

Резистивное переключение мемристоров на основе стабилизированного диоксида циркония сложными сигналами

© Д.О. Филатов, Д.А. Антонов, И.Н. Антонов, А.И. Белов, В.Н. Баранова, М.Е. Шенина, О.Н. Горшков

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

E-mail: dmitry_filatov@inbox.ru

Поступила в Редакцию 31 октября 2019 г.

В окончательной редакции 31 октября 2019 г.

Принята к публикации 19 октября 2019 г.

Изучены особенности резистивного переключения в экспериментальных образцах мемристоров на основе тонких пленок стабилизированного иттрием диоксида циркония треугольными импульсами, на которые накладывался высокочастотный синусоидальный сигнал. Обнаружено уменьшение значений напряжения переключения мемристора из низкоомного состояния в высокоомное и обратно, а также увеличение отношения значений силы тока через мемристор в указанных состояниях и долговременной стабильности тока при наложении синусоидального сигнала на переключающие импульсы по сравнению с переключениями треугольными импульсами без синусоидального сигнала. Улучшение характеристик резистивного переключения связано с резонансной активацией миграции ионов кислорода по вакансиям в переменном внешнем электрическом поле.

Ключевые слова: мемристор, резистивное переключение, стабилизированный диоксид циркония, резонансная активация.

DOI: 10.21883/FTT.2020.04.49120.620

1. Введение

Эффект резистивного переключения (РП) заключается в обратимом бистабильном (мультистабильном) изменении электросопротивления диэлектрической прослойки между двумя проводящими электродами под действием электрического напряжения, приложенного к электродам [1,2]. Общепринятым в настоящее время механизмом РП в оксидах металлов считается разрушение и восстановление проводящих каналов (филаментов) из вакансий кислорода, формирующихся внутри слоя функционального диэлектрика под действием электрического поля между электродами в ходе предварительного электроформинга [3]. Электронные приборы, принцип действия которых основан на эффекте РП, получили название мемристоров [4]. Данные приборы считаются перспективными для создания устройств энергонезависимой компьютерной памяти нового поколения [5], нейроморфных вычислительных устройств [6] и др.

В настоящий момент широкое практическое применение мемристоров сдерживается недостаточной стабильностью параметров РП, таких как напряжение переключения пленок функционального диэлектрика из состояния с высоким сопротивлением (СВС) в состояние с низким сопротивлением (СНС) — так называемый SET процесс — и обратно (RESET процесс) V_{SET} и V_{RESET} соответственно, значения силы тока через мемристор в СВС и СНС I_{OFF} и I_{ON} соответственно, а также деградацией мемристоров в процессе эксплуатации [7]. Разрушение и восстановление филаментов носят стохастический характер, поскольку типичные поперечные

размеры филаментов составляют $\sim 1-10$ nm [8], а в переключениях участвует лишь ограниченное (малое) количество ионов кислорода (кислородных вакансий) вблизи оконечности филамента, ближайшей к интерфейсу с электродом [9]. В настоящее время развивается ряд различных подходов к повышению стабильности параметров мемристоров: выбор оптимальных комбинаций материалов диэлектрика и электродов [10], использование многослойных диэлектриков [11], применение переключающих сигналов специальной формы [12,13] и др. Несмотря на значительный прогресс в области повышения долговечности мемристоров, достигнутый в последние годы (так, в экспериментальных образцах было достигнуто число переключений до 10^9 [11]), проблема долговременной нестабильности параметров мемристоров еще далека от окончательного решения.

В [14] был применен инновационный подход к решению проблемы повышения стабильности мемристоров, основанный на использовании эффекта конструктивной роли шума в нелинейных системах. Для этого на прямоугольный переключающий сигнал накладывался белый шум регулируемой мощности. Было отмечено повышение временной стабильности мемристора в случае переключения с наложением шума, при этом зависимость стабильности РП от мощности шума имела выраженный максимум. В [15] был использован подход к повышению стабильности параметров мемристоров, основанный на концепции стохастического резонанса [16]. Было экспериментально продемонстрировано улучшение соотношения сопротивлений исследуемых мемристоров в СВС и СНС в условиях стохастического резонанса (до 3.4 раза),

при этом разброс параметров мемристоров от одного устройства к другому в пределах 60% слабо влиял на обнаруженный эффект.

В [17] исследовано РП в контакте проводящего зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) к тонкой пленке стабилизированного иттрием диоксида циркония $ZrO_2(Y)$ на проводящей подложке при переключении треугольными импульсами с наложением высокочастотного (ВЧ) синусоидального сигнала. $ZrO_2(Y)$ считается перспективным функциональным диэлектриком для мемристивных приборов в связи с высокой подвижностью кислородных вакансий [18]. Одной из проблем в разработке мемристивных устройств энергонезависимой памяти является проблема масштабирования [19]: закономерности РП, установленные при исследованиях модельных мемристоров с микрометровыми размерами электродов (под которыми может формироваться большое количество филаментов), оказываются отличными от закономерностей РП мемристоров с электродами нанометровых размеров, под которыми может поместиться небольшое количество филаментов (в пределе — один филамент). Типичные размеры области контакта острия АСМ зонда с Pt покрытием к поверхности пленок $ZrO_2(Y)$ $D_p < 10$ nm [20], что соответствует ожидаемым размерам ячеек перспективной мемристивной памяти [21]. Таким образом, контакт проводящего АСМ зонда к поверхности диэлектрической пленки на проводящей подложке представлял собой удобную модельную систему (виртуальный мемристор) для изучения особенностей РП в масштабах, соответствующих ожидаемым размерам перспективных мемристивных устройств [22]. В [17] было обнаружено, что отношение значений силы тока через контакт АСМ зонда к поверхности пленки $ZrO_2(Y)$ в СНС и СВС I_{ON}/I_{OFF} , а также их временная стабильность увеличиваются при наложении на треугольные переключающие импульсы ВЧ синусоидального сигнала частотой $f \sim 1$ kHz по сравнению с переключениями треугольными импульсами без наложения синусоидального сигнала. Обнаруженный эффект был связан с резонансной активацией миграции ионов кислорода по вакансиям в переменном внешнем электрическом поле.

В настоящей работе исследовано РП в макетах мемристивных устройств памяти на базе тонких пленок $ZrO_2(Y)$ при переключении треугольными импульсами с наложением ВЧ синусоидального сигнала. Целью настоящей работы являлось исследование влияния ВЧ сигнала на РП мемристивных устройств с макроскопическими (микрометровых размеров) электродами в сравнении с результатами, полученными ранее при исследовании РП в нанометровом масштабе с помощью АСМ [17].

2. Методика эксперимента

Исследуемые структуры $Au/Zr/ZrO_2(Y)$ формировались на Si(001) подложках с подслоями металлизации Ti и TiN (толщиной 25 nm каждый), следующим образом:

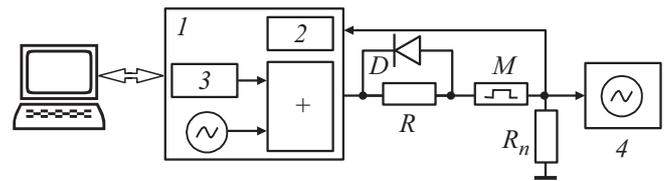


Рис. 1. Схема эксперимента по исследованию РП мемристора треугольными импульсами с наложением ВЧ синусоидального сигнала: 1 — АСМ контроллер Solver Pro, 2 — АЦП, 3 — ЦАП, 4 — осциллограф, M — исследуемый мемристор, R — ограничивающий резистор, D — диод, R_n — сопротивление нагрузки.

методом ВЧ магнетронного осаждения при температуре подложки $T_g = 300^\circ C$ наносились слои $ZrO_2(Y)$ (~ 12 mol.% Y_2O_3) толщиной 40 nm, поверх которых методом магнетронного осаждения на постоянном токе при $T_g = 200^\circ C$ наносились слои Zr (8 nm) и Au (40 nm). На основе данных структур методом фотолитографии формировались макеты мемристивных устройств памяти типа кросс-пойнт с размером активной области $20 \times 20 \mu m$. Активные области мемристоров закрывались защитным слоем SiO_2 . Более детально процедура формирования мемристивных структур, а также результаты исследований их структуры и электрофизических свойств макетов мемристивных устройств на их основе приведены в [23].

Исследования РП проводились в схеме 1M1R (1 мемристор — 1 резистор) при помощи установки, схема которой приведена на рис. 1. В качестве программируемого источника прикладываемого к электродам мемристора напряжения, зависящего от времени, $V(t)$, использовался цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) контроллера АСМ Solver Pro производства компании НТ-МДТ (Россия) под управлением программного обеспечения Nova 1138 (разработчик — компания НТ-МДТ) при помощи оболочки для разработки пользовательских скриптов Nova Power Script. Ограничение силы тока через мемристор I в СНС осуществлялось при помощи ограничивающего резистора $R = 10$ k Ω , шунтированного кремниевым диодом Д220. Сигнал, пропорциональный силе тока через мемристор, $I(t)$, снимался с сопротивления нагрузки $R_n = 1$ k $\Omega \sim 0.1R$ и подавался на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) контроллера АСМ Solver Pro. Контроль формы осциллограмм тока через мемристор $I(t)$ осуществлялся при помощи цифрового осциллографа Agilent 3000A.

В эксперименте измерялись циклические вольт-амперные характеристики (ВАХ) мемристора $I(V)$ при линейной развертке V от $V_{min} < V_{RESET}$ до $V_{max} > V_{SET}$ и обратно до V_{min} и т.д. Значения V_{min} и V_{max} варьировались в пределах $-(3-5)$ V и $+(5-6)$ V соответственно. Период повторения переключающих импульсов T_i составлял 1–5 s.

Из анализа циклических ВАХ определялись такие параметры РП, как V_{SET} и V_{RESET} , а также значе-

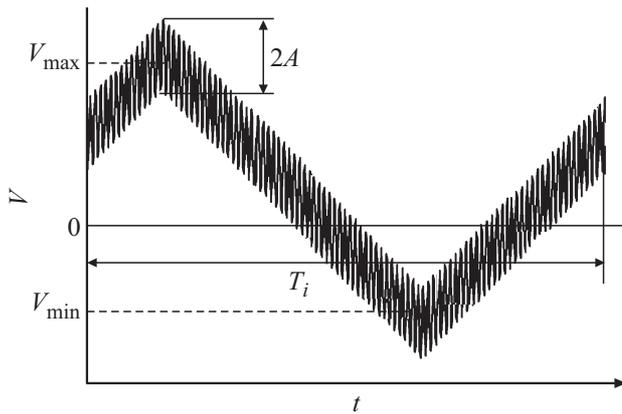


Рис. 2. Осциллограмма переключающего сигнала при наложении ВЧ синусоидального сигнала (качественно).

ния I в СВС и СНС I_{OFF} и I_{ON} соответственно, при $0 < V_g = V_{read} < V_{SET}$.

С целью исследования влияния дополнительного ВЧ синусоидального сигнала на параметры РП, на треугольные переключающие импульсы накладывалось переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $A = 0-2\text{ V}$ и частотой $f = 0.4-10\text{ kHz}$. Пример осциллограммы переключающего пилообразного напряжения $V(t)$ с наложенным синусоидальным сигналом приведен на рис. 2. В качестве источника синусоидального напряжения использовался программируемый цифровой генератор синусоидального сигнала контроллера ACM Solver Pro. Выбор частоты синусоидального сигнала f был обусловлен следующими соображениями. Как уже упоминалось выше, (см. [17]) улучшение параметров РП при переключении пилообразным напряжением с наложением ВЧ синусоидального сигнала, наблюдавшееся ранее с использованием ACM, было связано с резонансной активацией миграции ионов O^{2-} по вакансиям кислорода в $ZrO_2(Y)$ под действием переменного внешнего напряжения. С другой стороны, как было установлено в [24,25], энергия активации миграции ионов O^{2-} по вакансиям кислорода, которая является основным фундаментальным элементарным процессом механизма РП, $E_a = 0.52-0.68\text{ V}$ (для так называемых активных вакансий, имеющих атом Y в первой координационной сфере [26]). Исходя из указанных значений E_a , характерная частота перескоков ионов O^{2-} на соседние вакансии f_i может быть оценена по формуле

$$f_i \sim f_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

где f_0 — фононная частота ($\sim 10^{13}\text{ Hz}$), k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Согласно (1), для значений E_a , приводимых в [24,25], значения f_i при $T = 300\text{ K}$ лежат в диапазоне $0.4-8\text{ kHz}$. Значения частоты ВЧ синусоидального сигнала f в экспериментах, проводимых в рамках настоящей работы, выбирались в пределах указанного диапазона.

Параметры процесса РП в мемристоре при переключении треугольными импульсами с наложением ВЧ синусоидального сигнала (рис. 2) ($A = 0.2\text{ V}$, $f = 1\text{ kHz}$) и без него

Параметр	С наложением ВЧ синусоидального сигнала		Без наложения	
	среднее	σ	среднее	σ
$V_{SET}, \text{ V}$	3.348	0.828	4.782	0.133
$V_{RESET}, \text{ V}$	-2.501	0.378	-3.446	0.340
$I_{ON}, \text{ mA}$	0.10	0.043	0.18	0.19
$I_{OFF}, \mu\text{A}$	2	2	7	9
I_{ON}/I_{OFF}	50	28.5	25.7	5.9

3. Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведен пример циклической ВАХ мемристора, на которой наблюдается выраженный гистерезис, обусловленный биполярным РП в пленке $ZrO_2(Y)$. Заметим, что ВАХ исследованных мемристоров является асимметричной: значения $|V_{SET}| > |V_{RESET}|$. Заметим также, что переход из СВС в СНС (SET процесс) является резким, в то время как обратный переход из СНС в СВС (RESET процесс) является более плавным (такой тип RESET процесса в англоязычной литературе получил название gradual reset). Подобная форма ВАХ является типичной для мемристоров с функциональными диэлектриками на базе оксидов металлов, принцип действия которых основан на процессах окисления и восстановления атомов металлов вблизи интерфейсов функционального диэлектрика с металлическими электродами (так называемые redox процессы) [1].

На рис. 4 приведены зависимости значений I_{ON} и I_{OFF} при $V_{read} = 2\text{ V}$ от количества циклов переключения N для случаев переключения треугольными импульсами с наложением синусоидального сигнала с амплитудой $A = 0.2\text{ V}$ и частотой $f = 1\text{ kHz}$ и без наложения синусоидального сигнала.

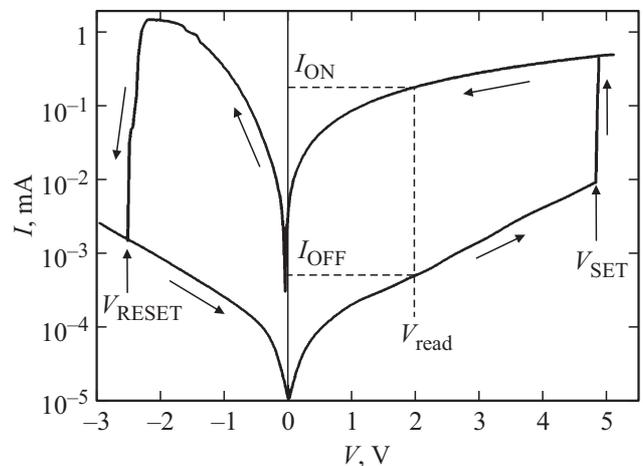


Рис. 3. Циклическая ВАХ мемристора на базе структуры Au/Zr/ZrO₂(Y)/TiN/Ti/SiO₂/Si.

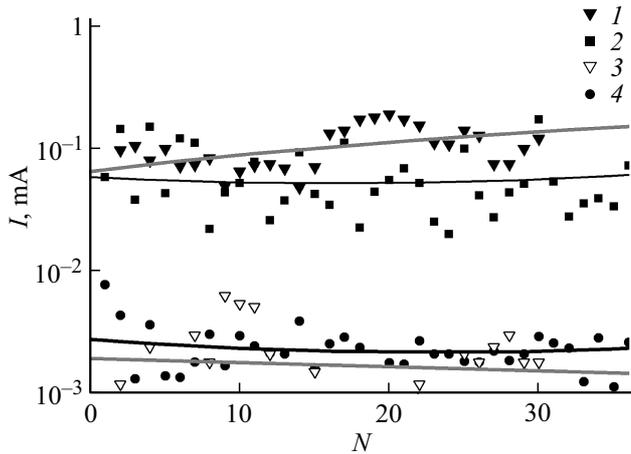


Рис. 4. Зависимости силы тока через мемристор в СНС I_{ON} (1, 2) и СВС I_{OFF} (3, 4) от количества переключений N . $V_{read} = 2$ В. 1, 3 — с наложением синусоидального сигнала ($A = 0.2$ В, $f = 1$ kHz), 2, 4 — без наложения синусоидального сигнала.

соидального сигнала. В таблице приведены усредненные параметры РП мемристора (V_{SET} , V_{RESET} , I_{ON} и I_{OFF} , а также отношения I_{ON}/I_{OFF}), определенные из анализа серии из 35 циклических ВАХ.

Значение отношения I_{ON}/I_{OFF} при переключении с наложением ВЧ синусоидального сигнала существенно (примерно 2 раза) превышало соответствующее значение при переключении треугольными импульсами без наложения синусоидального сигнала (см. таблицу). Аналогичное увеличение отношения I_{ON}/I_{OFF} при наложении ВЧ синусоидального сигнала наблюдалось ранее при исследовании локального РП в пленках $ZrO_2(Y)$ при помощи АСМ [17].

Также на рис. 4 показаны линии тренда, аппроксимирующие зависимости I_{ON} и I_{OFF} от N полиномом 2-го порядка. В случае переключения треугольными импульсами с наложением ВЧ синусоидального сигнала линии тренда соответствуют возрастанию I_{ON} и I_{OFF} с увеличением N . В случае переключения треугольными импульсами без наложения ВЧ синусоидального сигнала линии тренда как для I_{ON} , так и для I_{OFF} остаются практически постоянными при изменении N в пределах от 1 до 35.

В [17] для результатов, полученных методом АСМ, было отмечено противоположное поведение трендов I_{ON} и I_{OFF} .

На рис. 5, *a* и *c* представлены гистограммы распределений V_{SET} , а на рис. 5, *b* и *d* — V_{RESET} для случаев переключения с наложением ВЧ синусоидального сигнала (рис. 5, *a* и *b*) и без наложения синусоидального сигнала (рис. 5, *c* и *d*). В обоих случаях

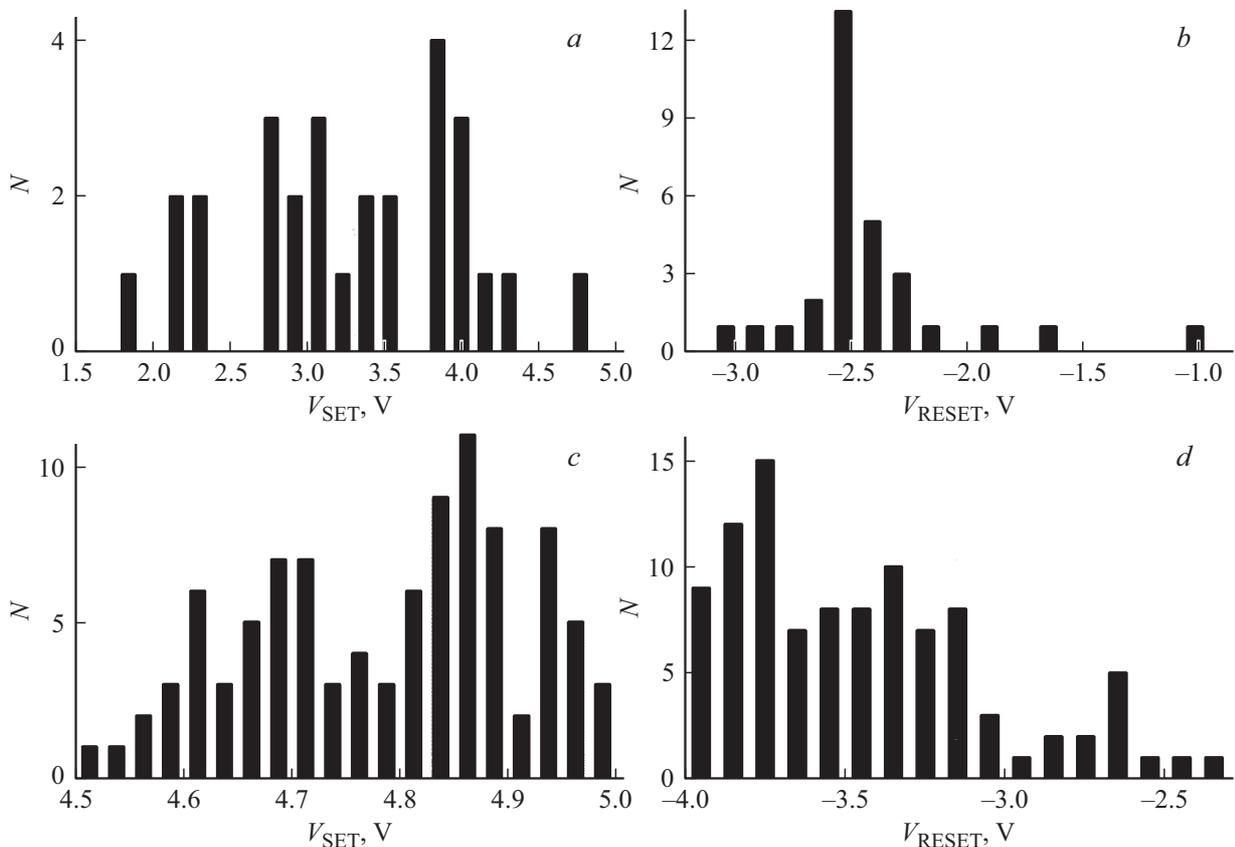


Рис. 5. Гистограммы распределений напряжений переключения мемристора из СВС в СНС V_{SET} (*a*, *c*) и обратно из СНС в СВС V_{RESET} (*b*, *d*) с наложением синусоидального сигнала ($A = 0.2$ В, $f = 1$ kHz) (*a*, *b*) и без наложения синусоидального сигнала (*c*, *d*).

(как в случае наложения ВЧ синусоидального сигнала, так и без него) распределения V_{SET} и V_{RESET} были существенно асимметричными. В случае переключения с наложением ВЧ синусоидального сигнала значения разброса значений как V_{SET} , так и V_{RESET} от одного цикла переключения к другому были значительно больше, чем соответствующие значения при переключении треугольными импульсами без наложения синусоидального сигнала (см. таблицу). Отметим, что в [17] при изучении влияния наложения ВЧ синусоидального сигнала на треугольные переключающие импульсы методом АСМ наблюдалась обратная ситуация: распределения V_{SET} и V_{RESET} в случае переключения с наложением синусоидального сигнала были более узкими, чем при переключении треугольными импульсами.

С другой стороны, относительный разброс значений I_{ON} от цикла к циклу $\sigma I_{ON}/\langle I_{ON} \rangle$, где $\langle I_{ON} \rangle$ — среднее значение I_{ON} в серии измерений, σI_{ON} — среднеквадратичное отклонение значений I_{ON} от $\langle I_{ON} \rangle$, при измерениях с наложением синусоидального сигнала был в ≈ 2 раза меньше, чем без синусоидального сигнала (≈ 0.43 и ≈ 1.06 соответственно). В то же время, в измерениях методом АСМ, [17] относительная дисперсия значений I_{ON} и I_{OFF} была приблизительно одинаковой при переключении с наложением синусоидального сигнала и без него. Сравнение дисперсии значений I_{OFF} затрудняется малыми значениями I_{OFF} , измеряемыми в СВС, так что $\sigma I_{OFF}/\langle I_{OFF} \rangle \sim 1$.

Наблюдаемое в эксперименте улучшение отношения I_{ON}/I_{OFF} , а также уменьшение V_{SET} и V_{RESET} при наложении ВЧ синусоидального сигнала на треугольные переключающие импульсы может быть связано, как и в [17], с резонансной активацией дрейфа и диффузии ионов O^{2-} по кислородным вакансиям в $ZrO_2(Y)$ под действием внешнего переменного электрического поля. Однако из сравнения результатов, полученных в данной работе, с результатами [17] следует, что модулированные ВЧ синусоидальным сигналом переключающие импульсы воздействуют на характеристики РП мемристора с микрометровыми размерами электродов несколько по-иному, чем на РП виртуального мемристора, образованного контактом АСМ зонда к пленке $ZrO_2(Y)$ на проводящей подложке. Вышеперечисленные различия, в свою очередь, могут быть обусловлены несколькими причинами. Прежде всего следует обратить внимание на различия в размерах и геометрии активной области мемристоров, исследованных в настоящей работе, и виртуальных мемристоров, образованных контактом АСМ зонда к пленке $ZrO_2(Y)$, исследованных в [17]. В первом случае, как уже упоминалось выше, латеральные размеры активной области составляли $\approx 20 \times 20 \mu m$. Во втором случае размеры виртуального мемристора по порядку величины могут быть приравнены к размерам области контакта острого АСМ зонда к поверхности пленки $ZrO_2(Y)$, $D_p \sim 10 \text{ nm}$ [20]. Кроме того, толщина слоя функционального диэлектрика d в мемристорах, исследованных в данной работе ($\approx 40 \text{ nm}$), была в 10 раз

выше, чем толщина пленок $ZrO_2(Y)$, исследованных в [17] ($\approx 4 \text{ nm}$). Несмотря на это, различия в значениях V_{SET} и V_{RESET} для обоих случаев были невелики. Данный факт объясняется тем, что при филаментном механизме РП процессы в мемристорах определяются значением напряженности электрического поля в промежутке между одним из электродов и оконечностью филамента (играющего роль виртуального электрода), ближайшей к этому электроду. Толщина этого промежутка составляет $\sim 1 \text{ nm}$, т.е. того же порядка величины, что и толщина диэлектрических пленок, исследованных методом АСМ [17]. Таким образом, напряженность электрического поля в области функционального диэлектрика, где происходят основные процессы, ответственные за РП, в обоих случаях приблизительно одинакова. Здесь следует подчеркнуть, что несмотря на то что потенциально под электродами микрометровых размеров может находиться большое количество филаментов, на практике, в процессе электроформинга формируется только один филамент, безотносительно площади электродов мемристорной структуры [27].

Основное отличие режимов исследования РП в настоящей работе и в [17] заключается в том, что в первом случае значения силы тока через мемристор I в ходе электроформинга (ограниченные резистором R , см. рис. 1) составляли $\sim 1 \text{ mA}$, тогда как в ходе АСМ измерений [17] значения силы тока через АСМ зонд при электроформинге были $\sim 10 \text{ nA}$. Как следствие, диаметр филаментов, формирующихся в мемристорах с микрометровыми контактами при указанных значениях I , составляет $\sim 6 \text{ nm}$ [28], что значительно больше диаметра филаментов, формирующихся в пленках $ZrO_2(Y)$ при АСМ исследованиях (в пределе — вплоть до атомных размеров). В свою очередь, объем области функционального диэлектрика, в котором напряженность переменной составляющей электрического поля максимальна (т.е. объем области диэлектрической пленки между острием филамента и ближайшим к нему электродом), в первом случае оказывается значительно больше, чем во втором. Необходимо отметить также различия в химическом составе материалов верхних электродов. В мемристорах, исследованных в настоящей работе, на поверхность слоя функционального диэлектрика $ZrO_2(Y)$ наносились химически активные подслои Zr , тогда как в АСМ исследованиях [17] АСМ зонд (играющий роль подвижного верхнего электрода) был покрыт химически инертной алмазоподобной пленкой.

Однако следует подчеркнуть, что, несмотря на существенные различия в размерах, геометрии и составе материалов электродов мемристоров, исследованных в настоящей работе, и виртуальных мемристоров, исследованных в [17], в целом, общие закономерности влияния наложения ВЧ синусоидального сигнала на переключающие импульсы на параметры РП и их временную стабильность были сходными для обеих систем. Для выяснения деталей механизма влияния дополнительного ВЧ сигнала на параметры и стабильность РП,

а также причин различий этого влияния в мемристорах с макроскопическими контактами и при исследовании локального РП методом АСМ необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

4. Заключение

Результаты настоящей работы показывают, что наложение на переключающие треугольные импульсы высокочастотного синусоидального сигнала приводит к увеличению отношения значений силы тока через мемристор в низкоомном и высокоомном состояниях, а также к уменьшению напряжения переключения мемристора между указанными состояниями. Обнаруженный эффект может быть связан с резонансной активацией миграции ионов кислорода по кислородным вакансиям под действием внешнего переменного электрического поля. Сравнение результатов настоящей работы с результатами, полученными ранее при исследовании локального РП в тонких пленках $ZrO_2(Y)$ методом АСМ, показывает, что влияние наложения синусоидального сигнала на переключающие импульсы на параметры РП проявляется в обоих случаях сходным образом. В то же время для выяснения деталей механизма влияния дополнительного ВЧ сигнала на параметры и стабильность РП необходимы дальнейшие исследования.

Благодарности

Исследования выполнены с использованием аппаратных ресурсов центра коллективного пользования — Научно-образовательного центра „Физика твердотельных наноструктур“ Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Нижегородской области (проект № 18-42-520059p_a).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Resistive Switching: From Fundamentals of Nanoionic Redox Processes to Memristive Device Applications / Eds D. Ielmini, R. Waser. Wiley-VCH, Weinheim (2016). 784 p.
- [2] R. Waser, M. Aono. *Nature Mater.* **6**, 833 (2007).
- [3] I. Riess. *J. Electroceram.* **39**, 61 (2017).
- [4] D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, R.S. Williams. *Nature* **453**, 80 (2008).
- [5] J. Ouyang. *Emerging Resistive Switching Memories*. Springer, Berlin–Heidelberg (2016). 93 p.
- [6] Memristor and Memristive Neural Networks / Ed. A. James. IntechOpen, Rijeka (2018). 314 p.
- [7] D. Ielmini. *Semicond. Sci. Technol.* **31**, 063002 (2016).
- [8] G.S. Park, Y.B. Kim, S.Y. Park, X.S. Li, S. Heo, M.-J. Lee, M. Chang, J.H. Kwon, M. Kim, U.-I. Chung, R. Dittmann, R. Waser, K. Kim. *Nature Commun.* **4**, 2382 (2013).
- [9] J.S. Lee, S. Lee, T.W. Noh. *Appl. Phys. Rev.* **2**, 031303 (2015).
- [10] L. Zhu, J. Zhou, Z. Guo, Z. Sun. *J. Materiom.* **1**, 285 (2015).
- [11] M. Trapatseli, S. Cortese, A. Serb, A. Khiat, T. Prodromakis. *J. Appl. Phys.* **121**, 184505 (2017).
- [12] K.C. Chang, T.C. Chang, T.M. Tsai, R. Zhang, Y.-C. Hung, Y.-E. Syu, Y.-F. Chang, M.-C. Chen, T.-J. Chu, H.-L. Chen, C.-H. Pan, C.-C. Shih, J.-C. Zheng, S.-M. Sze. *Nanoscale Res. Lett.* **10**, 120 (2015).
- [13] C. La Torre, K. Fleck, S. Starschich, E. Linn, R. Waser, S. Menzel. *Phys. Status Solidi A* **213**, 316 (2016).
- [14] G.A. Patterson, P.I. Fierens, D.F. Grosz. *Appl. Phys. Lett.* **103**, 74102 (2013).
- [15] V. Ntinis, A. Rubio, G.Ch. Sirakoulis, S.D. Cotofana. In: Proc. 2019 IEEE Int. Symp. Circuits and Systems. Sapporo, Jpn (May 16-20, 2019). P. 1.
- [16] В.С. Анищенко, А.Б. Нейман, Ф. Мосс, Л. Шиманский-Гайер. *УФН* **169**, 7 (1999).
- [17] Д.О. Филатов, М.Н. Коряжкина, Д.А. Антонов, И.Н. Антонов, Д.А. Лискин, М.А. Рябова, О.Н. Горшков. *ЖТФ* **89**, 1669 (2019).
- [18] F. Pan, J. Jang, V. Subramanian. In: Proc. IEEE 70th Dev. Res. Conf. University Park, PA, USA (June 18-20, 2012). P. 217.
- [19] S. Ambrogio, B. Magyari-Köpc, N. Onofrio, M.M. Islam, D. Duncan, Y. Nishi, A. Strachan. *J. Electroceram.* **39**, 39 (2017).
- [20] D.O. Filatov, D.A. Antonov, O.N. Gorshkov, A.P. Kasatkin, D.A. Pavlov, V.N. Trushin, I.A. Antonov, M.E. Shenina. In: *Atomic Force Microscopy (AFM): Principles, Modes of Operation and Limitations* / Ed. H. Yang. Nova Science, N.Y. (2014). P. 335.
- [21] J.Y. Seok, S.J. Song, J.H. Yoon, K.J. Yoon, T.H. Perk, D.E. Kwon, H. Lim, G.H. Kim, D.S. Jeong, C.S. Hwang. *Adv. Funct. Mater.* **24**, 5316 (2014).
- [22] M. Lanza. *Materials* **7**, 2155 (2014).
- [23] O.N. Gorshkov, A.N. Mikhaylov, A.P. Kasatkin, S.V. Tikhov. *J. Phys., Conf. Ser.* **741**, 012174 (2016).
- [24] S.V. Tikhov, O.N. Gorshkov, I.N. Antonov, A.E. Morozov, M.N. Koryazhkina, D.O. Filatov. *Adv. Cond. Matter Phys.* 2018. Article ID 2028491.
- [25] A.V. Yakimov, D.O. Filatov, O.N. Gorshkov, D.A. Antonov, D.A. Liskin, I.N. Antonov, A.V. Belyakov, A.V. Klyuev, A. Carollo, B. Spagnolo. *Appl. Phys. Lett.* **114**, 253506 (2019).
- [26] В.Г. Заводинский. *ФТТ* **46**, 441 (2004).
- [27] R. Waser, R. Dittmann, G. Staikov, K. Szot. *ADV. Mater.* **21**, 2632 (2009).
- [28] Е.В. Окулич, М.Н. Коряжкина, Д.С. Королев, А.И. Белов, М.Е. Шенина, А.Н. Михайлов, Д.И. Тетельбаум, И.Н. Антонов, Ю.А. Дудин. *Письма в ЖТФ* **45**, 14, 3 (2019).

Редактор Ю.Э. Кутаев