

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Ивкова Сергея Александровича «Особенности структурных и транспортных свойств нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ », представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

В текущем столетии стремительно развиваются исследования физических явлений в наноструктурированных материалах. Очевидно, что сформировалось новое научное направление, одним из объектов которого являются конденсированные среды с неоднородностями структуры нанометрового масштаба. Особый интерес среди этого класса материалов занимают гранулированные композиты металл-диэлектрик, в которых металлические частицы имеют субмикронный размер, наноразмеры порядка 10 нм или являются аморфными, вследствие 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), различающихся механизмами переноса носителей заряда и спина. Поэтому цель диссертации Ивкова С.А., посвященной установлению закономерностей влияния атомного состава и фазообразования на транспортные и магнитные свойства гранулированных нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ , представляется актуальной, как с научной, так и с практической точек зрения.

Наиболее важными результатами, имеющими несомненную научную ценность, являются:

1. Получена информация 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. 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.%.
2. 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.%.
3. В широком диапазоне изменения составов нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  определены транспортные и магнитные характеристики путем измерения соответствующих характеристик. 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  $\text{CoFeZr}$  ( $x=30$  ат. %), а второй максимум при  $x=45$  ат. % соответствует фазовому переходу гексагональной структуры в кубическую объемноцентрированную.

4. Впервые получены комплексные экспериментальные данные о характере межатомных взаимодействий поверхностных и глубинных нанослоев гранулированных нанокомпозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ .

**Практическая значимость работы** заключается в том, что результаты, полученные в работе, могут быть использованы для оптимизации технологических режимов получения гранулированных нанокомпозитов, 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.

Достоверность и обоснованность основных положений и выводов диссертации обеспечивается использованием широкого арсенала методов исследования (рентгеновская дифрактометрия (РД), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), растровая электронная микроскопия (РЭМ), инфракрасная спектроскопия (ИК), Мессбауэровская спектроскопия), поверенного аналитического оборудования, средств испытаний и измерений. Представленные в работе результаты исследования хорошо согласуются между собой.

В качестве замечаний можно отметить следующие:

1. В положении, выносимом на защиту, автор утверждает, что порог перколяции в нанокомпозитах  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  при  $x=37$  ат.% совпадает с началом образования металлических нанокристаллов и с переходом нанокомпозитов из суперпарамагнитного в ферромагнитное состояние.

Однако, как правило, переход нанокomпозитов из суперпарамагнитного в ферромагнитное состояние наблюдается при меньших значениях концентрации, соответствующих порогу протекания. Об этом свидетельствуют и результаты исследований магнитных свойств композитов  $\text{Co}_{32}(\text{MgF}_2)_{68}$  (рис. 3.40), для которого еще наблюдается петля магнитного гистерезиса, свидетельствующая о его ферромагнитном состоянии.

2. В работе установлено много интересных закономерностей, которые автор констатирует, но не отвечает на вопрос, почему они наблюдаются. Например не понятно, почему при низкой концентрации кобальта в нанокomпозите  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  наблюдается аморфное состояние, а при больших - нанокристаллическое. Для формирования аморфной структуры элементарного вещества при комнатной температуре к нему обычно добавляют определенную концентрацию аморфизатора, однако об элементном составе гранул в данной системе, автор ничего не говорит.

3. Отдельное замечание касается формулировок, встречающихся в работе. Так автор исследовал магнитосопротивление в синтезированных композитах и в литературном обзоре отмечает, что проявление эффекта ТМС или ГМС отличается только в выборе изолирующего слоя между слоями ферромагнетиков. В случае ТМС в качестве изолирующего туннельного барьера используется слой диэлектрика, а в случае ГМС ферромагнитные слои чередуются с проводящими немагнитными слоями. Однако какова

физическая природа изменения электрического сопротивления при наложении внешнего магнитного поля, автор не говорит.

4. В тексте диссертации имеются также замечания по оформлению работы:

- в отдельных подписях к рисункам пропущен состав исследованного сплава (для рис. 4.9 – 4.11 – то, что относится к рис. (а), а для рис. 4.12-4.14 – для рис. (б));

- в работе имеются отдельные погрешности, связанные с орфографией (например, в подписе к рис. 4.12 приведено два слова «образцов», не ясно к какому рисунку относится ссылка на рис. 37 на стр. 101?).

Однако, вышеперечисленные недостатки носят характер пожеланий для будущей работы и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Рассматривая диссертационную работу Ивкова С.А. в целом, следует отметить, что она является законченной научно-исследовательской работой, обладающей актуальностью, новизной, научной и практической значимостью. Основные результаты работы достаточно подробно опубликованы в виде научных статей в ведущих российских и зарубежных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в том числе индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Содержание диссертации с необходимой полнотой отражено в автореферате.

Диссертация Ивкова С.А. «Особенности структурных и транспортных свойств нанокompозитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ » выполнена на высоком научном уровне и своей актуальностью, степенью обоснованности положений, результатов и выводов соответствует всем

критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым 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.

Официальный оппонент, профессор  
кафедры физики твердого тела  
Воронежского государственного  
технического университета,  
д.ф.-м.н. (специальность 01.04.07),  
профессор

Юрий Егорович Калинин

16.04.2022 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Воронежский государственный технический  
университет».

Почтовый адрес: 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14.

Тел.: +7 (473) 246-66-46

E-mail: kalinin48@mail.ru

Подпись профессора кафедры физики твердого тела Факультета  
радиотехники и электроники ВГТУ

Ю.Е. Калинина удостоверяю:



Ученый секретарь

В.П. Трофимов