

УДК 538.955

## РЕЗИСТИВНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ МЕМРИСТОРОВ НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТА $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ С ПРОСЛОЙКОЙ $\text{LiNbO}_3$ : ПЛАСТИЧНОСТЬ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

© 2020 г. А. Н. Мацукатова<sup>a, b</sup>, К. Э. Никируй<sup>a</sup>, А. А. Миннеханов<sup>a</sup>, С. Н. Николаев<sup>a</sup>,  
А. В. Емельянов<sup>a, c</sup>, В. А. Леванов<sup>a, b</sup>, К. Ю. Черноглазов<sup>a</sup>, А. В. Ситников<sup>a, d</sup>,  
А. С. Веденеев<sup>e</sup>, А. С. Бугаев<sup>c, e</sup>, В. В. Рыльков<sup>a, e, \*, \*\*</sup>

<sup>a</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”,  
пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182 Российская Федерация

<sup>b</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет,  
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Российская Федерация

<sup>c</sup>Московский физико-технический институт,  
Институтский пер., 9, Долгопрудный Московской обл., 141700 Российская Федерация

<sup>d</sup>Воронежский государственный технический университет,  
Московский просп., 14, Воронеж, 394026 Российская Федерация

<sup>e</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
просп. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

\*E-mail: vvrylkov@mail.ru

\*\*E-mail: rylkov\_vv@nrcki.ru

Поступила в редакцию 09.12.2019 г.

После доработки 09.12.2019 г.

Принята к публикации 11.12.2019 г.

Изучено резистивное переключение (РП) мемристивных структур металл/наномпозит/металл (М/НК/М) на основе НК  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  с содержанием ферромагнитного сплава  $x \approx 8...20$  ат. %. Структуры синтезированы методом ионно-лучевого распыления при повышенном содержании кислорода ( $\approx 2 \times 10^{-5}$  Торр) на начальном этапе роста НК, в результате чего у нижнего электрода возникает тонкая (15...18 нм)  $\text{LiNbO}_3$  прослойка. Установлено, что структуры обладают многоуровневым характером РП (не менее четырех уровней) и временем хранения возникающих резистивных состояний (РС) более  $10^4$  с, а также демонстрируют возможность изменения РС по биоподобным правилам типа STDP (Spike-Timing-Dependent Plasticity – пластичности, зависящей от времени прихода импульсов). Обнаружена необычная кинетика РП в низкоомное состояние: РП возникает с задержкой около 70 мкс, при этом время РП достигает  $\sim 5$  нс, а энергозатраты на переключение составляют  $\sim 1$  нДж.

DOI: 10.31857/S0033849420090077

### ВВЕДЕНИЕ

Мемристоры (резисторы с памятью) являются перспективными элементами при построении нового типа энергонезависимой памяти типа RRAM и нейроморфных вычислительных систем (НВС), поскольку обладают малым энергопотреблением при записи/считывании информации, многоуровневым характером резистивного переключения (РП) и потому способны эмулировать ключевые элементы НВС – синапсы [1–4].

Эффекты РП обычно наблюдают в мемристивных структурах металл/диэлектрик/металл (МДМ), в которых они обусловлены процессами электромиграции вакансий кислорода или катио-

нов металлов [1–4]. 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 деградации свойств мемристоров при циклических РП [2, 3]. В случае структур металл/нанокompозит/металл (М/НК/М) переход в проводящее состояние определяется перколяционными цепочками, заданными пространственным положением и концентрацией наногранул металла в НК, и потому их устойчивость к РП выше [5]. В частности, ощутимых результатов удалось достичь в структурах М/Pt– $\text{SiO}_2$ /М, в которых активный слой состоял из атомарных нанокластеров Pt,

диспергированных в  $\text{SiO}_2$  [6]. Показано, что в этом случае максимальное число РП  $N_{\text{max}}$  превышает  $3 \times 10^7$  при времени хранения резистивных состояний более шести месяцев. В наших недавних исследованиях М/НК/М-структур на основе НК  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  наблюдался эффект РП с отношением сопротивлений в высокоомном (выключенном) и низкоомном (включенном) состояниях  $R_{\text{off}}/R_{\text{on}} \sim 100$  при некотором оптимальном значении  $x = x_{\text{опт}} \approx 11 \dots 15$  ат. % ниже порога перколяции НК [7, 10]. Эффект хорошо воспроизводился при числе циклов РП  $> 10^5$  и практически не зависел от типа контактов [5, 7, 8]. Кроме того, синтезированные М/НК/М-структуры обладали высокой степенью пластичности (плавным характером задания резистивного состояния в окне  $R_{\text{on}} - R_{\text{off}}$ ), что позволило эмулировать важные свойства биологических синапсов [8, 9]. Недавно нами также была продемонстрирована возможность масштабирования данных мемристивных структур путем формирования массива элементов площадью  $50 \times 50$  мкм<sup>2</sup> в топологии кроссбар с разбросом сопротивлений  $R_{\text{off}}$  и  $R_{\text{on}}$  менее 25% [10].

Однако исследований быстродействия мемристивных М/НК/М-структур на базе НК  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  в работах [5, 7–10] не проводилось. Между тем время резистивного переключения  $t_{\text{РП}}$  из высокоомного в низкоомное состояние и обратно является безусловно важным параметром, характеризующим, в частности, энергопотребление структур при РП. Быстродействие РП играет ключевую роль для практических применений мемристоров в качестве элементов RRAM памяти или в процессорах с архитектурой типа “вычисления в памяти” [11]. И хотя в МДМ-структурах РП связывается в основном с движением ионов, во многих типах оксидных систем достигнуты довольно малые времена РП при толщинах оксидного слоя  $d \sim 10 \dots 50$  нм ( $t_{\text{РП}} \approx 100$  нс для  $\text{SrTiO}_3$  [12] и  $\text{TaO}_x$  [13], 20 нс для  $\text{HfO}_x/\text{AlO}_x$  [14] и 10 нс для  $\text{TiO}_2$  [15]). В структуре с активным слоем, состоящим из нанокластеров Pt, диспергированных в  $\text{SiO}_2$ , времена переключения достигали 100 пс при  $d \sim 7 \dots 10$  нм [6].

Цель данной работы – исследование мемристивных свойств и кинетики РП структур М/ $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ /М с толщиной слоя НК  $d \sim 1.5$  мкм, содержащего тонкую прослойку  $\text{LiNbO}_3$ .

## 1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

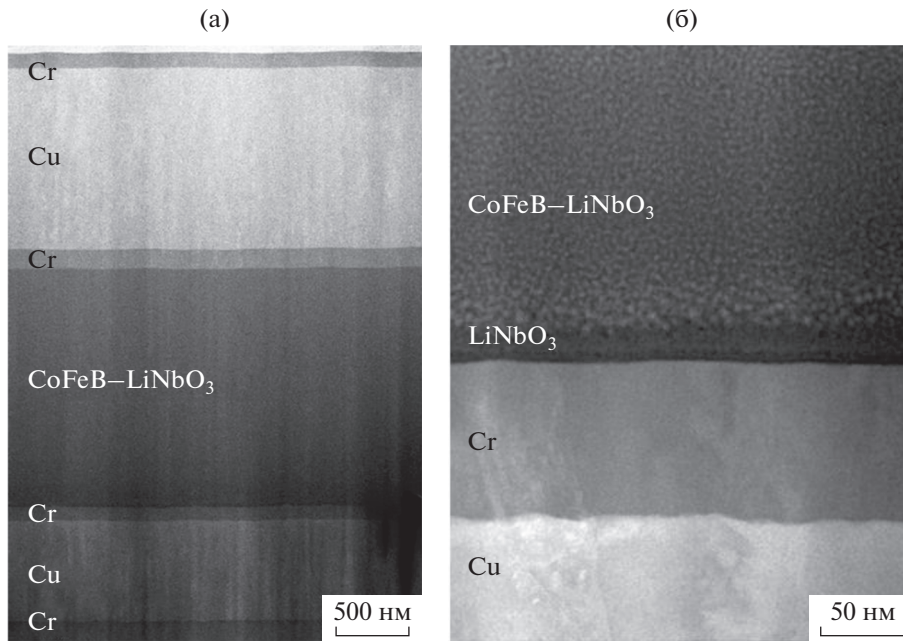
Структуры М/НК/М на базе НК  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  синтезированы методом ионно-лучевого распыления с использованием композитной мишени, состоящей из литой пластины

$\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  и 14...15 полосок сегнетоэлектрика  $\text{LiNbO}_3$  (подробнее см. в [5, 7]). Была использована вытянутая прямоугольная мишень с неравномерным расположением полосок  $\text{LiNbO}_3$ , позволяющая в едином цикле формировать НК с различным соотношением металлической фазы в диапазоне  $x = 6 \dots 43$  ат. %. Нанокompозит осаждался в атмосфере аргона ( $P_{\text{Ar}} \approx 8 \times 10^{-4}$  Торр) при комнатной температуре на ситалловые подложки.

Особенность данных структур заключалась в том, что на начальном этапе осаждение производили в режиме заданного потока кислорода при довольно высоком парциальном давлении,  $P_{\text{O}_2} \approx 2.5 \times 10^{-5}$  Торр, в течение  $\approx 10$  мин, после чего поток  $\text{O}_2$  уменьшался. Дальнейшее осаждение осуществлялось в течение  $\approx 120$  мин при среднем давлении  $P_{\text{O}_2} \approx 1 \times 10^{-5}$  Торр (значения  $P_{\text{O}_2}$  приведены для предельного вакуума в камере  $P \approx 6 \times 10^{-6}$  Торр). В результате описанной процедуры у нижнего электрода формировалась развитая оксидная прослойка преимущественно из аморфного  $\text{LiNbO}_3$  толщиной 15...18 нм (см. рис. 1). Толщина слоя НК в структурах составила  $d \approx 1.6$  мкм. Электродами структур служила трехслойная металлическая пленка  $\text{Cr}/\text{Cu}/\text{Cr}$  толщиной 1...2 мкм (размер верхнего электрода  $S = 0.5 \times 0.2$  мм<sup>2</sup>).

Следует отметить, что приведенная выше формульная запись НК использовалась нами для нахождения  $x$  по данным энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (ЭРМ) [5]. В действительности, значительная часть бора при синтезе НК оказывается в изолирующей матрице, вне гранул [5, 16]. При этом определить, какая часть бора остается в гранулах, существующими методами ЭРМ невозможно. Поэтому в дальнейшем, как и в [5], будем использовать формульную запись НК, отражающую состав мишени, и обозначим ее для краткости как  $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  или  $\text{CoFeB}-\text{LiNbO}_3$ .

Микроструктура образцов М/НК/М с нанометровым разрешением была изучена методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ) и ЭРМ. Образцы исследовали в просвечивающем растровом электронном микроскопе (ТЕМ/STEM) TITAN 80–300 (FEI, США) с корректором сферической абберации зонда в режимах светлого и темного поля с использованием (в последнем случае) высокоуглового темнопольного кольцевого детектора рассеянных электронов. Исследования методом ЭРМ выполнены с помощью приставки EDAX (США). Изображения и спектры обрабатывали с использованием программного обеспечения Digital Micrograph (Gatan, США) и TIA (FEI, США). Детали приго-



**Рис. 1.** Темнопольные ПРЭМ изображения сечения структуры  $M/(CoFeB)_x(LiNbO_3)_{100-x}/M$  (а) и области структуры у нижнего электрода (б).

товления образцов для структурных исследований с атомарным разрешением описаны в [16].

Исследования мемристивных свойств М/НК/М-структур, включая измерения их вольт-амперных характеристик (ВАХ), выполнялись с помощью четырехканального источника-измерителя PXIe-4140 (National Instruments) на аналитической зондовой станции PM5 (Cascade Microtech). При исследованиях ВАХ структур ток  $I$  измеряли при заземленном нижнем электроде и развертке напряжения смещения  $U$  верхнего электрода по линейному закону в последовательности от  $0 \rightarrow +U_0 \rightarrow -U_0 \rightarrow 0$  В шагом 0.1 В, амплитудой пилообразной развертки до  $U_0 = 15$  В и периодом развертки напряжения  $T = 12$  с. Были выполнены также эксперименты по изучению возможности изменения резистивного состояния структуры по биоподобным правилам типа STDP (Spike-Timing-Dependent Plasticity – пластичность, зависящая от времени прихода импульсов) [17] и его хранения во времени. Заданное в этом случае сопротивление измеряли при напряжении чтения  $U_{чт} = 0.1$  В.

Исследования кинетики РП проводили с помощью генератора Keysight 81150A (передний фронт нарастания импульса напряжения 2.5 нс) и двухканального осциллографа Agilent MSO6052A (500 МГц, 4 GSa/s) по стандартной схеме (см., например, [12]). Верхний и нижний электроды структуры были подключены к измерительным каналам осциллографа с 50-омными входными сопротивлениями. На верхний электрод мемристора подавался относительно земли одиночный

импульс напряжения, который измеряли с помощью первого канала осциллографа, а возникающий ток через мемристор при РП структуры регистрировали посредством второго его канала.

Все исследования были выполнены при комнатной температуре.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Темнопольные ПРЭМ-изображения вертикального сечения структуры  $M/(CoFeB)_x(LiNbO_3)_{100-x}/M$  с оптимальным значением  $x_{opt} \approx 15$  ат. % при разных увеличениях показаны на рис. 1. Анализ данных ПРЭМ (рис. 1а) и ЭРМ показывают, что синтезированная структура соответствует многослойной композиции  $Cr/Cu/Cr/(CoFeB)_x(LiNbO_3)_{100-x}/Cr/Cu/Cr$  с толщинами металлических электродов  $Cr/Cu/Cr$  от 1.5 до 2 мкм и толщиной слоя НК около 1.6 мкм. Темнопольное ПРЭМ-изображение (рис. 1б) демонстрирует в увеличенном масштабе область М/НК/М-структуры у нижнего электрода. Видно, что на расстояниях  $\sim 50$  нм от нижнего электрода структуры формируется слой НК с однородным распределением гранул, размеры которых составляют около 3 нм. Между тем у нижнего электрода слой НК сильно неоднороден. В процессе роста НК вначале возникает оксидная прослойка толщиной  $\approx 15 \dots 18$  нм, в которой гранулы практически отсутствуют; затем формируется прослойка НК с крупными гранулами размером до 7 нм, переходящая в однородный слой НК с 3 нм гранулами на расстояниях от электрода, превышающих  $\sim 50$  нм.

Анализ ЭРМ данных показывает, что оксидная прослойка состоит преимущественно из аморфного  $\text{LiNbO}_3$ .

Особенностью М/НК/М-структур является сильная зависимость формы и гистерезиса их ВАХ от состава НК, т.е. величины  $x$  [7]. ВАХ структур со встроенной прослойкой  $\text{LiNbO}_3$  были изучены в режиме ограничения по току на уровне 50 мА. Оказалось, что, как и в [7], гистерезис в ВАХ, характерный для эффекта РП, наиболее сильно наблюдается при некотором оптимальном значении  $x \approx 15$  ат. % (рис. 2а). При этом достигается отношение  $R_{\text{off}}/R_{\text{on}} \approx 300$  при  $U_{\text{чт}} = 0.1$  В. При значениях  $x$ , больших порога перколяции (для данных структур  $x_p \approx 17$  ат. %), петля гистерезиса исчезает и ВАХ становится линейной, как для металлических систем [7], а при  $x < x_p$  петля оказывается сильно вытянутой, что свидетельствует о слабом эффекте РП (рис. 2б).

Важную роль для применений мемристивных структур, в частности при создании нейроморфных систем, играет их пластичность, т.е. способность под действием напряжения принимать произвольное резистивное состояние в окне ( $R_{\text{on}} - R_{\text{off}}$ ) и хранить его во времени [1–4]. Это важное свойство позволяет эмулировать синапсы (контакты между нейронами) в биологических нейронных системах, в которых обучение происходит благодаря способности синапсов изменять свой вес, т.е. за счет их пластичности [1–4, 18].

В созданных структурах  $\text{M}/(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}/\text{M}$  с прослойкой  $\text{LiNbO}_3$  при  $x \approx 15$  ат. % удается с использованием метода [19] задать не менее четырех различных резистивных состояния с точностью лучше 1%, которые сохраняются на протяжении времени, превышающем  $10^4$  с (рис. 3). Пластичность и высокая временная стабильность образцов позволили продемонстрировать возможность изменения их резистивного состояния по биоподобным правилам типа STDP. Согласно STDP синаптический вес увеличивается в случае, если постсинаптический нейрон генерирует импульс (спайк) сразу после пресинаптического, указывая на наличие причинно-следственной связи; в обратном случае вес падает (см. [17] и ссылки там). Проводимость  $G$  мемристора можно связать с синаптическим весом  $W$ , тогда изменение проводимости  $\Delta G$  будет эквивалентно изменению  $W$ .

Для проверки возможности изменения проводимости НК мемристоров по правилам STDP нижний электрод М/НК/М-структуры был использован как пресинаптический вход, а верхний – как постсинаптический. Длительность спайков составляла 60 мс, а величина их амплитуды была выбрана равной 3 В, при которой одиночный спайк не приводит к изменению резистивного состояния структуры. Однако если два спайка с малой задержкой между ними по времени  $\Delta t$  будут по-

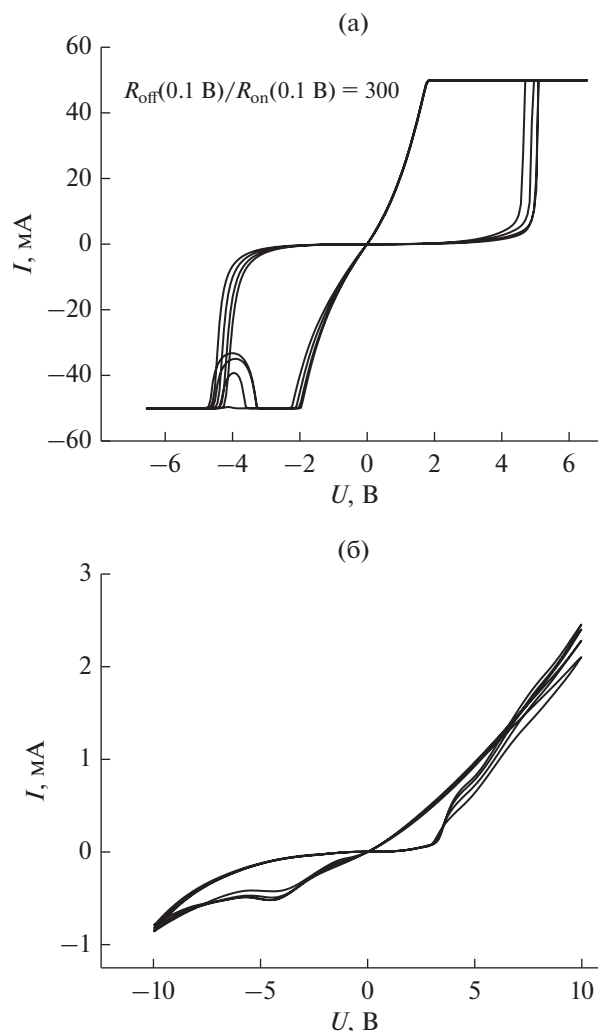
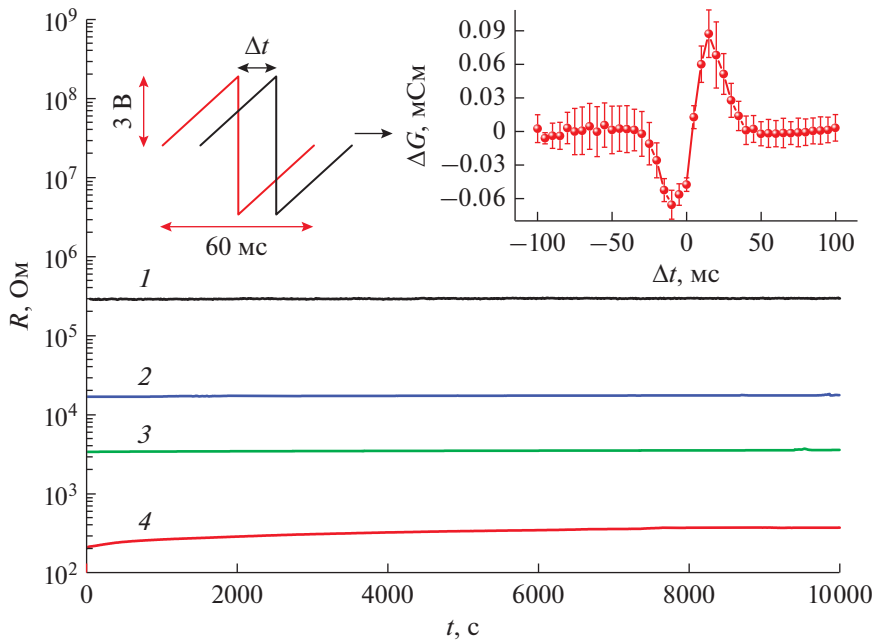


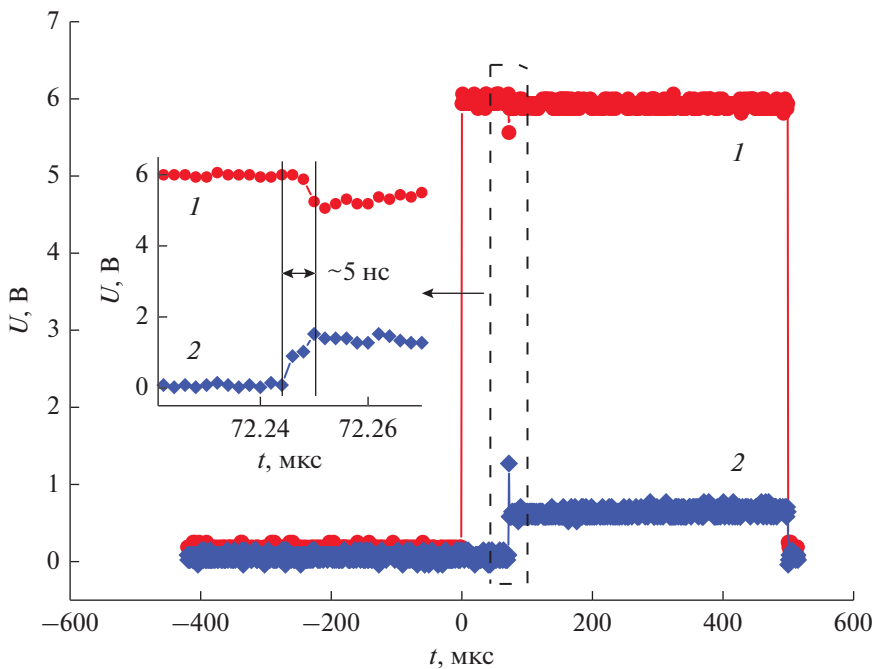
Рис. 2. ВАХ структуры  $\text{M}/(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}/\text{M}$  с содержанием ферромагнитного сплава  $x \approx 15$  (а) и 10 ат. % (б).

даны на мемристор (см. вставку к рис. 3), падение напряжения на нем может оказаться достаточным для изменения его резистивного состояния. Для получения окна STDP (зависимость изменения веса синапса от  $\Delta t$ ) измеряли проводимость мемристора до ( $G_1$ ) и после ( $G_2$ ) подачи последовательности пре- и постсинаптических спайков. Зависимость изменения проводимости  $\Delta G = G_2 - G_1$  от  $\Delta t$  показана на вставке к рис. 3. Из рисунка видно, что при  $\Delta t > 0$  наблюдается синаптическая потенциация ( $\Delta G > 0$ ), а при  $\Delta t < 0$ , наоборот, – депрессия ( $\Delta G < 0$ ). Подобный вид зависимости  $W(\Delta t)$  наблюдается и в биологических системах [20].

Неожиданной оказалась кинетика РП при переходе мемристивной М/НК/М-структуры из высоко- в низкоомное состояние после подачи на нее импульса напряжения амплитудой 6 В, которое заведомо превышает напряжение РП для выбран-



**Рис. 3.** Зависимость электрического сопротивления  $R$  от времени для структуры  $M/(CoFeB)_x(LiNbO_3)_{100-x}/M$  с содержанием ферромагнитного сплава  $x \approx 15$  ат. % в различных резистивных состояниях (Ом):  $1 - 2.9 \times 10^5$ ,  $2 - 1.7 \times 10^4$ ,  $3 - 3.4 \times 10^3$ ,  $4 - 3.3 \times 10^2$ . Напряжение чтения  $U_{чт} = 0.1$  В. На вставках: справа – окно STDP для данных структур при амплитуде импульсов (спайков) 3 В и их длительности 60 мс; слева – иллюстрация импульсов, использованных в эксперименте для получения окна STDP.



**Рис. 4.** Кинетика резистивного переключения структуры  $M/(CoFeB)_x(LiNbO_3)_{100-x}/M$  с  $x \approx 15$  ат. % из высокоомного состояния в низкоомное:  $1$  – импульс напряжения от генератора, подаваемый на верхний электрод структуры;  $2$  – напряжение, регистрируемое на нагрузочном 50-Омном входном сопротивлении осциллографа. На вставке показана область РП в увеличенном масштабе (отмечена штриховой линией).

ной структуры ( $\approx 5$  В; см. рис. 2). На рис. 4 показаны импульс напряжения, подаваемый на верхний электрод структуры (кривая 1), и переходной ток (кривая 2), возникающий в цепи и регистрируемый на нагрузочном 50-омном входном сопротивлении осциллографа. Обращает на себе внимание довольно значительная задержка  $t_3$  в РП после подачи импульса ( $t_3 \approx 70$  мкс) и резкое переключение структуры в низкоомное состояние, достигающее  $t_{\text{РП}} \approx 5$  нс (см. вставку к рис. 4). Несложно оценить, что затраты энергии на РП структуры на стадии резкого уменьшения сопротивления довольно малы ( $< 1$  нДж) при токах переключения  $\sim 10$  мА и площади структур  $S = 0.5 \times 0.2$  мм<sup>2</sup>. Однако при площади структур  $50 \times 50$  мкм<sup>2</sup> токи переключения снижаются до  $\leq 0.1$  мА [10]. Поэтому можно ожидать, что и энергопотребление снизится до  $\sim 1$  пДж, т.е. будет удовлетворять современным требованиям к мемристивным структурам для их применений в НВС (см. [21, табл. 1]).

Задержки при РП в низкоомное состояние наблюдали в структурах на основе пленок TaO<sub>x</sub> толщиной 5 нм, типичное время которых  $t_3$  не превышало 1 мкс при  $t_{\text{РП}} \approx 20$  нс, что объяснялось движением вакансий, формирующих проводящие филаменты [13]. В М/НК/М-структурах толщина прослойки LiNbO<sub>3</sub> (15...18 нм; см. рис. 1) всего лишь в три раза превышает толщину пленок TaO<sub>x</sub>. При этом  $t_3$  в нашем случае почти на два порядка выше, а  $t_{\text{РП}}$  в четыре раза меньше, чем в [13]. По-видимому, это связано с двухступенчатым характером РП в М/НК/М-структурах, предсказанным в [5], а именно:

1) с формированием изолированных цепочек из наногранул и аномально сильным уменьшением их сопротивления в полях  $E > 10^4$  В/см, вследствие подавления эффектов кулоновской блокады и генерации кислородных вакансий;

2) с инъекцией (или экстракцией) вакансий (в зависимости от знака напряжения) в сильно окисленную прослойку НК у электрода структуры, контролирующую ее сопротивление.

Первый процесс определяется всей толщиной НК пленки и может быть длительным, целиком контролируя задержку между поданным на М/НК/М-структуру импульсом напряжения и ее РП в низкоомное состояние. Изучение возможности контроля этого процесса и детализация его механизма требуют дальнейших исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе изучено РП мемристивных М/НК/М-структур на базе НК (Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub>)<sub>x</sub> (LiNbO<sub>3</sub>)<sub>100-x</sub> ( $x = 8...20$  ат. %), синтезированных методом ионно-лучевого распыления при повы-

шенном содержании кислорода ( $\approx 2 \times 10^{-5}$  Торр) на начальном этапе роста НК. Методами ПРЭМ установлено, что полученный НК состоит из трех областей: тонкая аморфная прослойка LiNbO<sub>3</sub> (15...18 нм) у нижнего электрода, далее слой НК с крупными гранулами CoFe размером до 7 нм, переходящий на расстоянии 50 нм от нижнего электрода в однородный слой НК с 3 нм гранулами. Структуры демонстрируют стабильные РП с отношением сопротивлений  $R_{\text{off}}/R_{\text{on}} > 300$ , обладают возможностью задания промежуточных состояний в данном окне и способностью изменять сопротивление по биоподобным правилам типа STDP. Показано, что время хранения резистивных состояний превышает  $10^4$  с. Обнаружена необычная кинетика РП структур при их переходе из высоко- в низкоомное состояние, а именно: РП возникает с большой задержкой  $\sim 70$  мкс, при этом время переключения достигает  $\sim 5$  нс. В этих условиях затраты энергии на РП структуры составляют около 1 нДж при площади структур  $S = 0.5 \times 0.2$  мм<sup>2</sup> и токах переключения  $\sim 10$  мА, которые, однако, могут быть понижены до  $\leq 0.1$  мА при площади структур  $50 \times 50$  мкм<sup>2</sup>. Поэтому можно ожидать, что энергопотребление снизится до  $\sim 1$  пДж и будет удовлетворять современным требованиям к мемристивным структурам для их применений в НВС.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена с использованием оборудования ресурсных центров НИЦ “Курчатовский институт” при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10233) в части синтеза мемристоров, исследования их структурных и временных характеристик, а также Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-37-00267, 18-07-00729, 19-07-00738) и государственного задания в части изучения электрофизических свойств структур.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Handbook of Memristor Networks* / Ed. Chua L., Sirkoulis G.Ch., Adamatzky A. Cham: Springer, 2019.
2. *Ielmini D.* // *Semicond. Sci. Technol.* 2016. V. 31. № 6. P. 063002.
3. *del Valle J., Ramirez J.G., Rozenberg M.J. et al.* // *J. Appl. Phys.* 2018. V. 124. P. 211101.
4. *Xia Q., Yang J.J.* // *Nature Materials.* 2019. V. 18. P. 309.
5. *Рыльков В.В., Николаев С.Н., Демин В.А. и др.* // *ЖЭТФ.* 2018. Т. 153. № 3. С. 424.
6. *Choi B.J., Antonio C.T., Kate J.N. et al.* // *Nano Lett.* 2013. V. 13. P. 3213.
7. *Леванов В.А., Емельянов А.В., Демин В.А. и др.* // *РЭ.* 2018. Т. 63. № 5. С. 489.

8. Nikiruy K.E., Emelyanov A.V., Demin V.A. et al. // AIP Advances. 2019. V. 9. № 6. P. 065116.
9. Emelyanov A.V., Nikiruy K.E., Serenko A.V. et al. // Nanotechnology. 2020. V. 31. № 4. P. 045201.
10. Никуруй К.Э., Емельянов А.В., Рьльков В.В. и др. // РЭ. 2019. Т. 64. № 10. С. 1019.
11. Ielmini D., Wong H.-S.P. // Nature Electronics. 2018. V. 1. P. 333.
12. Menzel S., Waters M., Marchewka A. et al. // Adv. Funct. Mater. 2011. V. 21. P. 4487.
13. Nishi Y., Menzel S. // IEEE Electron Device Lett. 2014. V. 35. № 2. P. 259.
14. Yu S., Wu Y., Wong H.-S.P. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. № 10. P. 103514.
15. Choi B.J., Choi S., Kim K.M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. № 1. P. 012906.
16. Rylkov V.V., Nikolaev S.N., Chernoglazov K.Yu. et al. // Phys. Rev. B. 2017. V. 95. P. 144202.
17. Zarudnyi K., Mehonic A., Montesi L. et al. // Front. Neurosci. 2018. V. 12. P. 57.
18. Prezioso M., Merrih-Bayat F., Hoskins B.D. et al. // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 21331.
19. Никуруй К.Э., Емельянов А.В., Рьльков В.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 8. С. 19.
20. Hennequin G., Agnes E.J., Vogels T.P. // Annu. Rev. Neurosci. 2017. V. 40. № 1. P. 557.
21. Lanza M., Wong H.-S.P., Pop E. et al. // Adv. Electron. Mater. 2019. V. 5. P. 1800143.