

УТВЕРЖДАЮ

ректор по научной работе ННГУ
по физ.-мат. наук, доцент

Иванченко
Михаил
Васильевич

27 марта 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» – на диссертацию Никонова Александра Евгеньевича «Электрические свойства нанокомпозитов $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}\text{-LiNbO}_3$ и мемристорных структур на их основе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Разработка аппаратных реализаций нейроморфных вычислительных систем (НВС) в настоящее время активно ведется по нескольким направлениям: создание цифровых, аналоговых и аналогово-цифровых устройств. Наряду с распространенными формальными НВС в последнее время интенсифицировались работы по разработке так называемых импульсных или спайковых нейроморфных вычислительных систем (СНВС). Специализированные аппаратные модели СНВС демонстрируют существенное снижение энергопотребления (приближая его к уровню биологического прототипа), увеличение производительности нейровычислений и позволяют реализовать обучение СНВС как с учителем, так и без него – на основе правил изменения весов между связанными нейронами типа STDP (spike timing dependent plasticity), которые характерны для биологических систем.

Ключевую роль в построении СНВС играют резистивные элементы (мемристоры), которые под действием приложенного электрического поля могут квазинепрерывно изменять электрическое сопротивление в некотором диапазоне и сохранять его после снятия импульса напряжения. Это свойство

позволяет всего лишь одним двухэлектродным элементом моделировать функцию пластичного синапса в биологических нейронных сетях.

Толчком к развитию биоподобных процессорных устройств послужили работы по обнаружению мемристивных (запоминающих) свойств структур металл/диэлектрик/металл (МДМ) на основе оксидных нанослоев. На данный момент наибольший интерес проявляется к исследованиям оксидных МДМ-структур, которые могут обладать многоуровневым характером резистивного переключения (РП) при больших временах хранения резистивных состояний, а также технологически совместимы с традиционной кремниевой технологией микроэлектроники. Эффект РП в такого рода МДМ-структурах обусловлен процессами электромиграции вакансий кислорода или катионов металлов. В результате в диэлектрическом слое образуются (или разрушаются) нитевидные проводящие каналы (филаменты), характер формирования которых в значительной степени случаен, что является одной из основных причин невоспроизводимости и деградации свойств мемристоров при циклическом РП.

Решение указанных проблем и повышение стабильности РП возможны за счет инженерии материалов и интерфейсов в структуре мемристора. Один из наиболее эффективных способов – это пространственная локализация филаментов и повышение стабильности их структуры в матрице функционального диэлектрика за счет встраивания в него металлических нанокластеров или наногранул. Этот способ позволяет избавиться от необходимости электроформовки, обеспечить малый разброс токов (сопротивлений) и многоуровневый характер РП.

Диссертационная работа А.Е. Никонова посвящена выявлению физических механизмов изменения электрических свойств и параметров многофиламентного РП в оригинальной мемристорной структуре на основе слоя наногранулированного композита металл-диэлектрик при вариации режимов его синтеза методами ионно-лучевого распыления и термической обработки. В связи с вышесказанным тема диссертационной работы А.Е. Никонова представляется весьма актуальной.

Используя для проведения исследований методы анализа структуры нанокompозита и измерения электрических характеристик мемристорных структур, Никонов А.Е. получил ряд новых интересных результатов, которые представлены в диссертации и отражены в научных положениях, выносимых на защиту. Особо следует отметить следующие результаты автора:

- 1) Обнаружено, что добавление O_2 и паров H_2O в рабочий газ (Ar) в процессе формирования пленки композитов $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(LiNbO_3)_{100-x}$ методом ионно-лучевого распыления приводит к увеличению удельного

электрического сопротивления и концентрации металлической фазы на пороге протекания гетерогенной системы за счет доокисления соединения LiNbO_3 и частичного окисления элементов металлических гранул. Более интенсивно процесс окисления происходит при добавлении кислорода.

2. Показано, что порог протекания в перпендикулярной к плоскости пленки геометрии характеризуется существенно меньшей концентрацией атомов сплава $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$, чем в плоскости пленки.

3. Предложена 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, которая заключается в возможности реализации островкового и слоевого механизмов роста для металлической и диэлектрической фаз композита, соответственно.

Структура диссертации соответствует логике исследования и включает в себя введение, три главы, заключение и список литературы из 143 наименований. Работа изложена на 144 страницах, содержит 75 рисунков и 6 таблиц.

Во введении сформулированы задачи, решаемые в диссертационной работе, выносимые на защиту положения, обоснована актуальность работы, ее новизна и практическая значимость.

В первой главе сделан литературный обзор по теме исследования. Даны краткие сведения о нанокompозитах металл-диэлектрик, приведены данные о мемристорах. Рассмотрены основные механизмы резистивного переключения в структурах металл/нанокompозит/металл.

Во второй главе описаны способы получения и аттестации образцов и экспериментальные методы исследования их структуры, электрических и мемристивных свойств.

Основные результаты диссертации представлены в **третьей главе**. Рассмотрены влияние состава нанокompозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ на их структуру, давления реактивных газов при осаждении – на электрические и мемристивные свойства нанокompозитов, а также зависимость структурных превращений и параметров резистивного переключения от режимов термической обработки. Предложен механизм образования диэлектрической прослойки на начальных этапах роста композитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ на металлической пленке. Определено и объяснено наличие остаточного электрического напряжения в структурах $\text{M}/(\text{M})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}/\text{M}$.

К сожалению, представленные материалы диссертационной работы Никонова А.Е. не лишены недостатков, по которым можно сделать ряд замечаний:

1. Хотя автор работы детально описывает структуру и механизмы формирования нанокompозитных пленок, в оригинальной части диссертации недостаточно описан механизм многофиламентного резистивного переключения и механизмы транспортных явлений, лежащих в основе мемристивного эффекта, параметры которого обсуждаются в работе. Желательно проиллюстрировать механизм переключения в сложной гранулированной структуре, уделив особое внимание роли кислородных вакансий, ионов лития и металлических нанокластеров в процессах формирования и разрушения филаментов.
2. Резистивное переключение с филаментарным механизмом анионного или катионного типа характеризуется ярко выраженной стохастической природой. Не очень понятно, каков разброс определяемых в данной работе параметров мемристивного эффекта от цикла к циклу или от устройства к устройству и насколько сильно он влияет на анализируемые зависимости от технологических параметров, особенно когда существенно меняется форма кривых переключения (см., например, рис. 3.38). На большинстве графиков представлено лишь по одной вольтамперной характеристике для каждого режима.
3. В тексте присутствуют опечатки и мелкие ошибки (например, «в течении» вместо «в течение»), пропущенные слова (см. подпись к таблице 1.3). Для обозначения десятичных дробей часто используются точки вместо запятых.

Однако отмеченные недостатки не уменьшают ценность работы и не влияют на основные выводы и защищаемые положения. Все выводы и положения, выносимые на защиту, обладают актуальностью и новизной, а личный вклад соискателя не вызывает сомнений. В целом диссертация Никонова Александра Евгеньевича выполнена на достаточно высоком уровне и является завершенной научно-исследовательской работой.

Основные научные результаты диссертации достаточно полно отражены в 4 научных публикациях в ведущих российских и международных журналах. Результаты прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях.

Автореферат полностью соответствует содержанию и структуре диссертации, а также адекватно отражает полученные в работе результаты.

На основании изложенного считаем, 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 «Положения 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.

Диссертация соискателя и отзыв на нее были заслушаны и обсуждены на расширенном заседании научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» (НОЦ ФТНС) ННГУ 23 марта 2023 г. (протокол № 1). Результаты голосования: «За» – 15 чел., «Против» – нет, «Воздержались» – нет.

Директор НОЦ ФТНС ННГУ,
к.ф.-м.н., доц.



Олег Николаевич Горшков

Почтовый адрес: 603022, Н. Новгород, проспект Гагарина, 23

Телефон: 8 (831) 462-30-85

Адрес электронной почты: gorshkov@nifti.unn.ru

Организация – место работы: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», Научно-образовательный центр «Физика твердотельных наноструктур»

Должность: директор

Web-сайт организации: <http://www.unn.ru/>

Заведующий научно-
исследовательской лабораторией
мемристорной наноэлектроники
НОЦ ФТНС ННГУ,
к.ф.-м.н.



Алексей Николаевич Михайлов

Почтовый адрес: 603022, Н. Новгород, проспект Гагарина, 23

Телефон: 8 (902) 683-51-26

Адрес электронной почты: mian@nifti.unn.ru

Организация – место работы: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», Научно-образовательный центр «Физика твердотельных наноструктур»

Должность: заведующий лабораторией