

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.286.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Воронежский государственный технический
университет», Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 21.10.2025 № 393

О присуждении Фошину Вадиму Анатольевичу, гражданину Российской Федерации, **ученой степени кандидата физико-математических наук.**

Диссертация «Электрические и магниторезистивные явления в тонкопленочных гетерогенных системах Co/CoO , $(\text{CoFeB-SiO}_2)/\text{ZnO}$, ZnO/C » по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния **принята к защите** 17.06.2025 г. (протокол заседания № 391) **диссертационным советом** 24.2.286.01, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, приказ о создании совета №105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Фошин Вадим Анатольевич, 11 октября 1997 года рождения, в 2021 г. **окончил** магистратуру ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по направлению 16.04.01 «Техническая физика». В 2025 г. **оканчивает** аспирантуру ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по специальности 03.06.01 «Физика и астрономия». В настоящий момент работает в должности инженера в научно-образовательной лаборатории «Функциональные материалы» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре твердотельной электроники ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Калинин Юрий Егорович, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», профессор кафедры твердотельной электроники.

Официальные оппоненты:

1. **Дорохин Михаил Владимирович**, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского физико-технического института ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»;

2. **Голощанов Дмитрий Леонидович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела и наноструктур ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина», Республика Коми, г. Сыктывкар, в своем **положительном отзыве**, подписанном **Котовым Леонидом Нафанаиловичем**, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой радиофизики и электроники ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина», и утвержденном проректором по научной и инновационной деятельности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина», доктором педагогических наук, доцентом Новиковой Натальей Николаевной, указала, что диссертация выполнена на актуальную тему, полученные в работе результаты представляются достоверными, а выводы и основные положения, выносимые на защиту, хорошо обоснованными. Отмечено, что результаты диссертации имеют высокую научную и практическую значимость, связанную с тем, что полученные закономерности дополняют знания о механизмах электрической проводимости в гетерогенных системах и показывают, как изменяя морфологию, толщину слоев и концентрацию компонентов управлять электрическими и магниторезистивными явлениями в тонкопленочных гетероструктурах. В заключении указано, что диссертация Фошина В.А. 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, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки).

Соискатель имеет 42 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 21 работа, из них 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 5 работ, индексируемых в международных базах Scopus (WoS).

Общий объем опубликованных работ составил 8,56 п.л., из них соискателю принадлежит 1,59 п.л.

Личный вклад соискателя состоит в анализе литературных источников по теме исследования, участии в синтезе образцов, в анализе, систематизации и обсуждении результатов экспериментальных исследований, подготовке статей к публикации. Экспериментальные данные, касающиеся исследования структуры, электрических и магниторезистивных свойств тонкопленочных гетероструктур, обсуждаемых в диссертации, получены автором лично.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Калинин Ю.Е. Магнитные и Магниторезистивные Свойства Многослойных Наноструктур $(\text{Co}/\text{CoO})_{60}$ / Ю.Е. Калинин, К.Г. Габриельс, В.А. Макагонов, **В.А. Фошин**, Р.Б. Моргунов, М.В. Бахметьев, Е.В. Дворецкая, И.И. Ходос // Физика Твердого Тела. – 2025. – Т. 67. – № 4. – С. 724 – 736.

2. Калинин Ю.Е. Прыжковая проводимость в многослойных наноструктурах $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_n$ / Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, В.А. Макагонов, **В.А. Фошин**, М.Н. Волочаев // Физика твердого тела. – 2024. – Т. 66. – № 11. – Р. 1941 – 1949.

3. Kalinin Y.E. Magnetic Properties and Magnetoresistance of Hybrid Multilayer Nanostructures $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_n$ / Y.E. Kalinin, A.V. Sitnikov, V.A. Makagonov, **V.A. Foshin**, M.N. Volochaev, I.M. Pripechenkov, N.N. Perova, E.A. Ganshina, V.V. Rylkov, A.B. Granovsky // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2024. – Vol. 604. – P. 172287.

4. Sitnikov A.V. Magnetic, Magnetoresistive and Structural Properties of $\text{Co}_x(\text{CoO})_{100-x}$ Thin Film Composites / A.V. Sitnikov, V.A. Makagonov, Y.E. Kalinin, S.B. Kushchev, **V.A. Foshin**, N.N. Perova, E.A. Ganshina, A.B. Granovsky // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2023. – Vol. 587. – P. 171154.

5. Volochaev M.N. Transport and Magnetic Phenomena in ZnO-C Thin-Film Heterostructures / M.N. Volochaev, A.B. Granovsky, O.V. Zhilova, Yu.E. Kalinin, V.V. Ryl'kov, M.P. Sumets, V.A. Makagonov, S.Yu. Pankov, A.V. Sitnikov, E. Fadeev, E. Lahderanta, **V.A. Foshin** // Superlattices and Microstructures. – 2020. – Vol. 140. – P. 106449.

Подготовка публикаций выполнена соискателем совместно с научным руководителем Ю.Е. Калининым. Основные результаты диссертации отражены в опубликованных статьях. Работы выполнены на

высоком научном уровне, в диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных работах.

На диссертацию и автореферат поступило 8 отзывов (все отзывы положительные), в них содержатся следующие замечания:

1. **Волегов Алексей Сергеевич**, к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой магнетизма и магнитных наноматериалов Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, со следующими замечаниями:

- отсутствие сведений о методах определения элементного состава композитов;

- наличие в тексте стилистически невыверенных оборотов, например, «...использованы при использовании...» (стр. 4), «эквивалентная толщина» (стр. 9 и далее), «...измерений магнитной намагниченности...» (стр. 16).

2. **Иванов Олег Николаевич**, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»), со следующими замечаниями:

- Для системы $(\text{Co}/\text{CoO})_{60}$ указано, что до порога перколяции магнитосопротивление отрицательное и изотропное, после порога магнитосопротивление становится анизотропным, что объясняется действием конкурирующих вкладов, один из которых связан с формированием перколяционной сетки ферромагнитного кобальта, а другой - с Лоренцевым магнитосопротивлением. Однако, подробного анализа особенностей магнитосопротивления до и после порога перколяции в нанокompозитах $\text{Co}_n(\text{CoO})_{100-n}$ в автореферате не приведено.

- Не обозначены значения плотностей токов, используемых при измерении электрического сопротивления и магнитосопротивления исследуемых образцов, значения скоростей термоциклирования и использованные автором критерии исключения самонагрева образцов в процессе измерения их электрических свойств.

- В автореферате имеются незначительные небрежности и опечатки.

3. **Игнатенко Николай Михайлович**, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей физики и прикладной физики (кафедра НМОиПФ) ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ), со следующими замечаниями:

- из автореферата не видна степень разработанности изучаемой проблемы в международных и отечественных научных центрах.

4. **Кульков Виктор Геннадьевич**, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры фундаментальных дисциплин Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», со следующими замечаниями:

– На рис. 5б приведены экспериментальные кривые зависимости удельного сопротивления нанокompозитов от концентрации металлической фазы. Разница этих значений, измеренных до и после термической обработки (кривые 1 и 2, 3 и 4), похоже, связана лишь с погрешностью измерения и каких-либо выводов из этих кривых делать не следует. Тем более, что оценка погрешностей не приведена.

5. **Матвеев Николай Николаевич**, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры общей и прикладной физики машиностроительного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», со следующими замечаниями:

– Не приведено обоснование выбора режима термической обработки к рис. 5.

– В автореферате не сказано о различии рассчитанных параметров на рис. 10 и 11.

6. **Федотова Юлия Александровна**, д.ф.-м.н., профессор, заместитель директора НИИ ядерных проблем Белорусского государственного университета, без замечаний.

7. **Филиппов Владимир Владимирович**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики и биомедицинской техники ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», со следующими замечаниями:

– Положение № 5, выносимое на защиту, сформулировано не удачно.

– Автор не указывает погрешности проводимых измерений.

– В тексте автореферата присутствуют несогласованные предложения и опечатки.

8. **Столяр Сергей Викторович**, д.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник лаборатории «Физика магнитных пленок» Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, **Исхаков Рауф Садыкович**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Физика магнитных пленок» Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, без замечаний.

На замечания диссертант дал исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты и работники ведущей организации являются компетентными специалистами в области физики конденсированного состояния, в частности, в области физических свойств

наноструктур, а также имеют ряд публикаций в соответствующей сфере исследования.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработана методика оценки плотности локализованных состояний на уровне Ферми для многослойных структур нанокompозит/полупроводник.

Предложен способ увеличения значений магнитосопротивления нанокompозиционных материалов ферромагнетик–диэлектрик за счёт введения в него полупроводниковой прослойки оксида цинка.

Показано, что температурная зависимость удельного электрического сопротивления пленок ZnO в диапазоне температур 80 – 280 К описывается логарифмическим законом $\rho(T) \propto f(\ln(T))$, а для нанокompозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ - законом Эфроса–Шкловского $\ln(\rho) \propto f(T^{-1/2})$.

Доказано, что наличие полупроводниковых прослоек ZnO толщиной порядка 2 нм в объёме нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ приводит к смене температурной зависимости удельного электрического сопротивления в диапазоне температур 80 – 280 К от механизма Эфроса–Шкловского, наблюдаемому в нанокompозитах, к механизму Мотта, описывающему прыжковую проводимость с переменной длиной прыжка по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

экспериментально доказано, что введение в распылительную камеру кислорода при получении нанокompозитов $\text{Co}_n(\text{CoO})_{100-n}$ смещает положение порога протекания в сторону меньших концентраций металлической фазы, что связывается с особенностями морфологии нанокompозитов: наличием наночастиц Co на границах крупных частиц CoO;

обнаружено увеличение магнитосопротивления в многослойных гетероструктурах $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$ при толщине полупроводниковых прослоек ZnO около 2 нм и снижение до нуля магнитосопротивления при толщине 4 нм;

установлено, что для многослойных гетероструктур $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$ плотность электронных состояний на уровне Ферми нелинейно растёт с увеличением толщины полупроводниковых прослоек ZnO;

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплексный подход, совмещающий методы рентгеновской дифракции, высокоразрешающей просвечивающей электронной и растровой микроскопии, а также измерение электрических, магнитных,

магниторезистивных и магнитооптических характеристик при аттестации нанокompозитов и многослойных наноструктур;

использованы теоретические модели Мотта и Эфроса–Шкловского, описывающие прыжковую проводимость с переменной длиной прыжка по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми в исследуемых гетероструктурах Co/CoO, (CoFeB-SiO₂)/ZnO, ZnO/C;

изложены экспериментальные доказательства влияния толщины полупроводниковой прослойки на магнитосопротивление в гетерогенных структурах $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$;

раскрыты закономерности перехода температурной зависимости удельного электрического сопротивления от модели Эфроса–Шкловского, наблюдаемой в нанокompозитах (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)₃₄(SiO₂)₆₆, к модели Мотта, проявляющейся в многослойных гетероструктурах $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$;

изучено влияние толщины слоев на магнитные и магниторезистивные свойства многослойных структур (Co/CoO)₆₀.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

предложен способ увеличения значений магнитосопротивления нанокompозиционных материалов ферромагнетик–диэлектрик за счет введения в него полупроводниковой прослойки оксида цинка и отработаны режимы синтеза структуры $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$ с разной толщиной слоев ZnO;

определены режимы получения многослойных наноструктур (нанокompозит/полупроводник), которые могут быть использованы на промышленных предприятиях;

показана практическая возможность получения нанокompозитов Co_n(CoO)_{100-n} при ионно-лучевом распылении составной мишени (мишень из Co и неравномерно установленных на ней навесок CoO);

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

результаты экспериментальных исследований получены на современном сертифицированном и поверенном оборудовании с использованием стандартизированных методик проведения измерений; показана хорошая воспроизводимость результатов;

теории, используемые для объяснения результатов экспериментов, описания механизмов электропроводности доперколяционных нанокompозитов и многослойных пленок, изменения структуры и морфологии полученных наносистем в зависимости от толщины слоев и других факторов, адекватны к исследованным в работе многослойным гетероструктурам;

использовано сопоставление результатов, экспериментально полученных автором, и данных, представленных в научной литературе по теме диссертации;

установлено качественное соответствие экспериментальных данных, полученных в диссертации, с результатами, представленными в научных публикациях по данной тематике.

Диссертация отвечает установленным в Положении о присуждении ученых степеней критериям и соответствует шифру специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. В материалах диссертации Фошина В.А. содержится решение научной задачи, имеющей значение для дальнейшего развития теории электрических, магнитных и магниторезистивных свойств гетерогенных наноструктур. Работа написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые результаты и положения, что свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

В ходе проведения заседания критических замечаний высказано не было.

На заседании 21.10.2025 г. диссертационный совет за решение научной задачи, имеющей значение для дальнейшего развития физических представлений о механизмах электропереноса и магниторезистивных свойств в гетероструктурах, а также установление основных закономерностей влияния морфологии, толщины слоев и других факторов на электрические и магниторезистивные явления в тонкопленочных гетероструктурах Co/CoO , $(\text{CoFeB-SiO}_2)/\text{ZnO}$, ZnO/C , принял решение присудить Фошину Вадиму Анатольевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 13, против – нет, недействительных бюллетеней нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета

Белоногов
Евгений Константинович

Ученый секретарь
диссертационного совета

Стогней
Олег Владимирович

21 октября 2025 года