

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ФГБУН «Удмуртский федеральный

исследовательский центр Уральского
отделения Российской академии наук»



д.ф.-м.н., профессор
М.Ю. Альес

« 31 » марта 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

- **Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»** на диссертацию Ивкова Сергея Александровича «Особенности структурных и транспортных свойств нанокompозитов $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ и $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния

Актуальность диссертации определяется не только выбором в качестве объектов исследования нанокompозитов типа металл-диэлектрик, в которых металлические частицы в диэлектрической матрице имеют нанометровые размеры порядка 10 нм или являются аморфными, обладающих уникальными нелинейными электрическими и магнитными свойствами и имеющих перспективу практического применения в микроэлектронике и спинтронике для создания различных устройств нового поколения, но и необходимостью получения полной и достоверной информации о влиянии атомного состава, электронного строения и характера

атомных взаимодействий на эти нелинейные свойства и возможности управления ими.

Развитие науки и технологий нанокompозитов привело к масштабным исследованиям материалов металлы (ферромагнетик)-диэлектрик(диамагнетик) из-за открытия в них туннельного магнетосопротивления (ТМС), аналога гигантского магнитного сопротивления (ГМС). Различными научными группами ведутся работы по исследованию нанокompозитных материалов и их уникальных физических свойств, многие из которых отражены в литературном обзоре представленной диссертации.

В зависимости от соотношения содержания металлических кластеров в неметаллической (немагнитной) матрице в этих материалах проявляется так называемый порог перколяции, характеризующийся скачкообразным изменением электрических и магнитных свойств нанокompозита. Эти нелинейные характеристики связаны не только с изменением состава нанокompозита и размерами металлических кластеров, но и волновой природой процессов переноса носителей, обменными взаимодействиями электронов и спинов d-металлов, химическими связями на межфазных границах и другими факторами.

Диссертация Ивкова С.А. посвящена исследованию закономерностей влияния атомного состава и фазообразования на электрические и магнитные свойства в двух системах нанокompозитов переменного состава $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ и $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$, полученных оригинальным способом ионно-лучевого распыления из составных мишеней на вращающиеся подложки. Две системы различались атомным составом металлической компоненты в одинаковой бескислородной диэлектрической матрице MgF_2 : металлический кобальт Co в первой системе и трехэлементный сплав CoFeZr во второй системе.

Для определения влияния этих различий на характер химических связей, магнитоэлектрические, магнитооптические свойства и магнитный порядок, в диссертации был проведен целый комплекс исследований:

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

- с использованием методов РФЭС, ИК-спектроскопии и Мессбауэровской спектроскопии установлен характер межатомных взаимодействий и химических связей на поверхности и в глубине нанокompозитных пленок микронной толщины двух систем;

- получена информация о транспортных свойствах и определены пороги перколяции 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;

- исследования магнитосопротивления и магнитооптических эффектов дали информацию об особенностях магнитных свойств в нанокompозитах двух систем $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ и $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$

Применение такого комплекса исследований позволило расширить фундаментальные знания о характере межатомных взаимодействий в гетерогенных системах сложного состава, их атомном и электронном строении, образовании химических связей на межфазных границах металлических кластеров/нанокристаллов Co или сплава CoFeZr с бескислородной матрицей MgF_2 , определяющих их магнитные свойства, в новых нанокompозитах переменного состава $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ и $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$

Таким образом, результаты, полученные в работе, могут быть использованы не только для оптимизации технологических режимов получения, но и позволяют управлять электромагнитными свойствами

подобных сложных систем, используя данные о межатомных взаимодействиях и структурно-фазовых превращениях в сложных гетерофазных нанокompозитах, что несомненно делает представленную работу **актуальной**.

Основные результаты, их новизна, научная и практическая значимость.

Положения, выносимые автором на защиту, и основные научные результаты получены впервые и являются оригинальными. Они вносят вклад в решение задач по установлению взаимосвязи между атомным и электронным строением, фазовым составом, межатомными взаимодействиями и магнитными свойствами нанокompозитных материалов. Полученные результаты позволяют управлять размерами, формой, качеством межфазных границ наноструктур и изготавливать искусственно созданные материалы с наперед заданными электрическими и магнитными свойствами.

В диссертации Ивков С.А. получил ряд **новых результатов**, представляющих научный и практический интерес, среди которых следует отметить следующие:

- Впервые установлено, что 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 MgF_2 из нанокристаллического в рентгеноаморфное состояние.
- Определены пороги перколяции в нанокompозитах $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ при $x \approx 37$ ат.% и $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ при $x \approx 30$ ат.%, совпадающие с началом образования металлических нанокристаллов и переходом нанокompозитов из суперпарамагнитного в ферромагнитное состояние.
- Впервые обнаружен фазовый переход нанокристаллов CoFeZr из гексагональной в кубическую сингонию за порогом перколяции

нанокompозитов $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ при увеличении содержания металлической составляющей до $x=42$ ат. %.

- Впервые установлено, что 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 $\alpha\text{-Co}$, тогда как на концентрационных зависимостях того же эффекта 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.

Полученные экспериментальные данные внушительного объема с использованием самых разнообразных физических методов и установленные на их основе закономерности важны для оптимизации методов формирования и управления нелинейными свойствами нанокompозитных материалов. Результаты диссертации могут быть полезными для организаций, занимающихся как созданием новых многофункциональных материалов, так и их изучением. Среди таковых можно отметить ИАО «Микрон» (г. Москва), ФТИ им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), СПбГУ (г. Санкт-Петербург), МГУ (г. Москва), ИИУ им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород), ЛЭТИ (г. Санкт-Петербург), ЮФУ (г. Ростов-на-Дону), НГУ (г. Новосибирск), ФТИ УдмФИЦ УрО РАН (г. Ижевск), ИФМ УрО РАН (г. Екатеринбург), ИФТГ РАН (г. Москва), ИФИ СО РАН (г. Новосибирск), ИИХ СО РАН (г. Новосибирск), ИФМ РАН (г. Нижний Новгород), ВГТУ (г. Воронеж), ВЗПП-С (г. Воронеж).

Общие замечания по диссертации:

1) В кратком литературном обзоре недостаточное внимание уделено описанию свойств диэлектрика MgF_2 , редко используемого в качестве матрицы магнитных нанокompозитов, по сравнению с оксидными

диэлектриками SiO_2 и Al_2O_3 . В чем его ожидаемые преимущества и недостатки и оправдались ли они.

2) По результатам третьей главы отсутствует сравнение полученных данных с проведенными ранее другими авторами, пусть и неполными, исследованиями нанокompозитов в системе $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ в той части, где эти сравнения можно провести.

3) По результатам четвертой главы возникает вопрос, почему при исследовании возможных химических связей атомов железа с фтором на межфазных границах металлический сплав -диэлектрик в нанокompозите $(\text{CoFeZr})_{51}(\text{MgF}_2)_{49}$ так сильно различаются результаты двух разных методов исследования: рентгеноэлектронные спектры указывают лишь на несколько процентов возможных связей металл-фтор в поверхностных слоях нанокompозита, в то время как спектроскопия Мессбауэра дает около 18 процентов атомов железа ферромагнитного сплава, образующих связи Fe-F в диамагнитном FeF_2 на межфазных границах.

Приведенные в диссертации результаты, сделанные выводы и выдвигаемые на защиту положения соответствуют научной специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния. Автореферат диссертации полно отражает её содержание, а положения, выносимые на защиту, соответствуют основным результатам работы.

Заключение

Диссертация Ивкова С.А. «Особенности структурных и транспортных свойств нанокompозитов $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ и $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ », представляет собой законченное исследование современных востребованных наноструктур, используемых при создании различных устройств микроэлектроники, спинтроники и СВЧ-электроники.

Научные результаты, впервые полученные автором, имеют значение для физики конденсированного состояния, важны для понимания процессов самоорганизации в сложных гетерофазных структурах и их взаимосвязи с физическими свойствами данных материалов. Основные результаты

диссертации докладывались на международных и национальных научных конференциях и семинарах. Представленные в диссертационной работе основные результаты и выводы обладают **научной аргументацией, практической значимостью полученных результатов**, подкреплены как полученными экспериментальными данными, так и сопоставимостью с результатами других работ, представленных данными, опубликованными в ведущих отечественных и зарубежных изданиях.

Работа содержит достаточное количество иллюстраций, что облегчает восприятие результатов и подтверждает сделанные выводы.

В целом, представленный в диссертационной работе материал хорошо представлен и последовательно изложен. Каждая глава завершается выводами, акцентирующими внимание на основных положениях, представленных к защите.

Диссертация представляет самостоятельный труд, дающий полное представление, как о состоянии проблемы влияния структурно-фазовых превращений на функциональные свойства наноматериалов, так и о научных результатах, полученных автором работы. Структура, содержание и оформление диссертации и автореферата отвечают требованиям нормативных документов, а тема диссертации полностью соответствует выбранной научной специальности. Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации.

Ивков С.А. имеет 17 научных работ по теме диссертации, из которых 3 статьи в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ и включенных в международные базы данных Scopus и Web of Science. Результаты работы докладывались на Всероссийских и Международных научно-технических конференциях.

Основное содержание диссертации ясно и в полном объеме отражено в автореферате.

В целом, по объему выполненной работы, актуальности полученных результатов, новизне и значимости основных положений, выносимых на

защиту, диссертация удовлетворяет требованиям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Ивков Сергей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8- «физика конденсированного состояния».

Диссертационная работа, автореферат и отзыв на диссертацию Ивкова Сергея Александровича рассмотрены и одобрены на расширенном семинаре Отдела физики и химии поверхности (протокол № 1 от 31 марта 2022 года).

Отзыв подготовил главный научный сотрудник лаборатории РЭС ФТИ УдмФИЦ УрО РАН, профессор, доктор физико - математических наук по специальности 1.3.8 (01.04.07) «Физика конденсированного состояния».

Шабанова Ирина Николаевна

Подпись Шабановой И.Н. заверяю:

Начальник отдела кадров

Воронцова О.С.

Ведущая организация



Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Удмуртский федеральный исследовательский центр Урального отделения Российской академии наук»

Почтовый адрес: 426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34

Телефон: 8 (3412) 50-82-00, 8 (3412) 50-88-10

E-mail: udnc@udman.ru