ЖЭТФ, 2025, том 168, вып. 3 (9), стр. 440–448 © 2025

ВЛИЯНИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ НА РЕЗИСТИВНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ И ПРОЦЕДУРУ ФОРМОВКИ МЕМРИСТИВНЫХ OxRAM-УСТРОЙСТВ

Н. В. Андреева [a*], ***Е. А. Рындин*** [a], ***Д. С. Мазинг*** [a], ***А. А. Усикова*** [b], ***А. А. Романов*** [a], ***В. М. Айвазян*** [a], ***М. О. Петров*** [a]

[a] *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) 197022, Санкт-Петербург, Россия*

[b] *Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук 194021, Санкт-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 7 июня 2025 г.,
после переработки 25 июня 2025 г.
Принята к публикации 26 июня 2025 г.

Исследовано влияние физических процессов, связанных с поверхностными токами утечки, на электрофизические свойства и процедуру формовки устройств на базе многоуровневых мемристивных композиций Al_2O_3/TiO_x в конденсаторной структуре, копланарной линии и BEOL-интегрированных. Показано, что токи поверхностной утечки в мемристивных устройствах во многом определяются способом их интеграции и могут изменять вид вольт-амперных характеристик для высокоомных резистивных состояний. Более того, наличие токов утечки существенно увеличивает напряжение формовки мемристивных устройств.

DOI: 10.31857/S0044451025090160

1. ВВЕДЕНИЕ

Аппаратные архитектуры, реализующие концепцию вычислений в памяти, позволяют эффективно решать проблему «бутылочного горлышка» вычислительных систем на базе архитектуры фон Неймана, значительно повышая производительность и энергоэффективность вычислений. В качестве электронной компонентной базы систем вычислений в памяти все шире используются мемристоры на основе тонких металлооксидных пленок. Данные структуры представляют собой элементы энергонезависимой резистивной памяти, обеспечивающие аналоговую перестройку проводимости благодаря сочетанию протекающих в них физических процессов [1–7].

В основе функционирования металлооксидных мемристивных элементов лежат токи утечки в наноразмерных диэлектрических пленках, обусловленные различными механизмами транспорта носителей заряда. С учетом особенностей интеграции мемристивных элементов к объемным токам добавляются поверхностные токи утечки, вклад которых в зависимость тока от напряжения не учитывается при разработке компактных моделей устройств и может маскировать механизмы переключения и транспорта заряда в металлооксидных слоях, информация о которых чаще всего берется на основании анализа формы и характерных особенностей вольт-амперных характеристик (ВАХ) [8]. Данные поверхностные токи утечки определяются материалом межслойного диэлектрика, дизайном устройства и материалами функциональных (рабочих) слоев металлооксидных структур. Они нелинейно зависят от приложенного к структуре напряжения и, интерферируя с объемными токами (с учетом их малых значений), вносят дополнительную стохастичность в процессы многоуровневой перестройки проводимости мемристивных элементов и оказывают существенное влияние на точность аналоговых вычислений в памяти.

В настоящее время технология металлооксидных мемристивных структур находится на этапе своего становления, что определяет актуальность исследования физических процессов, протекающих в объе-

* E-mail: nvandr@gmail.com

ме и на поверхности наноразмерных мемристивных диэлектрических пленок при многоуровневой перестройке их проводимости, и оценки влияния данных процессов на точность выполнения вычислительных операций.

Мемристивные элементы интегрируется в аппаратную часть в структуре кроссбар-массивов. В этом случае многоуровневая перестройка между их энергонезависимыми уровнями проводимости позволяет организовать матрицу мультибитных устройств и реализовать с ее помощью вычисления в памяти в аналоговом виде. Под вычислениями в памяти подразумевается выполнение операций матрично-векторного умножения (МВУ), при которых находится сумма входных напряжений, взвешенная уровнями проводимости мемристивных элементов матрицы. Таким образом, матрица мультибитных мемристивных устройств в нейроморфных электронных модулях обеспечивает параллельное и асинхронное выполнение МВУ за один временной шаг, что приводит к значительному повышению производительности и энергоэффективности вычислений. В нейроморфных системах, предназначенных для аппаратного исполнения алгоритмов нейронных сетей, мемристивные элементы кроссбар-массива рассматриваются в качестве синаптических связей, веса которых задаются уровнями проводимости.

При аппаратном исполнении МВУ на мемристивных кроссбар-массивах одним из ключевых моментов, определяющих энергоэффективность, а в случае нейроморфных процессоров еще и возможность интеграции аппаратного режима обучения, является тип перестройки между уровнями проводимости. В общем случае выделяют три типа перестройки проводимости мемристивных элементов [9]: 1) симметричную, при которой увеличению проводимости при одной полярности прикладываемого напряжения соответствует симметричное уменьшение проводимости при другой полярности; при этом шаг перестройки проводимости по напряжению может быть как равномерным, так и неравномерным; 2) несимметричную, для которой характерный вид зависимости уровней проводимости от прикладываемого к структуре напряжения различается для разных полярностей; 3) одностороннюю, когда одной полярности соответствует плавная перестройка уровня проводимости, а другой — резкое переключение между крайними состояниями диапазона изменения проводимости структуры.

Для металлооксидных мемристивных структур наиболее характерными являются несимметричный и односторонний типы перестройки проводимости [8]. В этом случае динамика сходимости весов нейронной сети в процессе обучения в программной модели будет отличаться от той, которая наблюдается для ее аппаратной реализации [10]. При фиксированных гиперпараметрах это приведет к снижению точности решения задачи нейронной сетью в инференс-режиме и потере режима обучения в нейроморфных модулях.

Данное обстоятельство крайне трудно смоделировать с использованием компактных моделей мемристивных элементов, при разработке которых опираются на их экспериментальные ВАХ. Как правило, квазистатические ВАХ измеряют на прототипах мемристивных устройств, представляющих собой конденсаторные структуры с металлооксидными пленками. Последние наносятся на общий металлический нижний электрод, в то время как верхние электроды формируются через теневую маску. Данные по динамике процессов перестройки проводимости мемристивных устройств берутся из импульсных измерений. Для максимально эффективной передачи энергии коротких управляющих импульсов (согласования по импедансу) прототипы мемристивных устройств для данного типа измерений изготавливаются в виде копланарных линий [11]. И, наконец, при BEOL-интеграции мемристивного устройства в КМОП-технологию в его структуру вводятся дополнительные слои защитных диэлектриков. Несмотря на то, что физика процессов резистивного переключения в мемристивных металлооксидных слоях не определяется способом их интеграции в устройство, на экспериментальные характеристики (в том числе вид ВАХ, особенности перестройки проводимости в импульсном режиме) мемристивных элементов структура самого устройства будет оказывать влияние.

Цель работы заключается в исследовании влияния поверхностных токов утечки на электрофизические характеристики, процедуру электроформовки и особенности резистивного переключения мемристивных устройств на базе композиций Al_2O_3/TiO_x в конденсаторной структуре, копланарной линии и BEOL-интегрированных.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для формирования конденсаторных структур $Ti/Pt/Al_2O_3/TiO_x/Ti/Pt$ использовались подложки монокристаллического кремния p-типа КДБ (12 Ом·см), на которых методом термического

окисления формировался барьерный слой SiO_2 толщиной 300 нм. Нижний электрод наносился методом магнетронного распыления с использованием установки вакуумного напыления УВН(М)-71 и состоял из двух последовательных слоев: адгезионного слоя титана толщиной 10 нм и слоя платины толщиной 50 нм. Параметры осаждения слоев электрода: для слоя титана время осаждения $t = 30$ с, мощность высокочастотного разряда $P = 400$ Вт; для слоя платины $t = 70$ с, $P = 300$ Вт. Температура подложки в процессе синтеза составляла $T = 150\,^{\circ}$C. Толщины слоев электрода контролировались методом атомно-силовой микроскопии (Dimension 3100, Veeco) после взрывной литографии. Последовательность мемристивных слоев диоксида титана и оксида алюминия наносилась методом молекулярного наслаивания (атомно-слоевое осаждение) при температуре $150\,^{\circ}$C на установке Beneq TFS200 с использованием прекурсоров: тетраизопропоксида (IV) титана и деионизованной воды для формирования слоя диоксида титана; тетраметилалюминия и деионизованной воды для формирования слоя оксида алюминия. Благодаря специфике механизма формирования слоев, заключающегося в последовательной адсорбции и химической реакции газообразных прекурсоров на поверхности субстрата при заданной температуре с выполнением условия самонасыщения, технология молекулярного наслаивания позволяет получать пленки с высокой равномерностью по площади, превосходными конформностью и степенью контроля толщины в широком диапазоне температур. Выбор толщин слоев определяется требованиями гарантированной сплошности формируемой мемристивной пленки и обеспечения процесса устойчивого резистивного переключения. Контроль толщин нанесенных слоев диоксида титана (30 нм) и оксида алюминия (5 нм) определялся с использованием метода атомно-силовой микроскопии после взрывной литографии, а также по контрольным образцам (свидетелям) методом эллипсометрии.

Верхние электроды Ti (10 нм) / Pt (50 нм) формировались методом магнетронного распыления с использованием теневой маски (рис. 1).

Для формирования копланарных структур $Ti/Pt/Al_2O_3/TiO_x/Ti/Pt$ (рис. 2) с целью снижения потерь и затухания сигналов использовались подложки высокоомного кремния КЭФ ($\rho > 1000$ Ом·см). Структурные элементы мемристивных структур были сформированы методом обратной фотолитографии в виде копланарных линий, в центре которых на пересечении

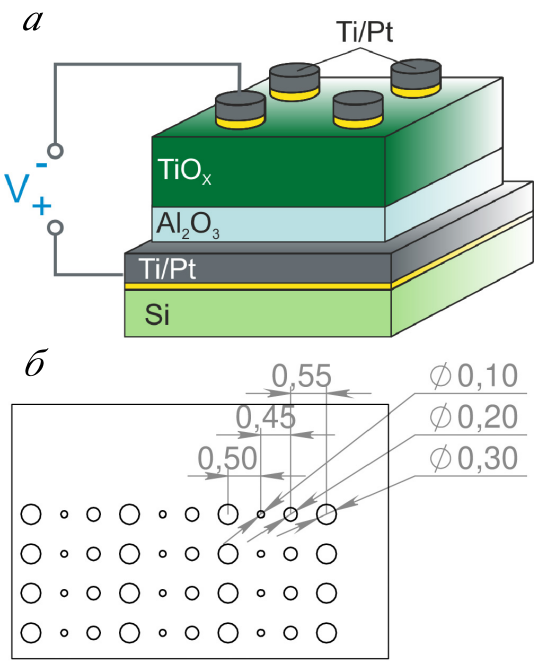

Рис. 1. Схема конденсаторного мемристивного устройства на базе слоев Al_2O_3/TiO_x (*а*) и теневая маска для формирования верхних электродов конденсаторных устройств, размеры указаны в миллиметрах (*б*)

сигнальных нижнего и верхнего проводников были сформированы мемристивные устройства различной площади: 5×5, 8×8, 10×10, 12×12, 15×15, 20×20, 30×30 мкм^2. Нанесение платиновых электродов с адгезионным слоем титана проводилось методом магнетронного напыления. Последовательность мемристивных слоев диоксида титана и оксида алюминия наносилась методом молекулярного наслаивания по разработанному ранее протоколу.

Для изготовления BEOL-интегрированных мемристивных структур со слоями Al_2O_3/TiO_x (рис. 3) были выбраны подходы с использованием конфигурации материалов и методов, совместимых с промышленной КМОП-технологией. Отработка технологического процесса осуществлялась на подложках монокристаллического кремния p-типа КДБ (12 Ом·см), на которых методом термического окисления формировался барьерный слой SiO_2. Технологический процесс включал пять операций обратной фотолитографии и предусматривал создание нижнего электрода (Ti/Pt), защитного диэлектрика (SiO_2), мемристивной композиции в виде последовательности функциональных оксидов (Al_2O_3/TiO_x), верхнего электрода (Ti/Pt), защитного межуровневого слоя (SiO_2).

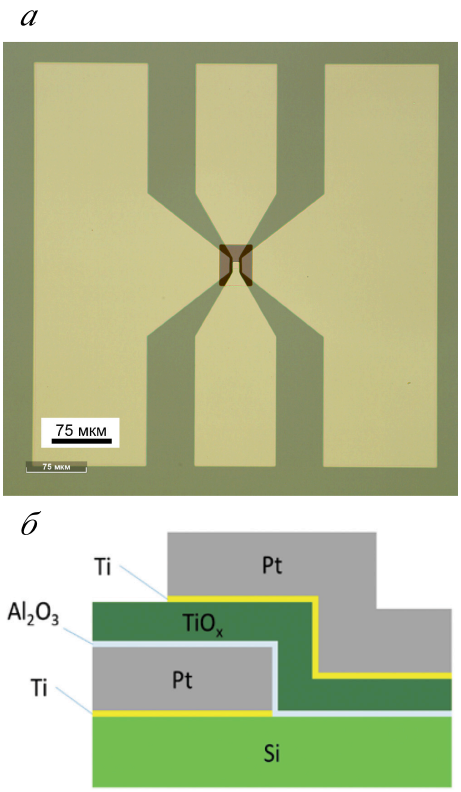

Рис. 2. Оптическое изображение изготовленной мемристивной структуры Ti/Pt/Al_2O_3/TiO_x/Ti/Pt, интегрированной в копланарную линию (*а*) и вид мемристивного устройства в разрезе (*б*)

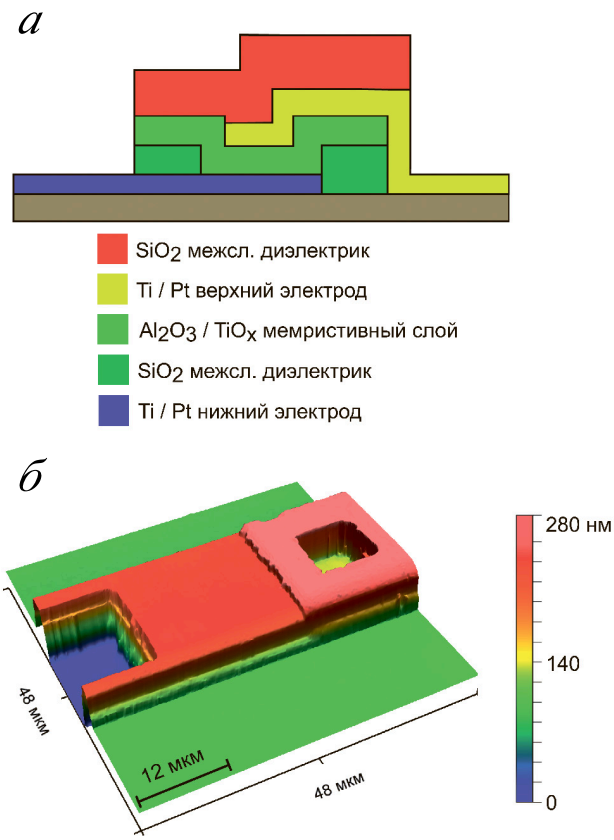

Рис. 3. Вид BEOL-интегрированного мемристивного устройства Al_2O_3/TiO_x в разрезе (*а*) и его скан, полученный методом атомно-силовой микроскопии (*б*)

Верхний и нижний электроды структуры формировались методом магнетронного осаждения. Параметры осаждения и толщины слоев электродов и мемристивных слоев Al_2O_3/TiO_x соответствовали тем, которые использовались при формировании конденсаторных структур и структур, интегрированных в копланарную линию.

Слои защитного диэлектрика SiO_2 формировались методом магнетронного осаждения на установке УВН(М). Для получения пленок SiO_2 использовалась мишень из диоксида кремния (ООО «Гирмет»), а в качестве рабочего газа — смесь аргона и кислорода. Рабочее давление газовой смеси поддерживалось на уровне $1 \cdot 10^{-3}$ Торр. Толщины слоев защитного диэлектрика лежали в диапазоне 130–170 нм.

Тестирование работоспособности Al_2O_3/TiO_x-слоев мемристивных структур проводилось при помощи измерительного комплекса, состоящего из параметрического анализатора Keithley 4200-SCS и зондовой станции Cascade Microtech M150.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Для выхода в режим резистивного переключения все типы сформированных структур — конденсаторные, копланарные и BEOL-интегрированные — требовали проведения стадии электроформовки.

Следует отметить, что процедура электроформовки может проводиться по двум протоколам: в импульсном режиме и в режиме квазистатической развертки по напряжению. Для анализа вклада токов утечки был выбран второй вариант проведения электроформовки, согласно которому на верхний электрод мемристивных устройств подавалось развертка по напряжению отрицательной полярности до −12 В (относительно нижнего электрода) с включением в измерительную цепь токоограничивающего резистора.

Для конденсаторных устройств с диаметром верхнего электрода 100, 200 и 300 мкм при квазистатической развертке по напряжению наблюдается немемристивный гистерезис (до момента достиже-

ния напряжения формовки), при котором структуры переходят в промежуточное низкоомное состояние (рис. 4*а*). Характер немемристивного гистерезиса для устройств диаметром 200 и 300 мкм воспроизводится по форме ВАХ. Отличия ВАХ для неформованных конденсаторных структур диаметром 100 мкм, как будет объяснено далее, обусловлены неидеальностью верхнего электрода и определяются особенностями его напыления через теневую маску, толщина которой для данного случая сравнима с диаметром верхнего электрода. Вывод структуры в рабочий режим резистивной перестройки из промежуточного низкоомного состояния осуществляется путем подачи напряжения обратной полярности, не превышающего 2.5 В.

Электроформовка BEOL-интегрированных мемристивных устройств качественно (по виду квазистатических ВАХ) и количественно (по величинам напряжений формовки) воспроизводит процесс электроформовки конденсаторных устройств.

Для копланарных линий с размерами мемристивных устройств 5×5, 8×8, 10×10, 12×12, 15×15, 20×20, 30×30 мкм^2 характер ВАХ до достижения формовки качественно отличался от наблюдаемого для конденсаторных и BEOL-интегрированных устройств (рис. 4*б,в*). Анализ показал, что в копланарной линии при напряжениях, превышающих 3 В, крутизна ВАХ резко уменьшается по сравнению с конденсаторными структурами. При этом ток, протекающий через структуру, в диапазоне напряжений 2–6 В увеличивается крайне незначительно, не превышая уровня 0.1 мкА.

Поскольку параметры осаждения и толщины электродов и мемристивных слоев Al_2O_3/TiO_x во всех типах устройств не изменялись, мы предполагаем, что изменение ВАХ мемристивных устройств в копланарной линии обусловлено влиянием токов поверхностной утечки. Анализ их влияния проводился с использованием эквивалентных схем квазистатического режима работы конденсаторной структуры (рис. 5*а*) и структуры в копланарной линии (рис. 5*б*).

В конденсаторном устройстве токи утечки практически не влияют на процедуру электроформовки в силу особенностей интеграции слоев Al_2O_3/TiO_x, которые сплошным слоем закрывают нижний электрод структуры. Поэтому при достижении напряжения 3 В в конденсаторном устройстве начинает происходить образование филамента, сопровождающееся резким увеличением тока. Выделяемая при этом мощность составляет $P_{Fmin} = 3$ В $\times 3.73$ мкА $= 11.19$ мкВт.

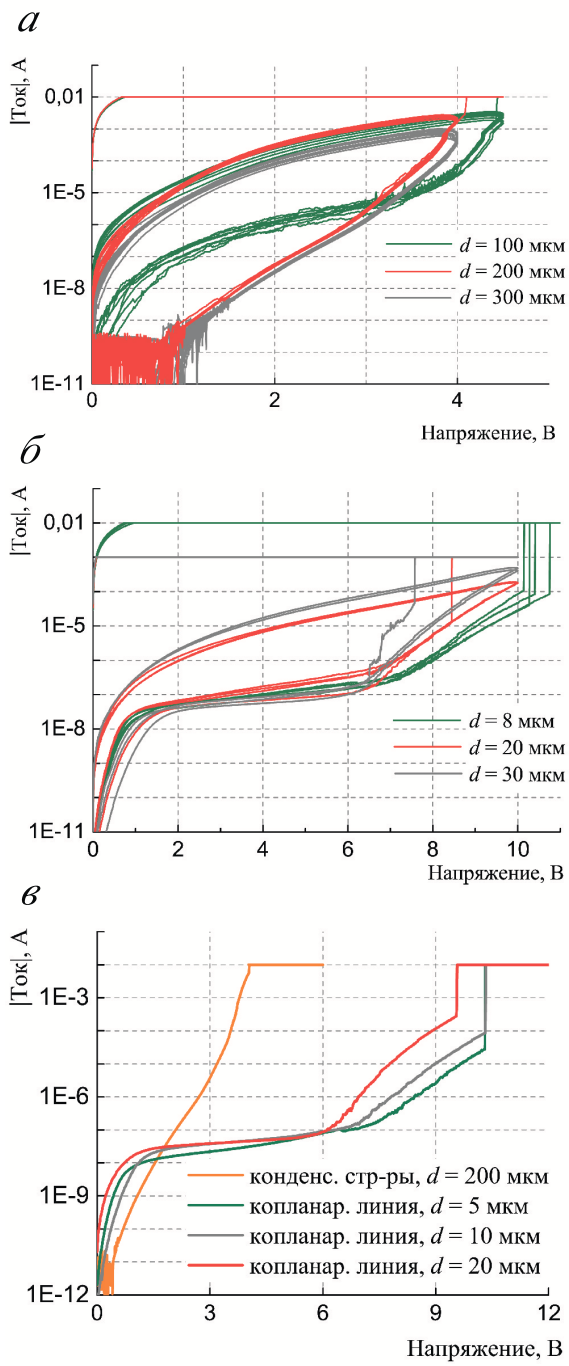

Рис. 4. Квазистатические ВАХ, полученные в процессе электроформовки мемристивных устройств на базе слоев Al_2O_3/TiO_x в конденсаторном устройстве диаметром 100, 200 и 300 мкм (*а*), в копланарной линии с размером мемристивного устройства 8×8, 20×20, и 30×30 мкм^2 (*б*), в конденсаторном устройстве диаметром 200 мкм и копланарной линии с размером мемристивного устройства 5×5, 10×10, и 20×20 мкм^2 (*в*), совмещенные на одном графике для удобства восприятия. Полярность указана относительно нижнего электрода структур

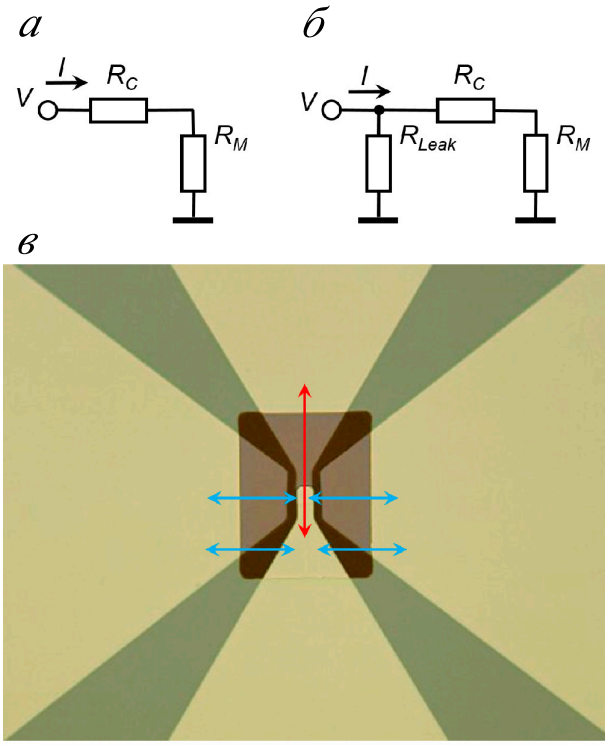

Рис. 5. Эквивалентные схемы конденсаторного устройства (*а*) и устройства в копланарной линии (*б*): V — напряжение на структуре; I — ток; R_M — сопротивление мемристивных слоев Al_2O_3/TiO_x; R_C — сопротивление контактов мемристивного устройства; R_{Leak} — сопротивление поверхностной утечки мемристивного устройства. *в*) Оптическое изображение мемристивного устройства в копланарной линии. Стрелками условно показаны поверхностные токи утечки между сигнальными линиями (красная стрелка) и между сигнальной линией и заземленными полигонами (синие стрелки)

В процессе развертки напряжения мощность увеличивается и при 4 В достигает максимального (с учетом введенного ограничения тока) значения $P_{Fmax} = 4\,\text{В} \times 4.74\,\text{мА} = 18.96\,\text{мВт}$. При достаточно медленной, квазистатической развертке напряжения этой мощности достаточно для локального нагрева слоев Al_2O_3/TiO_x и образования филамента, сопровождаемого резким снижением сопротивления мемристивной структуры.

В копланарной линии сопротивление утечки R_{Leak} включено параллельно мемристивному устройству, как показано на эквивалентной схеме (рис. 5*б*). При квазистатической развертке по напряжению в процессе формовки часть регистрируемого тока будет протекать в виде поверхностных токов утечки, условно показанных стрелками на рис. 5*в* (между сигнальными линиями (красная стрелка) и между сигнальной линией и заземленными полигонами (синие стрелки)). В первом приближении R_{Leak} можно оценить как отношение приложенного напряжения V к разности токов копланарной I_{copl} и конденсаторной I_{cap} структур:

$$R_{Leak} = \frac{V}{I_{copl} - I_{cap}\frac{S_{copl}}{S_{cap}}} = \frac{V}{I_{copl} - I_{cap}\frac{D^2_{copl}}{D^2_{cap}}}, \qquad (1)$$

где S_{copl}, S_{cap}, D_{copl}, D_{cap} — площади и диаметры контактов копланарной и конденсаторной структур соответственно.

Сравнительный анализ динамики процесса электроформовки (рис. 4*в*) показывает, что в диапазоне напряжений, ограниченных сверху значением напряжения, при котором обеспечиваются условия образования филамента в конденсаторной структуре, ВАХ копланарного и конденсаторного устройства качественно не различаются. При этом сопротивление утечки в рассматриваемом диапазоне уменьшается от единиц гигаом (при напряжениях менее 0.5 В), соответствующих токам утечки в единицы наноампер, до 125 МОм (при напряжении 2.5 В).

При найденных значениях R_{Leak} ток утечки в диапазоне напряжений 2.5–10 В составит 20–80 нА. Таким образом, в соответствии с ВАХ ток, протекающий через слои Al_2O_3/TiO_x в копланарном мемристивном устройстве, будет изменяться в диапазоне 10–20 нА при напряжениях 2.5–7 В, что соответствует выделяемой на структуре мощности 25–140 нВт. Такой мощности заведомо недостаточно для формирования филамента, чем объясняется отсутствие резкого увеличения тока в области напряжений выше 2.5 В, наблюдаемого на ВАХ конденсаторной структуры. При дальнейшем увеличении напряжения в копланарной структуре выделяемая мощность будет расти, и при напряжении, превышающем 9.5 В, произойдет образование филамента с последующим резким увеличением тока.

Следует отметить, что ВАХ процесса электроформовки мемристивных структур, интегрированных в BEOL-процесс КМОП-технологии, из-за практического отсутствия в них токов утечки аналогична ВАХ конденсаторного устройства, приведенной на рис. 4*в*.

Как для конденсаторных, так и для копланарных устройств наблюдается уменьшение значения напряжение формовки с увеличением размеров мемристивных структур. Подобная зависимость объясняется равномерным распределением плотности тока в слоях Al_2O_3/TiO_x в исходном состоянии (до образования филамента). Таким образом, до

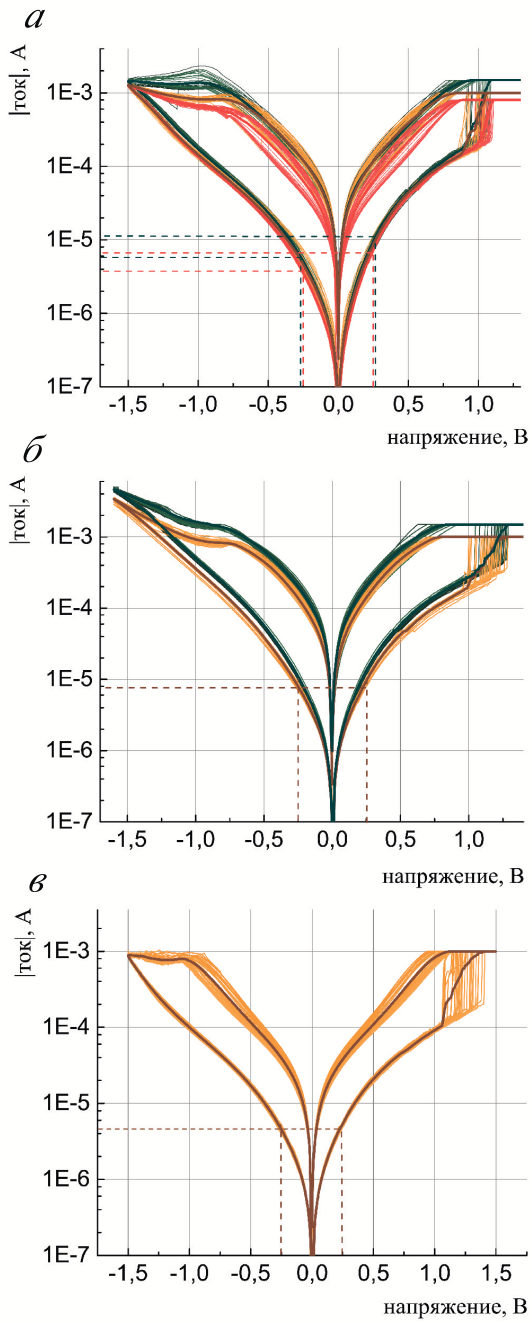

Рис. 6. Квазистатические ВАХ мемристивных устройств на базе слоев Al_2O_3/TiO_x в режиме биполярного резистивного переключения: *а* — для BEOL-интегрированных устройств; *б* — для мемристивных устройств в копланарной линии; *в* — в конденсаторных устройствах. Полярность указана относительно нижнего электрода структур

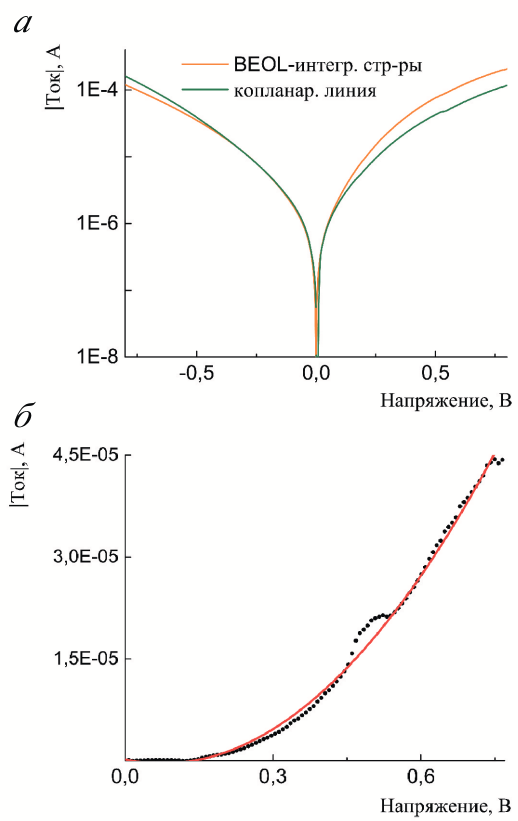

Рис. 7. Усредненные ВАХ BEOL-интегрированных и копланарных мемристивных устройств на базе слоев Al_2O_3/TiO_x (*а*) и зависимость разности токов в высокоомных состояниях для положительной полярности напряжения (*б*)

формовки сопротивление мемристивной структуры обратно пропорционально площади контактов S, и выделяемая при протекании тока мощность P увеличивается пропорционально S:

$$P = \frac{V^2 S}{\rho d},$$

где ρ — среднее удельное сопротивление мемристивной структуры; d — толщина мемристивной композиции Al_2O_3/TiO_x; V — приложенное напряжение.

В результате тепловыделение с увеличением размеров контактов структур увеличивается, стимулируя образование филамента при более низких напряжениях.

Крутизна ВАХ для процесса электроформовки в диапазоне напряжений, превышающих 7 В, определяется размером мемристивного устройства в копланарной линии. Данный эффект в соответствии с эквивалентной схемой, приведенной на рис. 5*б*, объясняется различными значениями сопротивлений контактов R_C, включенных последовательно с сопротивлением мемристивных слоев Al_2O_3/TiO_x. При равных исходных значениях удельной проводимости контактов их сопротивление будет увеличиваться с уменьшением площади контактов, поэтому наименьшая крутизна рассматриваемого участка

ВАХ соответствует размеру контакта 5 мкм, а наибольшая — размеру контакта 20 мкм (рис. 4*в*).

В режиме резистивного переключения, выход на который происходит после проведения электроформовки, диапазон перестройки состояний проводимости для всех рассматриваемых типов устройств не зависит от их площади, что косвенно свидетельствует о филаментарном механизме резистивного переключения.

В режиме резистивного переключения между крайними высокоомным и низкоомным состояниями мемристивные устройства тестировались путем квазистатической развертки по напряжению. Для каждого отдельного мемристивного устройства измерялись ВАХ для не менее чем 100 последовательных циклов переключений. На рис. 6 приведены ВАХ мемристивных композиций Al_2O_3/TiO_x, интегрированных в BEOL-процесс (рис. 6*а*), в копланарной линии (рис. 6*б*) и в конденсаторной структуре (рис. 6*в*).

Можно видеть, что при идентичности электрофизических свойств композиций Al_2O_3/TiO_x, их квазистатические ВАХ имеют существенные различия. ВАХ BEOL-интегрированных мемристивных структур несимметричны в высокоомных состояниях относительно полярности прикладываемого напряжения. Конденсаторные и копланарные мемристивные устройства демонстрируют симметричные ВАХ.

Для анализа эффекта симметризации ВАХ мемристивных структур на рис. 7*а* приведены ВАХ для высокоомного состояния BEOL-интегрированных и копланарных мемристивных устройств, усредненные по результатам 50 циклов переключения в диапазоне напряжений от 0 до ± 0.8 В. На рис. 7*б* показана зависимость разности токов высокоомных состояний рассматриваемых типов устройств для положительной полярности напряжений.

Можно видеть, что на линейных участках ВАХ (в диапазоне напряжений ± 0.1 В) усредненные характеристики копланарных и BEOL-структур практически совпадают. При напряжениях выше 0.1 В крутизна ВАХ копланарных устройств меньше, чем крутизна ВАХ BEOL-интегрированных устройств, чем объясняется наблюдаемая симметризация ВАХ. При этом разность токов, в соответствии с рис. 7*б*, достигает 45 мкА при напряжении 0.8 В.

Наблюдаемое уменьшение крутизны ВАХ копланарных структур связано с возможным изменением свойств верхних контактов мемристивных устройств после электроформовки. Известно, что процесс электроформовки часто сопровождается газовыделением, приводящим к появлению дефектов [12]. Обусловленное влиянием токов утечки увеличение напряжения формовки может приводить к повышению плотности постформовочных дефектов на контактах, увеличивая их контактное сопротивление (R_C на эквивалентных схемах, см. рис. 5*б*) и приводя к снижению тока и симметризации ВАХ высокоомных состояний копланарных и конденсаторных структур.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние физических процессов, связанных с поверхностными токами утечки, на электрофизические характеристики, процедуру электроформовки и особенности резистивного переключения устройств на базе многоуровневых мемристивных композиций Al_2O_3/TiO_x, реализованных в виде конденсаторных структур, копланарных линий и интегрированных в BEOL-процесс интегральной КМОП-схемы. Показано, что способ интеграции мемристивных слоев существенно влияет на напряжение формовки. Так, наличие токов утечки в структуре приводит к снижению выделяемой на мемристивных слоях устройства мощности, которой становится недостаточно для образования филамента из кислородных вакансий, обеспечивающего перевод структуры в режим резистивного переключения. Данное обстоятельство приводит к необходимости повышения напряжения формовки в ряде случаев более чем в 3 раза по сравнению со структурами с низкими токами утечки. Вклад контактного сопротивления электродов структуры приводит к зависимости величины напряжения электроформовки от площади мемристивного устройства — с увеличением площади напряжение уменьшается.

Результаты анализа квазистатических ВАХ устройств в режиме резистивного переключения свидетельствуют об изменении их характера на нелинейном участке, обусловленного вкладом токов утечки. В рассматриваемых структурах $Ti/Pt/Al_2O_3/TiO_x/Ti/Pt$ различие свойств контакта на интерфейсе мемристивных слоев с верхним и нижним электродами приводит к асимметрии ВАХ относительно полярности прикладываемого напряжения. Асимметрия квазистатических ВАХ явно проявляется в BEOL-интегрированных структурах. Вклад токов утечки в конденсаторных и копланарных мемристивных устройствах

приводит к симметризации ВАХ. Данный эффект играет ключевую роль не только в исследованиях механизмов транспорта заряда в мемристивных композициях (в которых анализ ВАХ является одним из основных экспериментальных методов исследования), но и при аппаратном проектировании нейроморфных электронных модулей, поскольку изменение симметрии ВАХ относительно полярности прикладываемого напряжения оказывает влияние на сходимость процесса обучения при его аппаратной реализации.

Таким образом, токи поверхностной утечки, несмотря на их малые значения, оказывают существенное влияние на характеристики мемристивных структур и функциональных блоков на их основе, реализованных в различных конструктивно-технологических базисах.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации – государственное задание в области научной деятельности FSEE-2025-0005.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Ye, Z. Gao, J. Fu et al., Front. Phys. **10**, 839243 (2022).

2. P. Yao, H. Wu, B. Gao et al., Nature **577**, 641 (2020).

3. F. Kiani, J. Yin, Z. Wang et al., Sci. Adv. **7**, eabj4801 (2021).

4. Y. Zhong, J. Tang, X. Li et al., Nat. Electron. **5**, 672 (2022).

5. C. Li, M. Hu, Y. Li et al., Nat. Electron. **1**, 52 (2018).

6. R. Wang, T. Shi, X. Zhang et al., Nat. Commun. **13**, 2289 (2022).

7. C. Li, D. Belkin, Y. Li et al., Nat. Commun. **9**, 2385 (2018).

8. J. Rupp, D. Ielmini, and I. Valov, *Resistive Switching: Oxide Materials, Mechanisms, Devices and Operations*, Springer, Cham (2022), p. 383.

9. W. Haensch, A. Raghunathan, K. Roy et al., Adv. Mater. **35**, 2204944 (2023).

10. M. Onen, T. Gokmen, T. K. Todorov et al., Front. Artif. Intell. **5**, 891624 (2022).

11. U. Böttger, M. von Witzleben, V. Havel et al., Sci. Rep. **10**, 16391 (2020).

12. M. Lübben, S. Wiefels, R. Waser et al., Adv. Electron. Mater. **4**, 1700458 (2018).