

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Фошина Вадима Анатольевича

«Электрические и магниторезистивные явления в тонкопленочных гетерогенных системах Co/CoO, (CoFeB-SiO<sub>2</sub>)/ZnO, ZnO/C», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

В последние годы стремительно развиваются исследования физических явлений в наноструктурированных и композитных материалах. Очевидно, что сформировалось новое научное направление в материаловедении, одним из объектов которого являются конденсированные среды с неоднородностями структуры нанометрового масштаба. Особый интерес в этом классе материалов представляют гранулированные композиты металл-диэлектрик, в которых металлические частицы имеют субмикронный размер в пределах 1-100 нм, а также и многослойные структуры на их основе. Указанные системы демонстрируют уникальные нелинейные электрические и магнитные свойства. Одной из мотиваций для изучения металлических наночастиц в диэлектрических матрицах является открытие эффекта туннельного магнетосопротивления (ТМС), обеспечивающего создание новой компонентной базы запоминающих устройств. Первые подобные элементы создавались на основе тонкопленочных гетероструктур ферромагнетик/диэлектрик.

В настоящее время большой интерес вызывают структуры нового типа – металлические наночастицы в диэлектрической матрице, концентрация которых соответствует границе порога перколяции. Туннельные явления в таких структурах могут обеспечивать гигантский магниторезистивный эффект, а технология их получения значительно проще, и, следовательно, дешевле, чем технология «классических» ТМС-структур. В связи с этим **актуальность** тематики исследования Фошина В.А., посвящённой установлению основных закономерностей влияния морфологии, толщины слоев и других факторов на электрические и магниторезистивные явления в тонкопленочных гетероструктурах Co/CoO, (CoFeB-SiO<sub>2</sub>)/ZnO, ZnO/C не вызывает сомнения.

К наиболее важным научным результатам, имеющим несомненную **научную ценность**, можно отнести следующие:

В диссертации получены следующие **основные результаты**:

1. Методом ионно-лучевого распыления составной мишени в атмосфере Ar и (Ar + O<sub>2</sub>) были синтезированы нанокompозиты Co<sub>n</sub>(CoO)<sub>100-n</sub>. Автором установлено, что ионно-лучевое распыление составной мишени Co + CoO позволяет синтезировать нанокompозиты Co<sub>n</sub>(CoO)<sub>100-n</sub>, и управлять их составом (значением *n*). Такие структуры представляют собой перколяционные системы с порогом протекания, положение которого смещается в сторону меньших концентраций металлической фазы кобальта при добавлении кислорода в распылительную камеру.

2. Для составов нанокompозитов  $\text{Co}_n(\text{CoO})_{100-n}$  вблизи порога перколяции на диэлектрической стороне наблюдается отрицательное ТМС с гистерезисом, который коррелирует с магнитным гистерезисом на петлях намагниченности. Природа магнитного гистерезиса ансамбля наночастиц Co при столь малом содержании кобальта связывается как с морфологией образцов, так и с возможным усилением магнитной анизотропии вблизи интерфейса Co/CoO из-за эффекта магнитной близости.

3. Методом ионно-лучевого распыления двух мишеней (составной  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  с навесками  $\text{SiO}_2$  и керамической ZnO) синтезированы многослойные гетероструктуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$ , (где 50 – число бислоев в пленке). В синтезированных структурах автором установлено усиление магнитосопротивления при толщине полупроводниковых прослоек около 2 нм и снижение до нулевого значения при толщине прослоек около 4 нм.

4. Автором показано, что температурная зависимость удельного электрического сопротивления нанокompозитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ , полученных на вращающихся подложках, описывается законом прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка Эфроса–Шкловского «1/2». Для многослойных гетероструктур  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$  температурная зависимость удельного электрического сопротивления в диапазоне температур 80 – 280 К подчиняется закону Мотта «1/4», характерному для прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми. Тем самым, продемонстрирована возможность контролируемого изменения механизма электронного транспорта за счёт модуляции плотности электронных состояний на уровне Ферми путём изменения толщины полупроводниковых прослоек ZnO.

**Новизна** данной диссертации заключается в комплексе проделанных работ. Автору путём систематических исследований с варьированием большого количества технологических параметров и экспериментальных условий удалось установить закономерности, связывающие морфологию, толщину слоев и другие технологические режимы с одной стороны и механизмы электрической проводимости, характер электрических и магниторезистивных явлений в исследуемых тонкопленочных гетероструктурах – с другой.

**Практическая значимость** полученных результатов состоит в следующем:

Полученные в работе режимы создания гетерогенных нанокompозитов и многослойных наноструктур могут быть использованы при разработке элементов памяти с высокой плотностью записи и пониженной относительно текущих технических решений себестоимостью. Предложена методика повышения магниторезистивных свойств нанокompозиционных материалов ферромагнетик–диэлектрик путем введения в него полупроводниковой прослойки оксида цинка и отработаны режимы синтеза для структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$ .

**Достоверность и обоснованность** основных положений и выводов диссертации обеспечиваются использованием широкого арсенала методов исследования (рентгеновская дифрактометрия (РД), просвечивающая электронная микроскопия, растровая электронная микроскопия (РЭМ), и др.), поверенного аналитического оборудования, средств испытаний и измерений. Представленные в работе результаты исследования хорошо согласуются между собой. Значимость полученных результатов подтверждаются поддержкой грантами № FZGM–2020–0007, FZGM–2023–0006, в которых приведены результаты этих исследований, докладами на международных конференциях.

Изложенные в диссертации результаты прошли апробацию на международных конференциях. По теме диссертации автором опубликовано 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, а также несколько других статей и тезисов докладов на научных конференциях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. В литературном обзоре используются термины, неверно переведённые с английского языка. Например, «модель первого принципа», «применение сильного магнитного поля приводит к выравниванию магнитных моментов» («приложение» вместо «применение», неверный перевод слова «align», точнее «выстраивание в одном направлении»). Примеры не единственные.

2. Физическая величина  $\sigma$  (спин-зависимая проводимость) в список обозначений не включена, её физический смысл в тексте диссертации не обсуждается. Это затрудняет понимание анализа, связанного с данным параметром.

3. Согласно главе 2, для варьирования состава композитов использовались составные мишени с неравномерно установленными на них навесками, что позволяло в одном технологическом цикле на одной подложке получать участки с разным составом. В диссертации не указано, каким образом производилась дальнейшая обработка таких структур для проведения измерений с одним значением состава. Можно предположить, что они разрезались в направлении постоянного состава, но такую существенную деталь следовало бы указать.

4. При анализе магниторезистивных эффектов рассматриваются, преимущественно, только качественные модели, дающие объяснение этих явлений в общем виде. Можно понять, что рассматриваемые системы являются чрезвычайно сложными для количественного анализа, тем не менее, расширенное рассмотрение физических процессов, протекающих в наночастицах при введении магнитного поля, хорошо дополнило бы работу.

5. В тексте встречаются опечатки, неточности и не очень удачные формулировки. Например, «наноразмерные частиц», или «необходимость, чтобы электрон обладал энергией...». Название рисунка 1.11 «Оптическая

микрофотография», но микрофотографии на рисунке не приведено. Таких примеров немного, но всё же на это стоило бы обратить внимание.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы и не влияют на ее основные выводы и защищаемые положения.

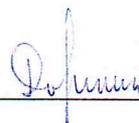
### **Заключение по диссертационной работе**

Диссертация представляет собой научно-исследовательскую работу, которая по актуальности поставленных задач, научной новизне, теоретической и практической значимости, достоверности полученных результатов, степени обоснованности выводов и рекомендаций, а также по объёму выполненных исследований и уровню работ, опубликованных в открытой печати, полностью соответствует квалификационным требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года (со всеми последующими изменениями), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, а её автор Фошин Вадим Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

### **Официальный оппонент:**

Доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского физико-технического института ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Дорохин Михаил Владимирович



30.09.2025 г.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.10 «Физика полупроводников».

Почтовый адрес: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.;

Тел. +7(831)462-31-20;

E-mail: dorokhin@nifti.unn.ru.

Подпись ведущего научного сотрудника научно-исследовательского физико-технического института ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Дорохина М.В. удостоверяю:

ПОДПИСЬ УДО

ЗАМ. НАЧАЛЬНИКА  
НИГУ ИМ. Н.

