

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Фошина Вадима Анатольевича на тему «Электрические и магниторезистивные явления в тонкопленочных гетерогенных системах Co/CoO, (CoFeB-SiO₂)/ZnO, ZnO/C», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИИ

Одной из актуальных задач современного материаловедения является разработка технологии формирования слоистых и мультислойных гетероструктур, обладающих функциональными свойствами для конкретных практических приложений в магнитной электронике и сенсорной технике. Так, новые магнитные материалы с управляемыми магнитными и электрическими свойствами могут быть успешно интегрированы в микроэлектронную технику. Возможность контролируемого управления функциональными параметрами таких пленок открывает перспективы их применения в различных устройствах электронной техники. Многослойные тонкие пленки на основе ферромагнитных и антиферромагнитных слоев с немагнитной прослойкой обнаруживают ряд эффектов и новых явлений, связанных с магнитоэлектрическим, магнитооптическим и магниторезистивным эффектами, и могут использоваться в оптоэлектронике, в спиновой электронике, магнитной памяти и сенсорной технике. Однако, не смотря на большое количество теоретических и экспериментальных работ по данной тематике, механизмы многих наблюдаемых явлений до конца еще не совсем понятны и требуют все новых и новых экспериментальных данных. В связи с этим актуальность тематики исследования Фошина Вадима Анатольевича, посвящённой установлению основных закономерностей влияния морфологии, толщины слоев и других факторов на электрические и магниторезистивные явления в тонкопленочных гетероструктурах Co/CoO, (CoFeB-SiO₂)/ZnO, ZnO/C. не вызывает сомнения.

СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ, СФОРМУЛИРОВАННЫХ В ДИССЕРТАЦИИ

Обоснованность научных положений и выводов диссертации обусловлена тем, что они сформулированы на основе большого объёма экспериментальных данных, а также согласованностью результатов, полученных с помощью разных исследовательских методик. Сформулированные выводы не противоречат теоретическим данным других исследователей, опубликованным в открытой печати, и согласуются с общепринятыми концепциями физики конденсированного состояния.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Методом ионно-лучевого распыления составной мишени в атмосфере Ar и атмосфере (Ar + O₂) были синтезированы нанокompозиты Co_n(CoO)_{100-n}. Автором установлено, что ионно-лучевое распыление составной мишени Co + CoO позволяет синтезировать нанокompозиты Co_n(CoO)_{100-n}, представляющие собой перколяционные системы с порогом протекания, положение которого смещается в сторону меньших концентраций металлической фазы кобальта при добавлении кислорода в распылительную камеру.

2. Методом ионно-лучевого распыления при послойном осаждении из двух мишеней в атмосфере Ar были синтезированы многослойные гетероструктуры (Co/CoO)₆₀, магнитосопротивление которых до порога протекания определяется механизмом спин-зависимого туннелирования между гранулами и кластерами металлического кобальта, а за порогом конкурирующими вкладами анизотропного магнитосопротивления перколяционной сеткой ферромагнитного кобальта и лоренцева магнитосопротивления.

3. Методом ионно-лучевого распыления двух мишеней (составной Co₄₀Fe₄₀B₂₀ с навесками SiO₂ 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 полупроводниковых прослоек около 4 нм.

4. Автором установлено, что температурная зависимость удельного электрического сопротивления нанокompозитов (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)₃₄(SiO₂)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. В работе получены и другие научные результаты, имеющие несомненную научную значимость.

Новизна данной диссертации заключается в том, что автору удалось показать, как изменяя морфологию, толщину слоев и другие технологические параметры, изменять механизмы электрической проводимости и управлять электрическими и магниторезистивными явлениями в исследуемых тонкопленочных гетероструктурах.

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

- 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 нанокomпозиционных 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 НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ, СФОРМУЛИРОВАННЫХ В ДИССЕРТАЦИИ

Полученные результаты следует считать достоверными, так как в работе Фошина Вадима Анатольевича использовался широкий спектр современных методов исследования. Результаты работы представлены экспериментальными данными, полученными с помощью либо взаимодополняющих друг друга методов исследования, например, рентгеновская спектроскопия и просвечивающая электронная микроскопия, либо с использованием независимых методик исследования, подтверждающих полученные экспериментальные данные. Например, данные по немоному изменению угловых зависимостей намагниченности тонких пленок были подтверждены исследованиями магнитной доменной структурой магнитно-оптическим методом, основанными на эффекте Керра. Достоверность работы обеспечивается и воспроизводимостью результатов. Автором произведено большое количество проверочных экспериментов и контрольных измерений. Обсуждение опирается на надёжно установленные факты и закономерности, известные из литературы. Все выводы работы соответствуют содержанию разделов диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования.

Первая глава содержит литературный обзор по теме диссертации. Разделена на 3 части: 1) Нанокomпозиты и многослойные структуры. 2) Электроперенос в нанокomпозитах и многослойных структурах. 3) Магнитосопротивление в нанокomпозитах и многослойных структурах.

Во **второй** главе описаны способ получения, методы аттестации образцов и экспериментальные методы исследования структуры, электрических, магнитных и магниторезистивных свойств гетерогенных структур.

Третья глава посвящена изучению структуры тонкопленочных гетероструктур $\text{Co}_n(\text{CoO})_{100-n}$, $(\text{Co}/\text{CoO})_{60}$, $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$, и $(\text{ZnO}/\text{C})_{25}$. Анализ дифрактограмм $\text{Co}_n(\text{CoO})_{100-n}$ показал, что полученные пленки являются двухфазными и состоят из текстурированных кубических фаз CoO и металлического кобальта. Исследования ПЭМ подтвердили выводы о наличии двух фаз. Системы $(\text{Co}/\text{CoO})_{60}$, $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$, и $(\text{ZnO}/\text{C})_{25}$ по результатам исследования методами РФА и ПЭМ показано, что полученные структуры являются многослойными.

Четвертая глава приводятся результаты по электрическим явлениям в исследованных структурах. Показано наличие порога протекания в

гетероструктурах $\text{Co}_n(\text{CoO})_{100-n}$ и $(\text{Co}/\text{CoO})_{60}$. Установлено, что температурная зависимость удельного электрического сопротивления нанокомпозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$, полученных на вращающуюся подложку, описывается законом Эфроса–Шкловского ($1/2$). Для многослойных гетероструктур, где толщина полупроводниковых прослоек ZnO больше 2 нм $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$ 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.

Пятая глава о магниторезистивных явлениях. Обнаружено, что для составов $\text{Co}_n(\text{CoO})_{100-n}$ вблизи порога перколяции наблюдается отрицательное туннельное МС с гистерезисом, коррелирующим с магнитным гистерезисом. Результаты исследований $(\text{Co}/\text{CoO})_{60}$ показали наличие магнитной анизотропии в гетероструктурах вблизи порога протекания и за ним. При этом оси легкой и трудной намагниченности находятся в плоскости пленки и перпендикулярны друг другу. Магнитосопротивление многослойных гетероструктур $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$ в поле 9 кЭ при 300 К достигает 4 % и 12 % при 77 К, что в два раза превышает максимальное значение, полученное для референтного нанокомпозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Несмотря на большой экспериментальный материал и теоретический анализ результатов, автором не обсуждена роль диффузии между состояниями с разным химическим составом, как на образцах $\text{Co}_n(\text{CoO})_{100-n}$, так и на $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$, содержащих на интерфейсе разные химические элементы соседних слоев.

2. В диссертации и автореферате автором не указано из каких материалов были контакты для измерения температурных зависимостей электрического сопротивления и магнитосопротивления и могли ли быть реакции между материалом контакта и пленкой повлиять на результаты?

3. Обнаруженный магниторезистивный эффект в многослойных гетероструктурах $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$ описывается автором как «отрицательный» и в качестве доказательства приводится рис. 5.13, но не указывает «изотропный» или «анизотропный». Из рисунка действительно следует, что эффект отрицательный, однако совершенно не следует, что он изотропный. Необходимо было представить хоть какие-то доказательства изотропности или наоборот анизотропности.

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

- по тексту работы присутствует незначительное количество опечаток (например, на с. 43, 67, 87), после некоторых рисунков после тира отсутствует пробел (например, на стр. 25);

- при обозначении состава композита по тексту используется $\text{Co}_n(\text{CoO})_{100-n}$, но на страницах 2 и 5 можно встретить $\text{Co}_n\text{CoO}_{100-n}$.

Сделанные замечания не уменьшают ценность работы и не влияют на ее основные выводы и защищаемые положения.

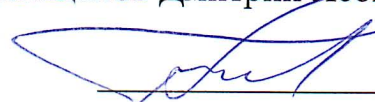
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне. 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. Содержание диссертации соответствует пунктам 1, 2 паспорта специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и адекватно отражает полученные в работе результаты.

Таким образом, диссертация Фошина Вадима Анатольевича «Электрические и магниторезистивные явления в тонкопленочных гетерогенных системах Co/CoO, (CoFeB-SiO₂)/ZnO, ZnO/C» является законченной научно-квалификационной работой 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 наук, а её автор Фошин Вадим Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук, Голощапов Дмитрий Леонидович
доцент кафедры физики твердого тела и
наноструктур ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный университет»

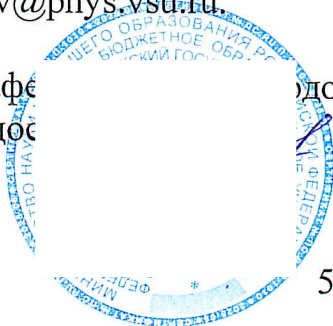


24.09.2025 г.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Почтовый адрес: 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1;
Тел. +7 (473) 220-82-81;
E-mail: goloshchapov@phys.vsu.ru

Подпись доцента кафе
Голощапова Д.Л. удо



Т.В. Зарудная