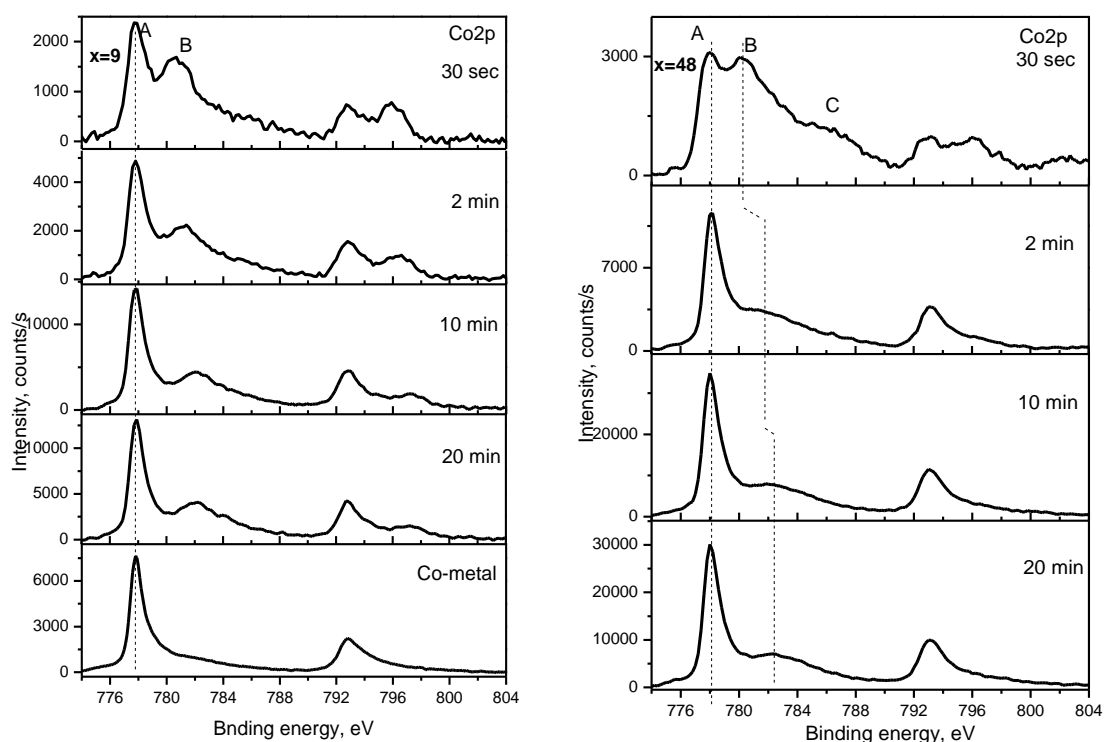


Рис. 11. XPS спин-дублета Co  $2p_{3/2,1/2}$  в нанокompозитах  $(CoFeZr)_9(MgF_2)_{91}$  и  $(CoFeZr)_{48}(MgF_2)_{52}$



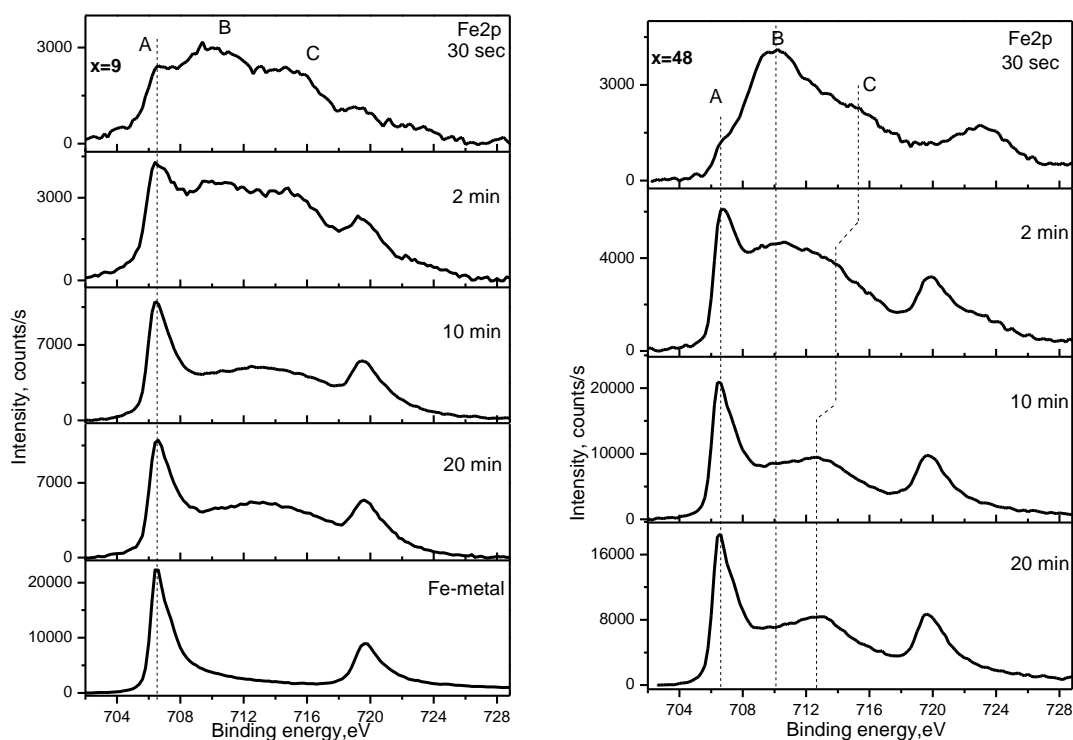


Рис. 12. XPS спин-дублета  $Fe2p_{3/2,1/2}$  в нанокompозитах  $(CoFeZr)_9(MgF_2)_{91}$  и  $(CoFeZr)_{48}(MgF_2)_{52}$

Для однозначного ответа на дискуссионный вопрос о возможном образовании пограничных связей Me-F между атомами металл-диэлектрик с участием атомов железа был привлечен метод Мёссбауэра. На Рис. 14 приведен Мёссбауэровский спектр образца с максимальным содержанием магнитного сплава за порогом перколяции  $x=51$  ат. %, на котором выделяется интенсивный магнитный секстет с параметрами, близкими секстету  $\alpha$ -Fe калибровочного спектра (левый спектр Рис.13). Наряду с магнитным секстетом, в спектре нанокompозита был выделен парамагнитный квадрупольный дублет, принадлежащий фазе  $FeF_2$ . Соотношение площадей  $\alpha$ -Fe-подобного секстета и дублета  $FeF_2$  составляет 82:18 при суммарной площади 100%.

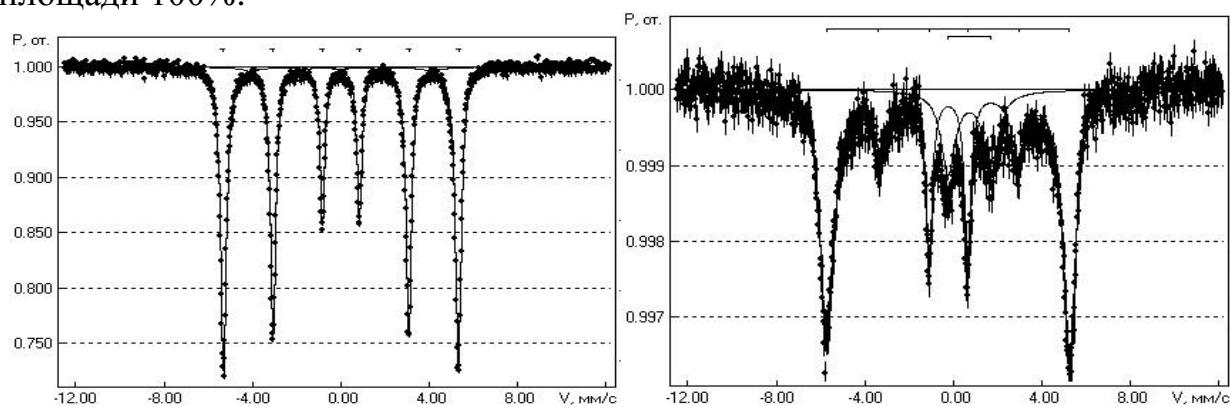


Рис. 13. Калибровочный Мёссбауэровский спектр  $\alpha$ -Fe (слева) и Мёссбауэровский спектр нанокompозита  $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_{51}(MgF_2)_{49}$  (справа)

Концентрационная зависимость электрического сопротивления, приведенная на Рис.14(а) показала изменение его величин в пределах 9 ти порядков от  $R \approx 10^9$  Ом при  $x=7$  ат. % до нескольких единиц Ом при  $x=50$  ат. % сплава в нанокompозите. В переходном интервале от 25 до 34 ат. % наблюдается резкое уменьшение сопротивления при небольшом изменении относительного атомного состава композита, соответствующее порогу перколяции  $x=30$  ат. % (рис.14а).

На рис. 14(б) представлена концентрационная зависимость магнитосопротивления нанокompозитов  $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(MgF_2)_{100-x}$ , измеренная при индуктивности внешнего магнитного поля  $B=5.5$  кГс. С увеличением процентного содержания сплава в интервале от  $x=9$  до  $x=30$  ат. % происходит резкое и нелинейное изменение величин ТМС до максимального значения  $\Delta R/R(0)=2,4$  %. При дальнейшем увеличении содержания металлической компоненты в нанокompозитах ( $x > 30$  ат. %), т.е. за порогом перколяции, ТМС практически исчезает .

Данные по импедансометрии нанокompозитов  $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(MgF_2)_{100-x}$  показывают две различные картины годографов для составов до и после порога перколяции (рис.15). На годографе слева наблюдается полуокружность, которая соответствует типичному характеру поведения RC-цепи для металлических кластеров в диэлектрической матрице. После порога перколяции годограф импеданса имеет вид прямой вертикальной линии.

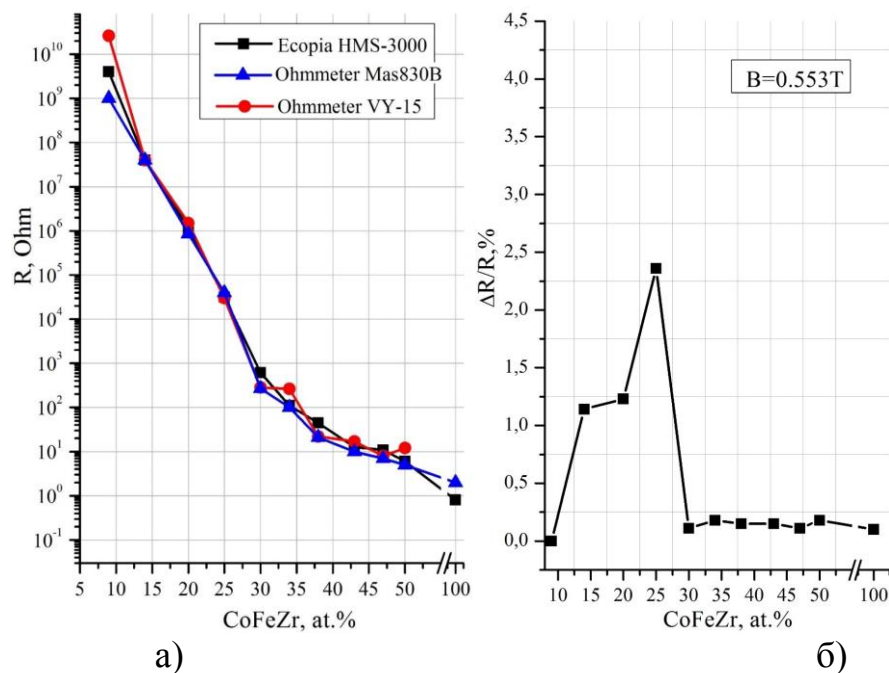


Рис. 14. Концентрационная зависимость электрического сопротивления (а) и магниторезистивного эффекта ТМС (б) образцов системы  $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(MgF_2)_{100-x}$

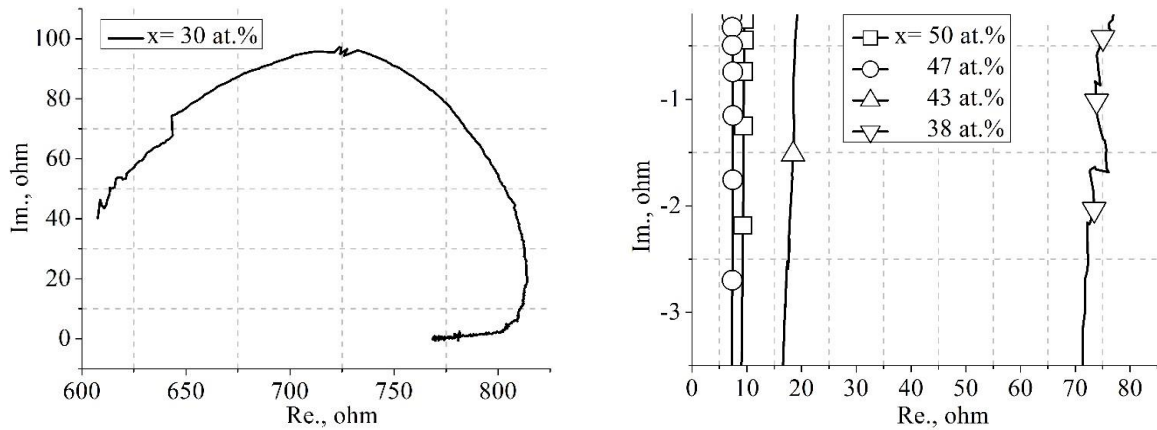


Рис. 15. Годографы импеданса для нанокompозитов  $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  с различным содержанием магнитного сплава:  $x=30$  ат. % (слева) и  $x=50;47;43;38$  ат. % (справа).

Значения сопротивления и емкости нанокompозитов разного состава, определенные по данным импедансометрии (Табл.2), показывают, что емкость композитов в доперколяционной области не превышает значений нескольких пикофарад и только в области порога перколяции ( $x=30$  ат. %) увеличивается на три порядка до нескольких нанофарад. Такое увеличение емкости обусловлено формированием металлических нанокристаллов, распределенных в диэлектрической матрице.

Таблица 2. Концентрационная зависимость полного электрического сопротивления  $R$  и емкости  $C$  образцов системы  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$

$x$ , ат.%	20	25	30	34	38	43	47	50
$R$ , Ом	$13 \cdot 10^6$	$12 \cdot 10^4$	830	136	75	16	8	8
$C$ , ф	$6 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$12 \cdot 10^{-9}$	-	-	-	-

Концентрационные зависимости экваториального эффекта Керра ТКЕ нанокompозитов  $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  при значениях энергии падающего света 1,14 эВ; 1,97 эВ и 3,17 эВ, представленные на Рис. 16 (а), показывают два максимума абсолютных значений ТКЕ, один из которых соответствует образованию нанокристаллов сплава  $\text{CoFeZr}$  гексагональной структуры на основе  $\alpha\text{-Co}$  при  $x=30$  ат.%, а второй максимум при  $x=45$  ат. % соответствует фазовому переходу нанокристаллов из гексагональной структуры в кубическую объемноцентрированную на основе типа  $\alpha\text{-Fe}$ .

В соответствии со значениями коэрцитивной силы, приведенными на Рис.16 (б), образцы всех исследуемых составов нанокompозитов  $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ , в исследуемом интервале  $x=20-51$  ат.% показывают магнитомягкий характер с максимальной величиной  $H_c \approx 30$  Э.

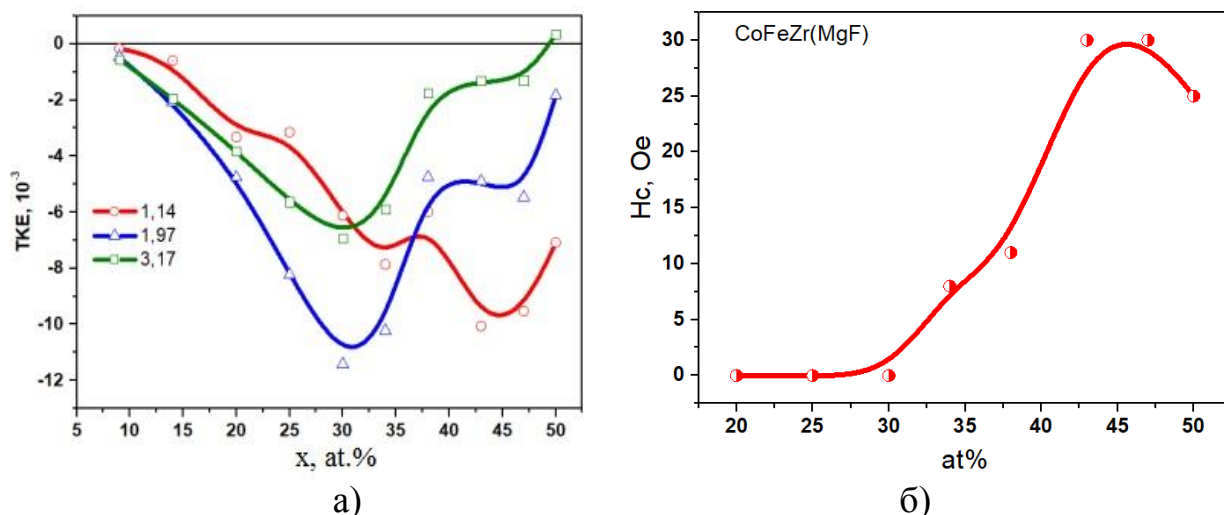


Рис. 16. Концентрационные зависимости ТКЕ при различных значениях энергии падающего света (а) и коэрцитивной силы  $H_c$  (б) для нанокмпозитов  $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(MgF_2)_{100-x}$ .

**Пятая глава** посвящена анализу сравнительных характеристик и сопоставлению полученных результатов по двум системам нанокмпозитов  $Co_x(MgF_2)_{100-x}$  и  $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(MgF_2)_{100-x}$ .

Основные выводы, сформулированные на основе результатов комплексных исследований влияния структурно-фазовых характеристик на электрические и магнитные свойства, проведенных в ходе выполнения диссертационной работы, представлены в **заключении**.

### ВЫВОДЫ:

1. При любом составе образцов в системах металл-диэлектрик  $Co_x(MgF_2)_{100-x}$  и  $(CoFeZr)_x(MgF_2)_{100-x}$  нанокмпозит состоит из одной рентгеноаморфной фазы и одной нанокристаллической фазы. Какая из двух компонент, металл/сплав или диэлектрик, образует нанокристаллы, зависит от относительного содержания металлической компоненты  $x$  и совпадает с порогом перколяции. Средний размер металлических нанокристаллов в обеих системах до и за порогом перколяции изменяется в пределах 10-20 нм.
2. Главная роль атомов циркония трехэлементного сплава CoFeZr состоит в связывании ими примесных атомов кислорода с образованием устойчивых химических связей Zr-O, обнаруженных методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с использованием ионного травления поверхностных слоев нанокмпозитов.
3. На межфазных границах металл-диэлектрик в нанокмпозитах  $(CoFeZr)_x(MgF_2)_{100-x}$  обнаружено образование химических связей Fe-F между атомами железа и фтора с образованием парамагнитной фазы  $FeF_2$ .
4. Значения порогов перколяции в нанокмпозитах  $Co_x(MgF_2)_{100-x}$  37 ат. % и в нанокмпозитах  $(CoFeZr)_x(MgF_2)_{100-x}$   $x=30$  ат. %, определенные по концентрационным зависимостям электросопротивления нанокмпозитов (на стеклянных подложках), совпадают с образованием металлических нанокристаллов в диэлектрической матрице  $MgF_2$ .

5. На концентрационных зависимостях экваториального эффекта Керра в видимой и ближней ИК областях спектра в нанокompозитах  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  наблюдается один максимум на пороге перколяции при  $x=37$  ат.%, совпадающий с образованием нанокристаллов  $\alpha$ -Co гексагональной сингонии.
6. На концентрационных зависимостях экваториального эффекта Керра в видимой и ближней ИК областях спектра в нанокompозитах  $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  появляются два максимума, один из которых соответствует образованию нанокристаллов сплава  $\text{CoFeZr}$  гексагональной структуры на основе  $\alpha$ -Co ( $x=30$  ат.%), а второй максимум при  $x=45$  ат. % соответствует фазовому переходу нанокристаллов из гексагональной структуры в кубическую объемноцентрированную на основе  $\alpha$ -Fe.
7. В нанокompозитах  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  образование нанокристаллов совпадает с достижением электрического и магнитного порогов перколяции при  $x=37$  ат.% и сопровождается переходом из суперпарамагнитного в ферромагнитное состояние, которое с ростом содержания металла ( $>42$  ат. %) приобретает магнитотвердый характер с коэрцитивной силой до 95 Э.
8. В нанокompозитах  $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  образование нанокристаллов совпадает со значениями электрического и магнитного порогов перколяции при  $x=30$  ат.%. Ниже этого значения  $x < 30$  ат.% нанокompозиты проявляют суперпарамагнитные свойства, а при больших значениях  $x > 30$  ат.% становятся мягкими магнетиками и остаются ими далеко за порогом перколяции с максимальным значением коэрцитивной силы  $H_c < 30$  Э.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. The features of CoFeZr alloy nanocrystals formation in film composites of  $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  / E.P. Domashevskaya, S.A. Ivkov, A.V. Sitnikov, et al. // Journal of Alloys and Compounds 870 (2021) 159398
2. Effect of phase transformations of a metal component on the magneto-optical properties of thin-films nanocomposites  $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  / E.A. Ganshina, S.A. Ivkov, E.P. Domashevskaya et al. // Nanomaterials 11 (2021) 1666
3. Образование нанокристаллов металлической или диэлектрической компонент в зависимости от их относительного содержания в композитах  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$  / Э.П. Домашевская, С.А. Ивков, А.В. Ситников, О.В. Стогней, А.Т. Козаков, А.В. Никольский // Физика твердого тела, 61, №2 (2019) 211-219.
4. Исследования электрофизических свойств гранулированных нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  / Домашевская Э.П., Ивков С.А., Барков К.А., et al. // Материалы научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021»
5. Исследования структурных и электрофизических свойств гранулированных нанокompозитов  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  / Домашевская Э.П., Ивков С.А., Середин П.В., Ситников А.В. // Высокоточная диагностика функциональных материалов лабораторные и синхротронные исследования 2021. (13-15 декабря 2021, Воронеж).
6. Особенности структурных свойств гранулированных нанокompозитов  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  / Э. П. Домашевская, С.А. Ивков, А. В. Ситников, et al. // XII Конференция молодых ученых «КоМУ-2020». 2020. С. 68-71
7. Особенности структурных и электромагнитных свойств гранулированных нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  / Домашевская Э.П., Ивков

С.А., Ситников А.В., et al. // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020»

8. Влияние относительного содержания металлической и диэлектрической компонент на фазовый состав и субструктуру нанокompозитов  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  / Домашевская Э.П., Ивков С.А., Ситников А.В., et al. // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2019» с. 885-886

9. XPS, XRD и IR исследования субструктуры и межатомных взаимодействий металлических гранул с диэлектрической матрицей в системе нанокompозитов  $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$  / Домашевская Э.П., Ивков С.А., Ситников А.В., et al. // Рентгеновские и электронные спектры и химическая связь: материалы XXIII Всероссийской конференции с международным участием (Воронеж, 1–4 октября 2019 г.) с.108

10. Влияние относительного содержания металлической и диэлектрической компонент на фазовый состав и субструктуру нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$ ,  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$  / Домашевская Э.П., Ивков С.А., Ситников А.В., Стогней О.В. // Физика твердого тела: сб. материалов XVI Российской научной студенческой конференции (г. Томск, 17–20 апреля 2018 г.) – Томск. – 2018. – 242 с

11. Влияние относительного содержания металлической компоненты на фазовый состав и субструктуру нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$  / Э. П. Домашевская, С.А. Ивков, А. В. Ситников, О. В. Стогней // Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах (г. Воронеж, 8—11 октября 2018 г.) – 2018. — с.255-257

12. Взаимное влияние относительного содержания металлической и диэлектрической компонент на фазовый состав и субструктуру нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$  / Домашевская Э.П., Ивков С.А. // VII Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества». Суздаль. 1-5 октября 2018 г. – 2018, 514 с.

13. Образование нанокристаллов металлической или диэлектрической компонент в зависимости от их относительного содержания в композитах  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$  / Домашевская Э.П., Ивков С.А., et al. // VII Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества». Суздаль. 1-5 октября 2018 г. – 2018, 514с.

14. Mutual influence of the relative content of the metallic and dielectric component on the phase composition and substructure of nanocomposites  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$  / Domashevskaya E.P., Ivkov S.A., Stogney O.V., Sitnikov A.V. // 8th International Conference on Nanotechnology and materials science, Netherlands, Amsterdam, April 24-26, 2019. – p.81

15. Взаимное влияние содержания металлической и диэлектрической компонент на структуру нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$  / Домашевская Э.П., Ивков С.А., Стогней О.В., Ситников А.В. // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых в области получения композитных материалов нового поколения: материалы национального молодежного симпозиума 25-27 сентября 2018 г. ФГБОУ ВО «ВГЛУ». – Воронеж, 2018. – 399 с.

16. Влияние содержания диэлектрической компоненты в композитах  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$  на фазовый состав нанокристаллов / С.А. Ивков // Четвертая международная школа-семинар «Наноструктурированные оксидные пленки и покрытия НСОПП-2017» (9-12 октября 2017, Петрозаводск-Урозеро) -2017.-с.151-158

17. Исследования формирования гетерогенных нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$ ,  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{1-x}$  методом рентгеноструктурного анализа и ИК-спектроскопии. / Домашевская Э. П., Ивков С.А., Ситников А. В., Стогней О. В. // XXIV Международная конференция «ЛОМОНОСОВ-2017» с.674-676

**Работы [1-3] опубликованы в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертации, и рецензируются в международных базах цитирования WoS и SCOPUS.**