

УТВЕРЖДАЮ

Ученой и инновационной  
деятельности ФГБОУ ВО  
«Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина»,  
\_\_\_\_\_ Н.Н. Новикова

« 16 » сентября 2025 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Сыктывкарский государственный университет имени Питирима  
Сорокина» 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

### Актуальность темы диссертации

В последние годы повышенный интерес исследователей направлен на изучение физических явлений в наноструктурированных материалах, яркими представителями которых являются твердые гетерогенные тела с неоднородностями структуры нанометрового масштаба. Устройства электронной техники, изготавливаемые из наноматериалов должны обладать рядом преимуществ: малые габариты, управляющие напряжения и времена срабатывания. Для таких систем характерно проявление нелинейных свойств в чрезвычайно малых внешних полях, изменение температур фазовых превращений, проявление новых механизмов транспорта электрических зарядов (электропроводности, термоэдс, магнитосопротивления, магнитной термоэдс) и др. Существует два подхода к изготовлению низкоразмерных структур конденсированной твердотельной среды, размеры которых не превышают нескольких нанометров. Во-первых, можно путем улучшения технологических приемов добиваться сверхвысокого разрешения при обработке поверхности, т.е. все более уменьшать и уменьшать размеры объектов, из которых формируются микроскопические структуры. В основном вся технология микроэлектроники 20-го века развивалась по этому пути. Или измельчать макроскопические объекты до наноразмерных частиц, из которых по керамической технологии создавать гетерогенные наноструктурированные материалы.

Во-вторых, можно использовать физические закономерности роста наноструктур из отдельных атомов, когда нужные структуры «вырастают» сами (эффект самоорганизации).

Наука только подошла к разработке такого, несомненно, более перспективного, подхода и исследованию физических свойств подобных наноструктур, к числу которых относятся наноккомпозиты и многослойные наноструктуры. На них уже удалось получить ряд замечательных в практическом отношении результатов: прежде всего, это гигантский магниторезистивный эффект (заметное влияние внешнего магнитного поля на величину электрического сопротивления). На основе данного эффекта ряд фирм уже разрабатывает магниторезистивные запоминающие устройства, проектирует спиновые процессоры, матричные сенсорные системы и другие элементы электронной техники. В связи с вышесказанным тема диссертации Фошина В.А., основной целью которой является установление основных закономерностей влияния морфологии, толщины слоев и других факторов на электрические и магниторезистивные явления в тонкопленочных гетероструктурах  $\text{Co}/\text{CoO}$ ,  $(\text{CoFeB-SiO}_2)/\text{ZnO}$ ,  $\text{ZnO}/\text{C}$ , представляется **актуальной**.

К основным результатам, полученным автором и имеющим несомненную научную ценность, можно отнести следующие:

- Методом ионно-лучевого распыления составной мишени в атмосфере  $\text{Ar}$  и атмосфере  $(\text{Ar} + \text{O}_2)$  были синтезированы наноккомпозиты  $\text{Co}_n(\text{CoO})_{100-n}$ . На основании анализа концентрационных зависимостей удельного электрического сопротивления и термоэдс установлено, что полученные системы являются перколяционными. Показано, что введение в распылительную камеру кислорода смещает положение порога протекания в сторону меньших концентраций металлической фазы, что связывается с особенностями морфологии пленок, когда малые металлические наночастицы  $\text{Co}$  расположены на границах крупных частиц  $\text{CoO}$ , а также уменьшением размера включений металлической фазы.

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

- Методом ионно-лучевого распыления двух мишеней (составной  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  с навесками  $\text{SiO}_2$  и керамической  $\text{ZnO}$ ) 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). Комплексное исследование структурных, электрических, магниторезистивных свойств многослойных гетероструктур  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$  показало зависимость этих свойств от толщины полупроводниковых прослоек  $\text{ZnO}$ .

- Показано, что температурная зависимость удельного электрического сопротивления нанокompозитов  $(\text{Co}_40\text{Fe}_40\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ , полученных на вращающуюся подложку, 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. Установлено, что плотность электронных состояний на уровне Ферми нелинейно растет с увеличением толщины полупроводниковых прослоек ZnO.

**Теоретическая значимость** заключается в том, что полученные закономерности дополняют знания о механизмах электрической проводимости в гетерогенных системах и показывают, как изменяя морфологию, толщину слоев и другие технологические параметры, управлять электрическими и магниторезистивными явлениями в тонкопленочных гетероструктурах.

#### **Практическая значимость:**

- Практическая значимость данной работы заключается в том, что полученные в работе режимы получения гетерогенных нанокompозитов и многослойных наноструктур могут быть использованы при использовании результатов работы на промышленных предприятиях.

- 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 обеспечивается применением современных методов для аттестации исследуемых образцов (рентгенофазовый анализ, методики измерения электропроводности, магниторезистивных свойств, термоэдс, высокоразрешающая электронная микроскопия и др.) и подтверждается воспроизводимостью результатов, их сопоставимостью с результатами работ других авторов. Обсуждение опирается на надёжно установленные факты и закономерности. Все выводы работы соответствуют содержанию разделов диссертации.

#### **Рекомендации по использованию результатов работы**

Полученные в диссертации новые знания в области электрических и магниторезистивных свойств в тонкопленочных гетероструктурах развивают представления о влиянии условий синтеза на физические свойства нанокompозитов, многослойных нано систем и могут быть использованы такими научными и

производственными коллективами, как НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва), Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (г. Москва), ФТИ им. Иоффе РАН, (г. С.-Петербург), «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (г. Москва), Белгородский государственный национальный исследовательский университет (г. Белгород) и др.

Изложенные в диссертации результаты хорошо обоснованы и прошли апробацию на международных, межгосударственных и внутривузовских конференциях. По теме диссертации автором опубликовано 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 5 работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

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

1. При исследовании многослойных структур принципиально важно то, как располагаются зонды на образцах и как ориентирован ток относительно слоёв системы («перпендикулярно» слоям или «вдоль» слоёв). В диссертации и автореферате про это ничего не сказано.

2. В диссертации и автореферате при обозначении многослойных систем всегда указывается общее количество слоёв (25, 50, 60). Представляется, что это излишне, поскольку получаемые при исследовании МНС характеристики являются интегральными и изменение числа слоёв на 10 или 20 не должно влиять на получаемые результаты. Указание точного числа слоёв позволяет предполагать, что изменение количества слоёв даже на 1 может влиять на свойства всей системы в целом.

3. Автором для установления многослойности структур был проведен и приведен рентгеноструктурный анализ в малых углах Брэгга. Было бы полезно, например, для системы  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$  предварить результаты рисунка 3.6 демонстрацией процедуры нумеровки пиков, которые использовались для оценки.

4. В диссертации на странице 101 предпоследний абзац: «С понижением температуры на полевых зависимостях *запороговых* гетероструктурах  $(\text{Co}/\text{CoO})_{60}$ , появляются участки положительного магнитосопротивления, характеризующиеся наличием максимума в области полей порядка 3 кЭ, которое также является изотропным». Как видно из рисунка 5.10 на *допороговых* появляются участки положительного магнитосопротивления. Возникает вопрос – это описка или область положительного магнитосопротивления есть как на допороговых, так и на запороговых образцах.

5. Работа в целом хорошо оформлена, однако, как в автореферате, так и в диссертации встречаются опечатки и описки (на стр. 40, 67 и некоторых других).

## Заключение по диссертационной работе

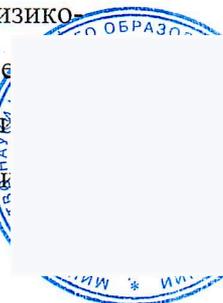
Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, которая по актуальности поставленных задач, научной новизне и практической значимости, а также по количеству работ, опубликованных в открытой печати, соответствует квалификационным требованиям п. 9-14 "Положения о присуждении учёных степеней", утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (со всеми последующими изменениями), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки).

Отзыв подготовлен заведующим кафедрой радиофизики и электроники (РФЭ) Сыктывкарского государственного университета имени Питирима Сорокина, доктором физико-математических наук, профессором, был заслушан и обсуждён на заседании кафедры РФЭ ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина» 16 сентября 2025 года (протокол № 1).

Присутствовали на заседании: 10 человек. Результаты голосования за проект отзыва: "за" – 10 человек, "против" – нет, "воздержались" – нет.

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния (физико-математические науки), профессор, заведующий кафедрой радиофизики и электроники ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина»

Л. Н. Котов



СОВСТВЕННОРУЧНУЮ ПОДПИСЬ  
Льодиида Нафанаиловна  
ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина»  
ЗАВЕРЯЕТ  
Дек. Заброва Св  
«16» сентября 2025 г.

167001, Северо-Западный федеральный округ, Республика Коми, г. Сыктывкар, Октябрьский пр-кт, 55, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина», тел. +7 (8212) 390-309, e-mail: ssu@syktsu.ru

Отзыв подписал: заведующий кафедрой радиофизики и электроники ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина», д.ф.-м.н., профессор Котов Леонид Нафанаилович

Отзыв утвердил: проректор по научной и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина», д. пед. н., доцент Новикова Наталья Николаевна