

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 26.04.2023 г. № 374

О присуждении Никонову Александру Евгеньевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Электрические свойства нанокompозитов $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}\text{-LiNbO}_3$ и мемристорных структур на их основе» по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния принята к защите 14.02.2023 (протокол заседания № 370) 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 Никонов Александр Евгеньевич, 13 сентября 1994 года рождения, в 2018 г. окончил магистратуру ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по направлению 16.04.01. – Физика и техника низких температур. В 2022 г. окончил аспирантуру ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния. Работает в должности инженера-исследователя в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный техни-

ческий университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

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

Научный руководитель – Ситников Александр Викторович, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», кафедра твердотельной электроники, профессор.

Официальные оппоненты:

1. **Удовиченко Сергей Юрьевич**, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет», профессор кафедры прикладной и технической физики;

2. **Рябцев Станислав Викторович**, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», ведущий научный сотрудник лаборатории электронного строения твердого тела, дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, в своем **положительном отзыве**, подписанном Михайловым Алексеем Николаевичем, кандидатом физико-математических наук, заведующим исследовательской лабораторией мемристорной наноэлектроники НОЦ ФТНС ННГУ, и утвержденном проректором по научной работе ННГУ доктором физико-математических наук Иванченко М.В., указала, что диссертация выполнена на актуальную тему физики конденсированных гетерогенных сред и представляет научный и практический интерес. Полученные в работе результаты представляются достоверными, а выводы и положения,

представленные в диссертации, обеспечиваются применением современного производственного и измерительного оборудования, использованием актуальных методов и подходов к решению научно-технических задач. Основные научные результаты диссертации достаточно полно отражены в опубликованных работах, включая 1 статью в журнале, индексируемом базой данных Scopus, 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК. В заключении указано, что диссертация Никонова Александра Евгеньевича соответствует паспорту специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния и требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, в том числе п.9 «Положениям о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор Никонов Александр Евгеньевич заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Соискатель имеет 22 опубликованных работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 16 работ, из них в рецензируемых научных изданиях – 4, общим объемом 3,22 п.л., из которых автору принадлежит 1,19 п.л. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично соискателю принадлежат следующие результаты: синтез образцов, подготовка их к проведению экспериментальных исследований, непосредственное получение экспериментальных данных о мемристивных свойствах исследуемых объектов, обработка полученных данных и обсуждение выявленных результатов и закономерностей.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Ситников А.В. Влияние кислорода и паров воды на структурные превращения в наногранулированных композитах $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ / А.В. Ситников, И.В. Бабкина, Ю.Е. Калинин, **А.Е. Никонов**, М.Н. Копытин, А.Р. Шакуров, Д.С. Погребной, В.В. Рыльков // ФТТ. – 2021. – Т. 63. – № 11. – С. 1837-1843.

2. Ситников А.В. Формирование пленки композитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ на металлической подложке / А.В. Ситников, И.В. Бабкина, Ю.Е. Калинин, **А.Е. Никонов**, М.Н. Копытин, А.Р. Шакуров, О.И. Ремизова, Л.И. Янченко // Журнал Технической физики. – 2022. – В. 22. – С. 1382.

3. Ситников А.В. Многоуровневый мемристивный элемент на базе наногранулированного композита $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ с тонкой прослойкой аморфного LiNbO_3 / А.В. Ситников, И.В. Бабкина, Ю.Е. Калинин, **А.Е. Никонов**, М.Н. Копытин, К.Э. Никируй, А.И. Ильясов, К.Ю. Черноглазов, С.Н. Николаев, А.Л. Васильев, А.В. Емельянов, В.А. Демин, В.В. Рыльков // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13. – № S5-3 (102). – С. 687-696.

4. Sitnikov A.V. The effect of oxygen and water vapor on the electric properties of $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ nanogranular composites / A.V. Sitnikov, I.V. Babkina, Y.E. Kalinin, **A.E. Nikonov**, M.N. Kopytin, A.R. Shakurov, V.V. Rylkov // Technical Physics. – 2022. – 66(12), – P. 1284–1293.

В диссертации отсутствуют достоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На диссертацию и автореферат поступило 5 отзывов, все отзывы положительные:

1. Грановский Александр Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор физического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»: со следующими замечаниями:

– одной из основных причин изменения положения порога перколяции при измерениях вдоль и поперек композиционной пленки фигурирует различие расстояний между омическими контактами при измерениях, но порядок расстояний не указан;

– время восстановления равновесного значения сопротивления для структур $\text{Cu}/(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}/\text{Cu}$ (рис.5) составляет значения порядка 10^{14} сек, но как определялась эта величина не указано.

2. Веденеев Александр Сергеевич, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, со следующими замечаниями:

- в автореферате не указана причина изменения температуры кристаллизации композита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ при изменении состава и добавлении реактивных газов;

- анализ мемристивных свойств нанокompозитных структур проводился по параметрам изменения напряжения переключения резистивных состояний и отношения $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$ для различных температур отжига, однако в автореферате приведены только зависимости $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}(T)$.

3. Игнатенко Николай Михайлович, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»: со следующим замечанием:

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

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

- на стр. 8 утверждается «Влияния паров воды на электрические свойства композитов не проводились». Здесь же (стр. 8) – «Причем, влияние кислорода более значительное, чем паров воды»;

- на стр. 8 вставка в рис. 3а не читаема;

- на стр. 16 графики 10 перегружены по оси тока;

- на стр. 17 рис 11а используется латиница, а на рис. 11в – кириллица.

5. Гуляев Александр Михайлович, д.т.н., профессор, профессор кафедры полупроводниковой электроники ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет МЭИ», со следующими замечаниями:

- отсутствие данных по воспроизводимости параметров структур, и их стабильности;

– при анализе полученных результатов не делается попытки сравнения свойств и перспективности разработанных приборов с ранее известными.

На замечания диссертант дал исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их компетентностью в области исследования материалов, обладающих мемристорными свойствами, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования, а также их согласием.

Выбор ведущей организации обоснован широкой известностью сотрудников своими достижениями в области исследования мемристивных свойств и способностью определить научную и практическую ценность диссертации, а также ее согласием. Направление научно-исследовательской деятельности базового структурного подразделения ведущей организации (лаборатория мемристорной наноэлектроники НОЦ ФТНС ННГУ) соответствует теме диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана и впервые реализована оригинальная лабораторная методика получения мемристивных структур металл/нанокомпозит/металл и металл/нанокомпозит/ LiNbO_3 /металл на основе нанокompозитов $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}\text{-LiNbO}_3$ методом ионно-лучевого распыления с использованием теневых масок;

предложены объяснения:

– смещения порога перколяции в нанокompозитах $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ в сторону увеличения концентрации металлической фазы при увеличении парциального давления O_2 от 0% до 2,2% и паров H_2O от 0,5% до 3,2% за счет доокисления диэлектрической матрицы от LiNbO_n ($n < 3$) до стехиометрического состава LiNbO_3 ;

– различия в концентрации порога перколяции для перпендикулярного и латерального направлений к плоскости пленки нанокompозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$, обусловленные анизотропией формы металличе-

ских гранул (вытянутая форма в перпендикулярном к плоскости пленки направлении) и различием в расстоянии между контактными площадками в процессе измерения электрического сопротивления;

доказано, что

– температура кристаллизации диэлектрической фазы нанокompозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ увеличивается с ростом концентрации металлической фазы и уменьшается при добавлении реактивных газов в процессе синтеза пленок.

Новые понятия, измененные трактовки старых понятий, новые термины **не вводились**;

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, влияние O_2 и паров H_2O в атмосфере рабочего газа (Ar) при синтезе пленки композитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ методом ионно-лучевого распыления на величину удельного электрического сопротивления и концентрационного положения перколяционного перехода, что обусловлено доокислением диэлектрической матрицы от LiNbO_n ($n < 3$) до стехиометрического состава LiNbO_3 ;

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплексный подход, совмещающий методы рентгеновской дифракции, сканирующей электронной микроскопии, измерения электрических и мемристивных характеристик для аттестации нанокompозитов $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}\text{-LiNbO}_3$;

изложены:

- доказательства влияния анизотропии формы металлических гранул (вытянутая форма в нормальном к плоскости пленки направлении) и геометрических особенностей измерения электрического сопротивления (расстояние между контактными площадками) на смещение порога перколяции в область с меньшей концентрацией металла при перпендикулярном к плоскости пленки направлении измерения по сравнению с латеральным направлением;

– феноменологическая модель формирования диэлектрической прослойки на начальном этапе роста пленки нанокompозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ на поверхности Cr, связанная с реализацией различных механизмов роста для разных фаз композита;

– причины влияния атомов бора и барьерного слоя хрома электрических контактов Cr/Cu/Cr в структурах Cu/ $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ /Cu/ситалл, Cr/Cu/Cr/ $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ /Cr/Cu/Cr/ситалл и Cr/Cu/Cr/ $(\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ /Cr/Cu/Cr/ситалл на уменьшение величины остаточного электрического напряжения в образцах после полевого воздействия;

раскрыты условия возникновения остаточного электрического напряжения после полевого воздействия в системах металл/нанокompозит/металл и металл/нанокompозит/LiNbO₃/металл.

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

разработана и внедрена в практику научных исследований кафедры твердотельной электроники методика получения мемристивных структур металл/нанокompозит/металл и металл/нанокompозит/LiNbO₃/металл на основе нанокompозитов $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ -LiNbO₃;

определено, что оптимальный комплекс технических параметров мемристивных структур M/ $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ /M: отношение $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$, напряжение переключения $R_{\text{off}} \rightarrow R_{\text{on}}$ и $R_{\text{on}} \rightarrow R_{\text{off}}$ и временная стабильность индуцированных резистивных состояний наблюдается при концентрации металлической фазы композита несколько ниже порога перколяции, парциальное давление кислорода находится в диапазоне от 1% до 1,5%, паров H₂O - от 1% до 2,5% от общего давления рабочего газа в процессе осаждения композита;

- наличие синтезированной прослойки LiNbO₃ в структуре Cr/Cu/Cr/ $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ /LiNbO₃/Cr/Cu/Cr/ситалл повышает термическую стабильность мемристивных свойств (отношение $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$ и напря-

жение переключения резистивных состояний) в диапазоне температур от 100 °С до 200 °С;

- влияние атомов бора и барьерного слоя хрома в электрических контактах Cr/Cu/Cr в структурах $\text{Cu}/(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}/\text{Cu}/\text{ситалл}$, $\text{Cr}/\text{Cu}/\text{Cr}/(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}/\text{Cr}/\text{Cu}/\text{Cr}/\text{ситалл}$ и $\text{Cr}/\text{Cu}/\text{Cr}/(\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}/\text{Cr}/\text{Cu}/\text{Cr}/\text{ситалл}$ на понижение величины остаточного напряжения в образцах после полевого воздействия.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

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

теории, используемые для объяснения результатов экспериментов, описания механизмов роста пленки нанокompозитов, влияния добавления кислорода и паров воды в процессе синтеза на электрические и мемристивные свойства нанокompозитов, адекватны исследуемым в работе объектам;

идея базируется на анализе и обобщении данных о влиянии структуры, элементного состава и параметров получения на электрические свойства нанокompозита $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}\text{-LiNbO}_3$ и мемристорные характеристики структур $\text{M}/(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}/\text{M}$ и $\text{M}/(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}/\text{LiNbO}_3/\text{M}$;

использовано сравнение результатов, экспериментально полученных автором, и данных, представленных в научной литературе по исследованной тематике;

установлено качественное соответствие авторских результатов с результатами, представленными в научных публикациях по данной тематике;

использованы современные методики измерений физических параметров, исследования структуры и элементного состава нанокompозитов, а также методы математической и статистической обработки полученных экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя состоит в анализе литературных источников по теме исследований, участии в синтезе образцов, в анализе, систематизации, обсуждении результатов экспериментальных исследований и подготовке статей к публикации. Экспериментальные данные по исследованию структуры, электрических и мемристивных свойств нанокomпозиционных материалов, обсуждаемых в диссертации, получены автором.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания: не в полной мере раскрыта роль атомов лития и атомов бора в нанокomпозите $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$; не приведен механизм резистивного переключения.

Соискатель Никонов Александр Евгеньевич согласился с замечаниями и сообщил, что они будут учтены в ходе дальнейшей работы.

На заседании 26.04.2023 г. диссертационный совет за решение научной задачи, имеющей значение для дальнейшего развития физических представлений о закономерностях влияния состава и добавлении реактивных газов (кислорода и паров H_2O) в процессе синтеза на электрические и мемристивные свойства нанокomпозитов $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}\text{-LiNbO}_3$, принял решение присудить Никонову Александру Евгеньевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали за – 14, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета



Белоногов Евгений Константинович

Ученый секретарь
диссертационного совета

Стогней Олег Владимирович

26 апреля 2023 года